



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA
"TOR VERGATA"

FACOLTA' DI INGEGNERIA

DOTTORATO DI RICERCA IN ENERGIA E AMBIENTE

XXII CICLO

**STUDIO DELLE PROBLEMATICHE ENERGETICHE E SVILUPPO DI
METODOLOGIE PER L'OTTIMIZZAZIONE DELLA GESTIONE E
PROGETTAZIONE DI SISTEMI ENERGETICI FISSI E MOBILI**

Marco Valerio Ciminelli

A.A. 2009/2010

Docente Guida: Prof. Massimo Feola

Coordinatore: Prof. Fabio Gori

Sommario

Introduzione	5
Capitolo 1.....	7
1.1 Scenario energetico mondiale	7
1.1.1 Consumi	7
1.1.2 Un allarmante futuro	9
1.2 Linee guida per fronteggiare la sfida energetica	14
1.2.1 L'efficienza energetica	15
1.2.2 Il ruolo del nucleare	18
1.2.3 Tecnologie ad emissioni "zero".....	19
1.2.4 Effetti dell'accelerazione tecnologica nel medio e lungo periodo.....	22
Capitolo 2.....	24
2.1 Le normative vigenti	26
2.1.1 Normativa europea.....	26
2.1.2 Normativa americana	27
2.1.3 Normativa giapponese e cinese.....	28
2.2 Possibili soluzioni per un trasporto sostenibile.....	28
2.2.1 Limitazione della circolazione di veicoli.....	28
2.2.2 Utilizzo di combustibili alternativi	29
2.2.3 Evoluzione dei motori convenzionali	30
2.2.4 Veicoli elettrici	31
2.2.5 Veicoli a celle a combustibile	32
2.2.6 Propulsione ibrida	33
Capitolo 3.....	34
3.1 I veicoli ibridi	34
3.1.1 Cenni storici	34
3.1.2 Architettura.....	35
Capitolo 4.....	46
4.1 Il progetto Microcar.....	46
4.1.1 Caratteristiche tecniche del veicolo.....	47
4.1.2 Telaio	48
4.1.3 Il motore endotermico	49
4.1.4 Il motore elettrico di trazione	50
4.1.5 Il generatore elettrico	51

4.1.6 Il sistema di accumulo	52
4.2 La gestione dei flussi energetici del veicolo.....	53
4.2.1 Efficienza del veicolo	54
4.2.2 Scelta dei supercapacitori.....	55
4.3 Strategia di controllo del gruppo motogeneratore.....	57
4.3.1 Logica di controllo a carico costante	58
4.3.2 Logica di controllo a carico variabile	60
4.3.4 La logica di controllo adottata per il veicolo Urb-e	61
4.4 Il codice di gestione del veicolo Urb-e.....	62
4.4.1 Trasmissione dati	64
4.4.2 Logica di gestione dei segnali acquisiti	66
4.4.3 La frenata rigenerativa	67
4.4.4 Freno motore.....	68
4.4.5 Gestione della potenza.....	69
4.4.6 Calcolo dei parametri del motogeneratore	70
4.4.7 Controllo in retroazione del motogeneratore	71
4.5 Definizione dei parametri di controllo: test e simulazioni numeriche	73
4.5.1 Taratura del controllo in retroazione del gruppo motogeneratore.....	74
4.6 Simulazioni numeriche per la taratura della risposta del motogeneratore	81
4.7 Test sperimentali su strada	86
Capitolo 5.....	90
5.1 Energy Management	90
5.1.1 Evoluzione dell'Energy management nelle aziende	92
5.2 Quadro concettuale	94
5.3 La metodologia sviluppata: un approccio integrato	95
Capitolo 6.....	100
6.1 Modellazione di sistemi di autoproduzione di energia	100
6.1.1 I fabbisogni energetici	102
6.1.2 Motori a combustione interna per cogenerazione.....	103
6.1.3 Impianti turbogas	104
6.1.4 Caldaie e generatori di vapore	104
6.1.5 Macchine frigorifere.....	105
6.1.6 Pannelli fotovoltaici	106
6.1.7 Collettori solari termici.....	106
6.2 Equazioni di bilancio.....	107

6.2.1 Bilancio elettrico	107
6.2.2 Bilanci termici.....	107
6.2.3 Analisi dei costi e dei consumi	109
6.3 Realizzazione del codice di calcolo.....	109
Capitolo 7.....	112
7.1 Ricerca operativa ed algoritmi di ottimizzazione.....	112
7.1.1 Metodo Backtracking	113
7.1.2 Metodo Sequential Quadratic Programming (SQP)	114
7.2 Formulazione del codice di calcolo.....	116
7.2.1 Funzione obiettivo.....	116
7.2.2 Vincoli di bilancio	118
7.2.3 Cambio di coordinate.....	120
7.3 Algoritmo usato nel modello	121
Capitolo 8.....	124
8.1 Ottimizzazione della centrale energetica di un ospedale	124
8.2 Fabbisogni energetici.....	124
8.2.1 Energia elettrica.....	125
8.2.2 Acqua calda.....	125
8.2.3 Vapore.....	126
8.2.4 Acqua fredda	127
8.3 Macchine della centrale energetica	128
8.3.1 Caldaie per la produzione di acqua calda	128
8.3.2 Macchine frigorifere elettriche.....	130
8.3.3 Motore a combustione interna.....	131
8.3.4 Macchina frigorifera ad assorbimento di calore.....	132
8.4 Simulazioni	132
8.4.1 Configurazione originale.....	132
8.4.2 Configurazione di massima produzione di energia.....	135
8.4.3 Configurazione di minima spesa economica	139
Conclusioni	145
Bibliografia	147

Introduzione

“Il sistema energetico mondiale è ormai giunto ad un crocevia. I trend globali odierni di domanda e offerta di energia sono manifestamente insostenibili da un punto vista ambientale, economico e sociale. Ma questo può, e deve essere cambiato; *c'è ancora tempo per modificare la rotta*. Non è esagerato affermare che il benessere futuro dell'umanità dipende da come affronteremo le due principali sfide energetiche che oggi abbiamo di fronte: assicurare un'offerta di energia affidabile e a prezzi accessibili ed effettuare una rapida trasformazione verso approvvigionamenti energetici a basso contenuto di carbonio, efficienti e rispettosi dell'ambiente. Per realizzarli, bisogna attuare una rivoluzione energetica.” [1]

Con queste parole l'Agencia Internazionale dell'Energia (AIE) nell'annuale resoconto sulla situazione energetica mondiale (WEO) del 2008, invitava i governi e le grandi forze economiche e produttive mondiali ad imboccare quella strada che sembra l'unica in grado di garantire la svolta per un'inversione di tendenza in materia di energia. È necessario infatti un profondo e concreto impegno a livello globale se si vuole risolvere in maniera definitiva le ormai chiare ed evidenti problematiche energetiche. Da troppo tempo infatti la situazione è andata avanti senza una reale presa di coscienza da parte degli addetti ai lavori volta a contrastare i pericoli derivanti da uno sconsiderato ed irrazionale uso, o meglio sarebbe dire “abuso”, delle risorse energetiche ed ambientali del pianeta. Tanto che da più parti giungono appelli che sottolineano la necessità di mettere in atto delle strategie efficaci ed efficienti se si vuole evitare di arrivare ad una situazione che potrebbe diventare irrecuperabile.

Ma è pur vero che il problema energia è per sua natura molto complesso, dovendo tener conto dell'aspetto di reperimento delle risorse, dei loro costi e del rispetto dell'ambiente. Tuttavia ciò non può essere assunto come alibi né dalle autorità politiche, rappresentate dai governi ed istituzioni internazionali, né dai grandi attori economici del panorama mondiale, come le multinazionali, nello scarso impegno dimostrato finora nel tentativo di contrastare l'insostenibilità delle scellerate politiche energetiche perseguite. Naturalmente non si chiede di adottare un modello economico/energetico fondato sulle tradizioni di stampo indigeno o aborigeno, questo sarebbe anacronistico ed evidentemente improponibile anche per le conseguenze sociali che inevitabilmente comporterebbe. Ma allo stesso tempo, è chiaro che l'attuale modello dominante nei paesi industrializzati e nei paesi in via di sviluppo necessita una sostanziale revisione che mantenga e favorisca le condizioni di crescita e progresso economico ed al contempo garantisca il rispetto dei principi di sviluppo sociale dei popoli e rispetto dell'ambiente.

È proprio in quest'ottica di sostenibilità e sviluppo in materia di energia che il lavoro di ricerca del mio dottorato si è collocato. Il percorso sviluppato in sede accademica si rifà alle linee guida generali in materia di risparmio e soprattutto efficienza energetica, definite dai principali organismi nazionali ed internazionali operanti nel settore. Nella tesi intendo quindi presentare in maniera organica il lavoro svolto in questi tre anni di studio e ricerca.

Nel primo capitolo viene illustrato lo scenario energetico globale in termini sia quantitativi che qualitativi, per definire il contesto nel quale ci troviamo. Inoltre saranno discusse le principali linee guida nazionali ed internazionali indicate per far fronte alla crisi energetica mondiale.

I capitoli due, tre e quattro sono dedicati alla tecnologia dei veicoli ibridi, nuova frontiera della trazione su strada. Il secondo capitolo fornisce le direzioni internazionali adottate dai governi per la soluzione del problema dei trasporti e offre anche una panoramica sulle possibili

soluzioni esistenti. Nel terzo capitolo viene descritta quella che oggi sembra essere la più concreta alternativa ai veicoli convenzionali: la propulsione ibrida termico-elettrica. Nel quarto capitolo è presentato in dettaglio lo specifico del progetto Microcar, veicoli ibrido serie con sistema di accumulo a supercondensatori realizzato in collaborazione dalle tre Università di Roma e dall'Enea.

Gli ultimi quattro capitoli sono invece dedicati all'Energy Management. Disciplina anche questa sostanzialmente nuova che ha come obiettivo quello di integrare le competenze di diversi settori della tecnica. Nel quinto capitolo viene presentata la disciplina in genere, attraverso i concetti fondamentali e qualche cenno storico. Nel sesto capitolo è descritta la metodologia sviluppata dal mio gruppo di ricerca in questo contesto. Nel settimo capitolo sono sviluppate le formule matematiche e le equazioni utilizzate nel modello di rappresentazione per eseguire simulazioni delle operazioni di un centrale di autoproduzione dell'energia per la copertura dei fabbisogni energetici. L'ultimo capitolo è un esempio delle potenzialità offerte dal modello descritto nel capitolo precedente, attraverso l'analisi di un caso di studio reale condotto su di ospedale nella città di Perugia.

Capitolo 1

Il miglioramento delle condizioni di vita a livello globale e, quindi, una crescita a livello economico e tecnologico, è stato da sempre l'obiettivo della ricerca e dello sviluppo scientifico.

Il XX secolo ha visto una crescita economica e tecnologia mai registrata prima [2]. Tuttavia, questo "esplosivo" sviluppo ha portato ad una crescita del fabbisogno energetico molto più rapida rispetto a quella economica. La discrepanza tra questi trend di crescita è imputabile principalmente alla bassa efficienza dei sistemi di conversione energetica. A questo si aggiunge il massiccio utilizzo di combustibili fossili, reperibili per lungo tempo ad un costo bassissimo e considerati "inesauribili", visione oggi smentita dai fatti. Senza tener conto della miopia della comunità internazionale verso i rischi che l'utilizzo di tali fonti energetiche potessero avere sull'ambiente e sulla salute pubblica. Miopia che si è anche confermata relativamente all'ingresso nella scena mondiale economico/energetica di attori importanti come la Cina, l'India e altri Paesi in via di sviluppo (con elevatissimi tassi di crescita e sviluppo) che ha dato ulteriore spinta all'incremento del fabbisogno energetico e che, unitamente alla continue turbolenze politiche dei paesi produttori, ha causato un forte rialzo del costo dell'energia.

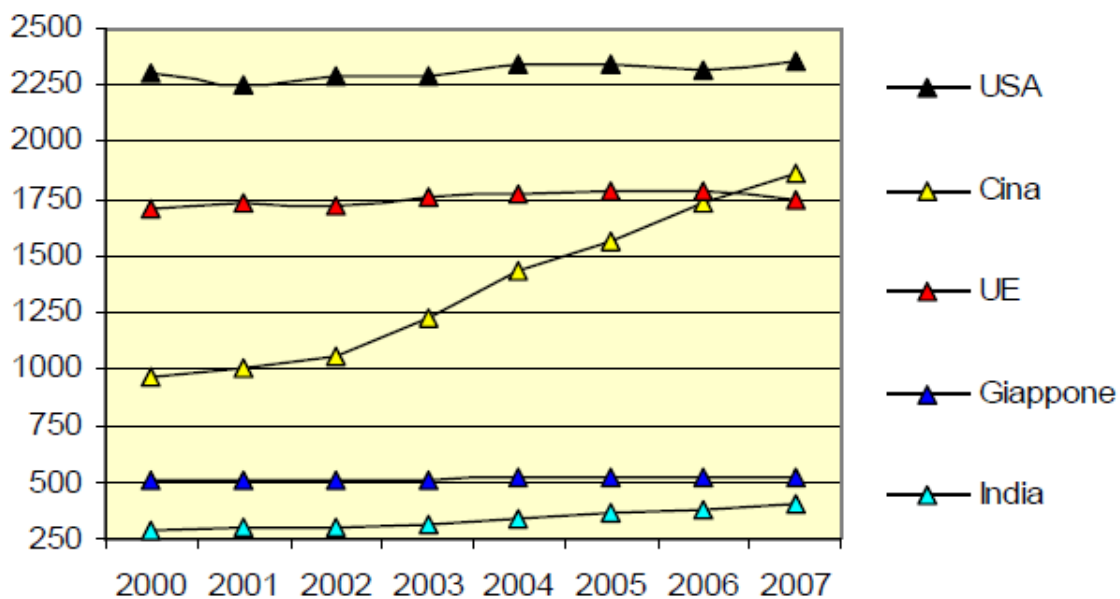
Grazie alla convincente spinta del costo dell'approvvigionamento energetico, la comunità mondiale ha rafforzato i propri sforzi ed investimenti in ricerca nel raggiungere una maggiore efficienza energetica ed una sostanziale differenziazione delle fonti primarie di energia. Questo impulso verso efficienza e diversificazione, indotto da ragioni economiche, ben si è sposato con un'altra problematica, forse ben più grave ed importante, legata all'uso di combustibili fossili, rappresentata da inquinamento ambientale ed effetto serra.

Istituzioni, Organismi nazionali ed internazionali e Governi hanno espresso preoccupazione, sollecitato interventi ed elaborato delle strategie a medio e lungo termine che potessero porre un freno a questa situazione e rappresentare un modo per risolvere la sempre più marcata crisi energetica nella quale l'intero pianeta si trova.

1.1 Scenario energetico mondiale

1.1.1 Consumi

Sebbene nel corso del 2009 il consumo mondiale di energia ha subito un calo di entità significativa, per la prima volta dal 1981, a causa della crisi economica e finanziaria, se le politiche attuali continueranno ad essere perseguite, esso potrà riprendere la sua tendenza di crescita di lungo termine non appena si vedranno gli effetti di una ripresa economica [3]. Secondo le proiezioni dello Scenario di Riferimento elaborato dall'Agenzia Internazionale dell'Energia, la domanda mondiale di energia primaria aumenterà dell'1,5% annuo nel periodo compreso tra il 2007 e il 2030, da poco più di 12 000 Mtep (milioni di tonnellate equivalenti di petrolio) a 16 800 Mtep – un aumento globale del 40%. I Paesi asiatici in via di sviluppo sono i principali motori di questa crescita (figura 1).



Fonte: BP Statistical Review of World Energy - June 2008 (database)

Figura 1 Consumi mondiali di energia primaria

In questo scenario i combustibili fossili restano la fonte principale di energia primaria nel mondo, e rappresentano oltre i tre quarti della crescita del consumo energetico globale tra il 2007 e il 2030 come mostrato in figura 2.

In termini assoluti, è il carbone a detenere il tasso di crescita della domanda più elevato nel periodo di proiezione, seguito dal gas e dal petrolio. Quest'ultimo, però, rimane il combustibile preponderante nel mix di combustibili primari al 2030, nonostante la sua percentuale scenda dall'attuale 34% al 30%. Si prevede una crescita media della domanda di petrolio (escludendo i biocombustibili) dell'1% all'anno nel periodo di proiezione, dagli 85 milioni di barili al giorno del 2008 a 105 milioni di barili nel 2030. La crescita avviene essenzialmente nei Paesi non-OCSE: nei Paesi OCSE, infatti, la domanda decresce. Il settore dei trasporti è responsabile per il 97% della crescita del consumo di petrolio. Considerando che la produzione di petrolio convenzionale nei Paesi non-OPEC raggiungerà un picco intorno al 2010, gran parte dell'aumento della produzione dovrà giungere dai Paesi OPEC, che possiedono la maggior parte delle rimanenti risorse recuperabili di petrolio convenzionale. Diversamente dal petrolio il principale motore della domanda di carbone e gas è la crescita inesorabile del fabbisogno elettrico, pari al 2,5% annuo fino al 2030, con l'80% di tale incremento nei Paesi non-OCSE.

Complessivamente, l'aumento di capacità della produzione elettrica sarà pari a 4800 GW entro il 2030 - quasi cinque volte superiore alla capacità attuale degli Stati Uniti. L'aumento più importante (circa il 28% del totale) si verifica, ancora, in Cina. Il carbone rimane il principale combustibile nel settore elettrico, con una crescita di 3 punti percentuali nel mix di produzione mondiale raggiungendo una quota del 44% nel 2030. La produzione di energia nucleare cresce in tutte le maggiori aree geografiche tranne l'Europa, ma la sua percentuale nel mix di generazione elettrica complessivo registra un calo.

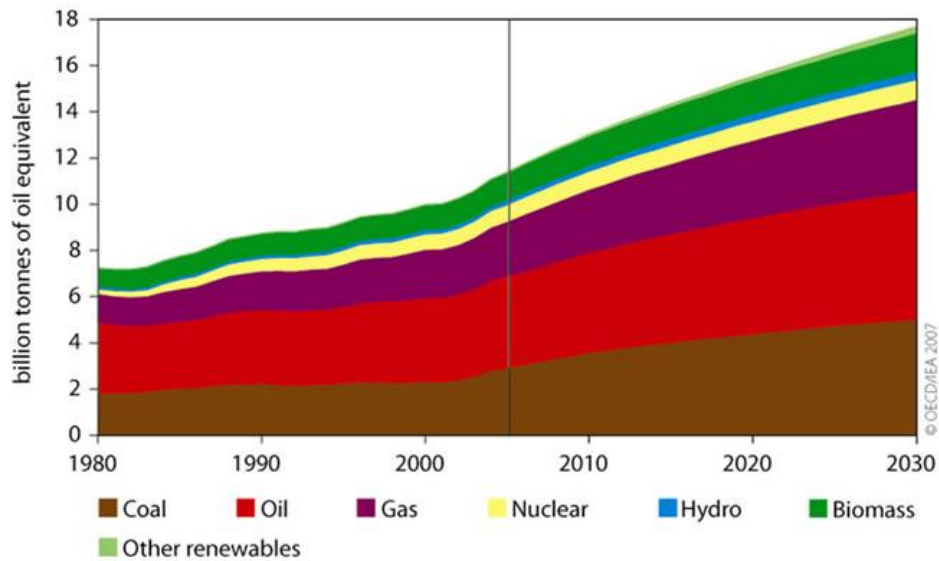


Figura 2 Domanda di energia mondiale nello scenario di riferimento IEA

D'altra parte, come emblematicamente rappresentato nel grafico in figura 2, anche se recitano la parte di Davide contro Golia, le moderne tecnologie energetiche rinnovabili (eolica, solare, geotermica, mareomotrice e bioenergia) registrano il più rapido tasso di crescita nello Scenario di Riferimento. Questo incremento riguarda principalmente la produzione elettrica: la percentuale dell'elettricità totale prodotta dalle rinnovabili non idroelettriche sale dal 2,5% nel 2007 all'8,6% nel 2030. L'eolica registra in assoluto il maggior aumento, come il consumo di biocarburanti nel settore trasporti, anch'esso in forte rialzo. Al contrario, la percentuale di energia idroelettrica scende dal 16% al 14%.

1.1.2 Un allarmante futuro

Procedere nella attuale direzione, senza nessun cambiamento nelle politiche energetiche dei governi, comporterebbe una crescente dipendenza dai combustibili fossili, con conseguenze allarmanti sul cambiamento climatico e sulla sicurezza energetica. Lo Scenario di Riferimento prevede infatti un incremento rapido e costante delle emissioni di anidride carbonica nel settore energetico, dovuto a una crescita della domanda mondiale di energia fossile. La preoccupazione di cui si parla appare evidente dalla sempre più frequenti crisi planetarie che si sono susseguite nel corso degli ultimi decenni, fino ad arrivare alla crisi del 2008 che tutt'ora incombe con la sua gravità sul mondo intero.

Le criticità di un sistema sociale fondato su questi principi di mercato e di produzione, possono essere rintracciate in tre aspetti fondamentali della questione energetica:

- Disponibilità
- Costo
- Rispetto ambientale

Nei grafici delle figure 3 e 4 è possibile osservare la attuale situazione in merito alla disponibilità temporale delle riserve mondiali di petrolio e gas che rispettivamente risultano essere di circa 40 e 85 anni. È pur vero che bisogna tener conto delle future tecnologie che consentiranno l'estrazione di combustibili fossili da altri giacimenti oggi non accessibili per gli

elevati costi ed altre problematiche, piuttosto che da altre forme presenti sul pianeta che contengono petrolio (scisti bituminose). Tuttavia non si può dimenticare che la domanda

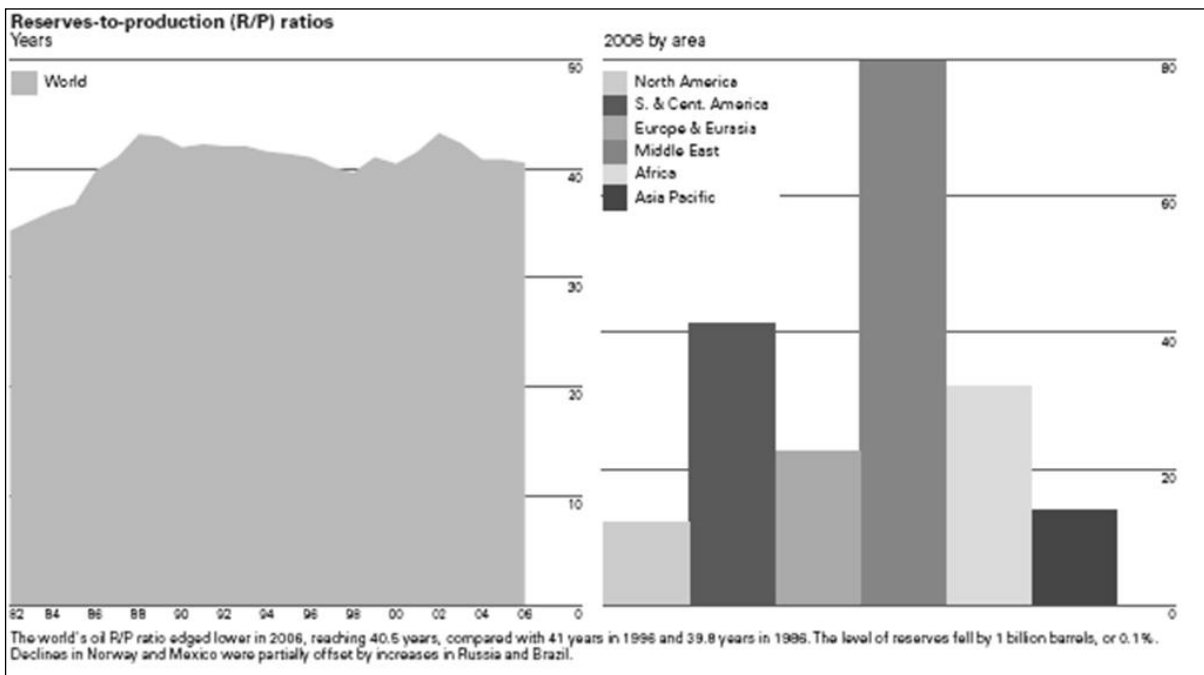


Figura 3 Riserve di petrolio nel mondo

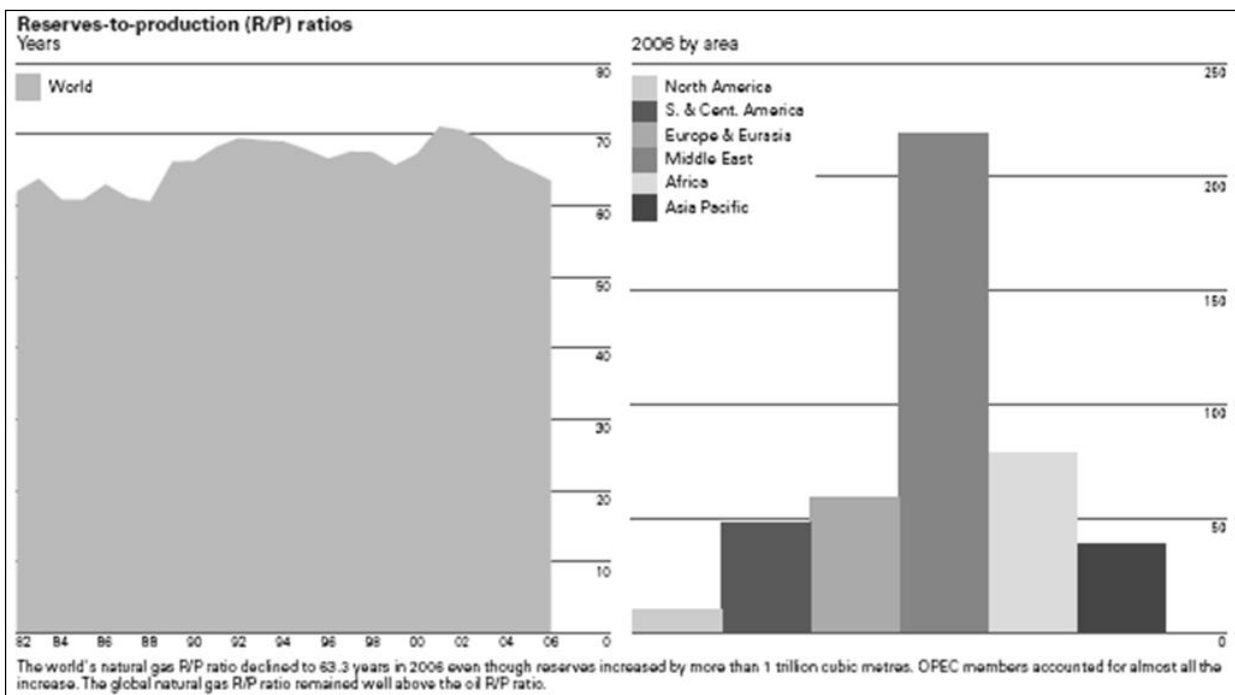


Figura 4 Riserve di gas naturale nel mondo

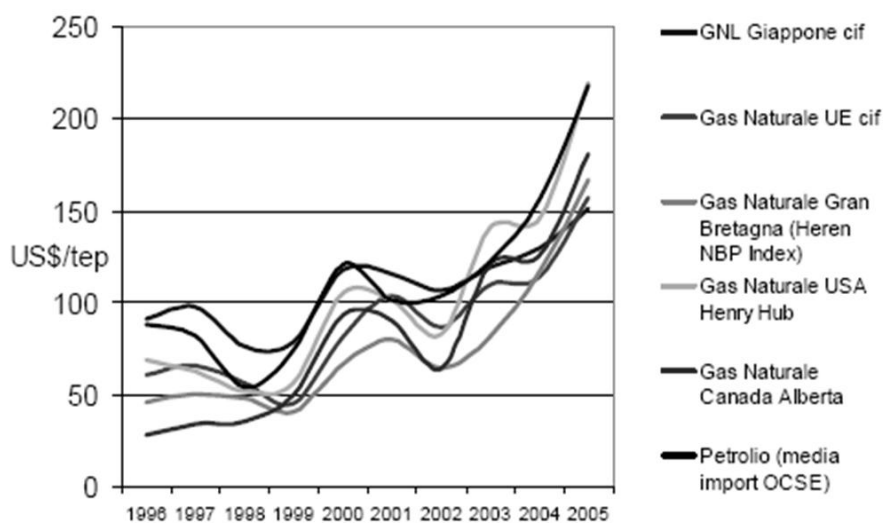
inevitabilmente crescerà con l'affacciarsi alla sviluppo di altri paesi che attualmente giocano un ruolo assolutamente marginale nel mercato mondiale dell'energia.

Senza entrare nel merito del sistema economico e soprattutto finanziario che regola il prezzo dei combustibili sul mercato, quello del costo delle fonti primarie di energia, è un problema evidente a tutti. Tutti infatti ricorderanno la recente ascesa del costo del barile di greggio che nel 2008 ha superato i 150 dollari e che ha comportato pesanti ricadute sulla vita di tutti noi a causa del forte incremento del costo della vita. In figura 5 è riportato il costo del barile di greggio tra il 2000 e il 2009.



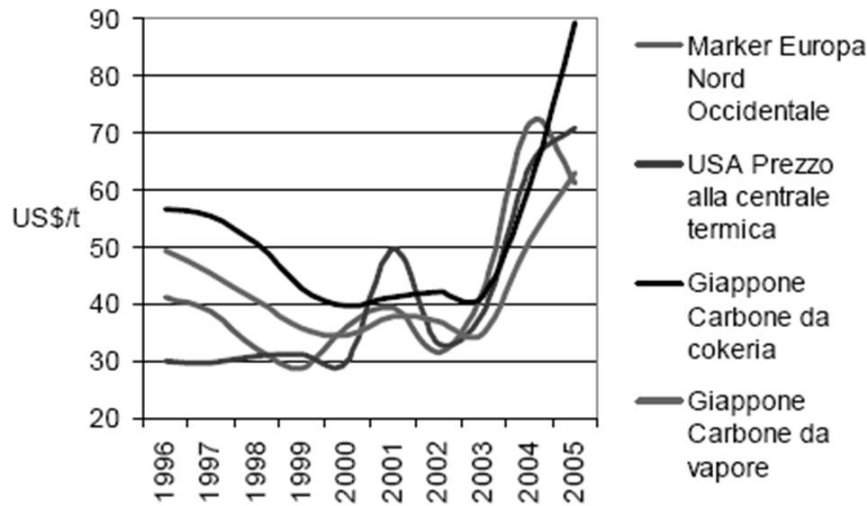
Figura 5 Prezzo del petrolio \$/barile

È significativo osservare (figure 6 e 7) inoltre che in conseguenza delle variazioni del costo del petrolio, che come è stato detto, rappresenta attualmente la principale fonte di approvvigionamento energetico mondiale, anche il costo degli altri combustibili fossili segue l'andamento di quest'ultimo. Ciò in ragione del cambiamento di domanda di energia primaria da parte degli Stati importatori in risposta all'aumento o alla diminuzione dei prezzi dei combustibili.



Fonte: elaborazione ENEA su dati di varia provenienza

Figura 6 Prezzo di gas naturale e gas naturale liquefatto per tonnellata equivalente di petrolio



Fonte: elaborazione ENEA su dati di varia provenienza

Figura 7 Prezzo del carbone per tonnellata equivalente di petrolio

Anche i prezzi del carbone risentono, seppur con qualche ritardo, delle tendenze più generali nei prezzi energetici. Il ritardo con cui i prezzi si adeguano ai rincari delle altre fonti energetiche è dovuto al tempo necessario all'industria elettrica per realizzare uno spostamento significativo dal petrolio, o dal gas, al carbone come combustibile per nuovi impianti di generazione.

La questione ambiente è quella poi che più di tutte ha riscosso maggior attenzione dell'opinione pubblica recentemente. Altro non fosse che per il recente incontro tenutosi a Copenhagen a fine dello scorso anno, e per le sempre più frequenti notizie di stravolgimenti climatici che stanno interessando l'intero pianeta.

Le emissioni di anidride carbonica in atmosfera sono passate da 20,9 miliardi di tonnellate (Gt) per anno del 1990, fino agli attuali valori di circa 28,8 Gt per anno del 2007. La capacità di assorbimento dell'anidride carbonica da parte degli oceani e degli ecosistemi vegetali terrestri mostra, negli anni più recenti, una tendenza ad una progressiva diminuzione.

Di conseguenza, l'accumulo in atmosfera di anidride carbonica è andato via via aumentando ed ha raggiunto, negli ultimi cinque anni, una velocità di accumulo pari a circa 15 miliardi di tonnellate per anno.

L'attuale concentrazione di anidride carbonica in atmosfera è la più alta che si sia mai verificata negli ultimi 650 mila anni e molto probabilmente anche nell'ultimo milione di anni. Oltre che per l'anidride carbonica, anche per altri gas-serra come il metano (CH₄) ed il protossido di azoto (N₂O), le concentrazioni atmosferiche sono aumentate in modo significativo a partire dall'inizio della rivoluzione industriale. Tutto questo ha portato ad un aumento, nell'ultimo secolo, della temperatura media globale di 0,65° C, secondo le più recenti valutazioni di IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), le cui conseguenze sono ormai conosciute da tutti (aumento dell'evaporazione degli oceani e dell'umidità dell'aria, diminuzione ghiacciai, aumento livello mare ecc) [4].

Allo scopo di definire le tendenze energetiche dei prossimi anni (fino al 2050) e le conseguenze correlate, nel suo rapporto annuale l'IEA presenta un'analisi approfondita della situazione attuale e futura delle tecnologie esistenti ed avanzate per un'energia pulita, illustrando anche,

con un'analisi basata su differenti scenari, come un mix di queste tecnologie possa fare la differenza introducendo il concetto di "accelerazione tecnologica".

Nel rapporto sono presentati diversi gruppi di scenari. Gli "Scenari ACT" mostrano come le emissioni di CO₂ mondiali possono essere riportate, nel 2050, ai livelli attuali. Ancora più spinti sono gli "Scenari BLUE" che hanno come obiettivo una riduzione del 50% delle emissioni di CO₂ nel medesimo arco temporale. Nella figura 8 sono indicate le emissioni di CO₂ nello scenario base e negli scenari di accelerazione tecnologica con riferimento alle percentuali di riduzione delle emissioni che corrispondono alle tecnologie adottate.

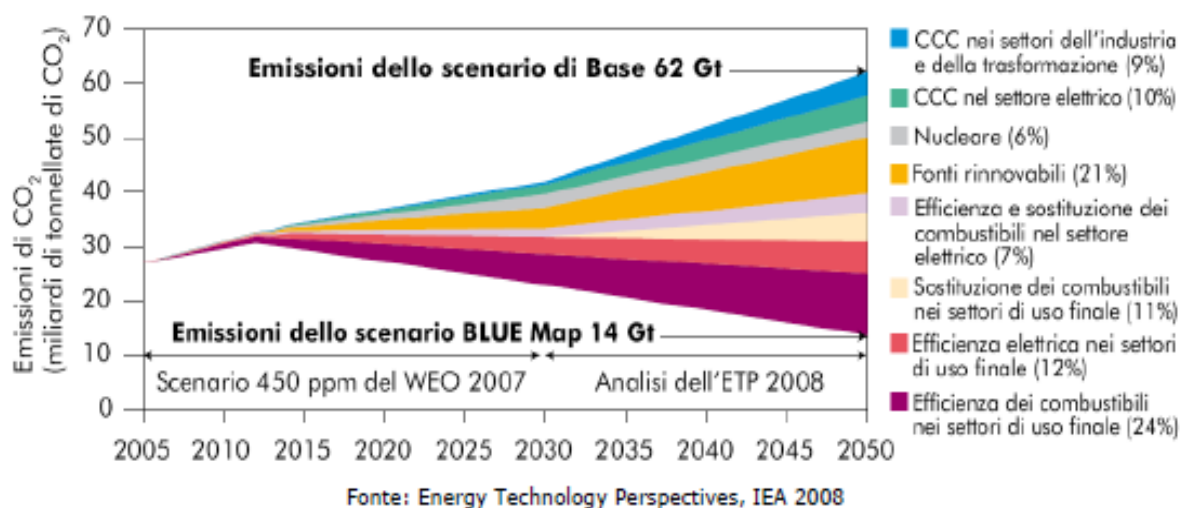


Figura 8 Emissioni di CO₂ secondo lo scenario di base e gli scenari di accelerazione tecnologica

La figura 9, in cui sono sintetizzati i risultati dell'analisi dell'IEA, mostra come sia l'efficienza energetica, nelle diverse forme indicate, la voce che più incide nella riduzione delle emissioni (43%), seguita dalle rinnovabili (21%), dalla generazione con cattura e confinamento della CO₂ (19%, indicata come CCC in figura 11), dalla sostituzione di combustibili nei settori di uso finale (11%) e dal nucleare (6%).

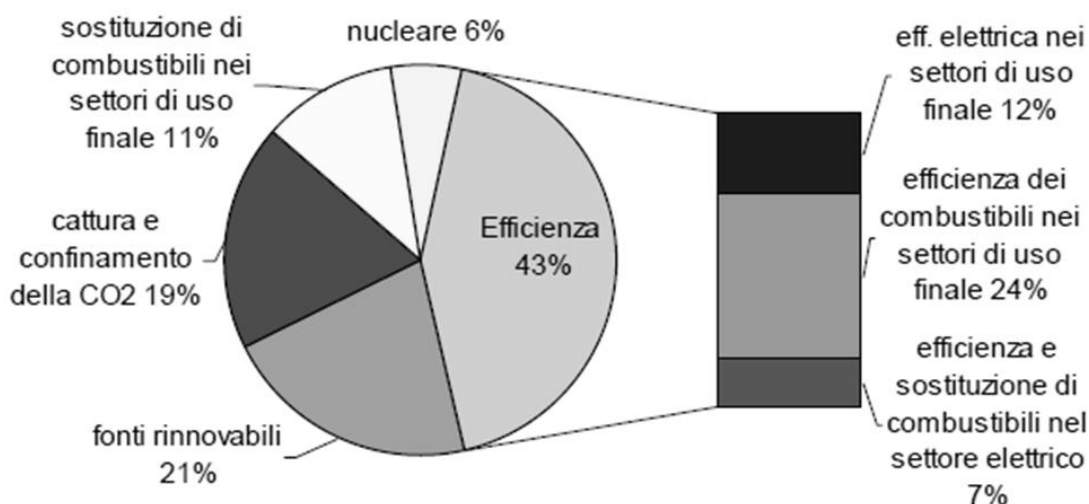
In conclusione si afferma nel rapporto che ricorrendo a tecnologie che già esistono, o che sono in una fase di sviluppo avanzato - scenario ACT Map -, le emissioni mondiali di CO₂ raggiungono il loro picco tra il 2020 e il 2030 per essere poi riportate ai livelli attuali entro il 2050. Più impegnativo è il compito di ridurre le emissioni di CO₂ al 2050 del 50% rispetto ai livelli attuali. Lo scenario BLUE, che fa riferimento a questo obiettivo, presuppone un netto cambio di direzione in tempi molto brevi. I costi non solo sono sostanzialmente più elevati, ma anche molto più incerti, perché si ipotizza la diffusione di tecnologie ancora in fase di sviluppo, il cui progresso e successo finale sono difficili da prevedere. Mentre gli scenari ACT richiedono un forte impegno, gli scenari BLUE richiedono una messa in atto urgente di politiche nuove e lungimiranti per il settore energetico, mai adottate sino ad ora.

Nello scenario di riferimento entro il 2050, la IEA stima un incremento del 70% della domanda di petrolio e del 130% delle emissioni di CO₂. Questo, naturalmente, in assenza di modificazioni delle politiche attualmente vigenti e senza particolari restrizioni per gli approvvigionamenti delle risorse.

Secondo quanto indicato dal Comitato Intergovernativo sul Cambiamento Climatico (IPCC), una crescita di tale portata delle emissioni di CO₂ potrebbe innalzare la media delle temperature mondiali di 6 °C, o forse più, con modificazioni rilevanti su tutti gli aspetti della

vita e conseguenze irreversibili sull'ambiente. Deriva da qui, secondo l'IEA, la necessità di una vera e propria rivoluzione nel modo di produrre e consumare l'energia a livello mondiale che implichi:

- netto miglioramento dell'efficienza energetica
- sviluppo delle tecnologie per le fonti rinnovabili
- energia nucleare
- cattura e confinamento della CO2
- sviluppo di un sistema di trasporti a zero emissioni di carbonio.



Fonte: Elaborazione ENEA da Energy Technology Perspectives, IEA 2008

Figura 9 Incidenza percentuale delle tecnologie nella riduzione dei gas serra al 2050

1.2 Linee guida per fronteggiare la sfida energetica

Sebbene quello dell'energia sia un problema globale, il contesto nel quale è stato sviluppato il mio percorso di ricerca è volto principalmente all'analisi della situazione nazionale. Quindi da qui in avanti la discussione sarà affrontata specificamente per l'Italia con eventuali riferimenti al contesto europeo (d'altra parte l'Italia è membro della comunità europea ed è interessata dalle politiche comunitarie).

Come già ampiamente detto, la sfida energetica pone problemi complessi che riguardano sia il tema dell'approvvigionamento, della dipendenza e della sicurezza da un lato, sia quello dei costi dell'energia dall'altro, che è centrale per la competitività del paese e per i bilanci delle famiglie. Un mix equilibrato delle fonti è una prima risposta a queste esigenze, anche tenendo conto della forte evoluzione tecnologica e della difficoltà di prevedere l'andamento dei prezzi dei combustibili, che suggeriscono di ridurre il rischio di una collocazione troppo concentrata su poche fonti di importazione, come succede oggi per la produzione di energia elettrica in Italia (figura 10).

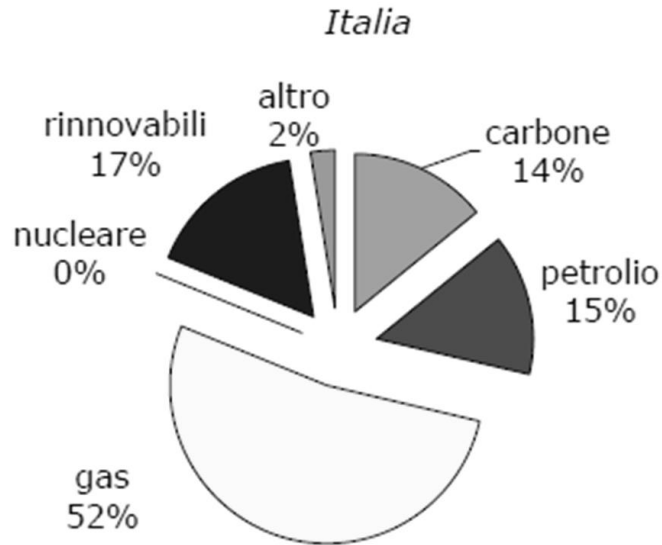


Figura 10 Mix delle fonti di produzione dell'energia elettrica

Nonostante l'evidente squilibrio il cambiamento tecnologico in atto rappresenta un'occasione da cogliere per inserirsi nei settori più promettenti, in cui l'UE vuole investire attraverso una politica della ricerca coerente con gli obiettivi indicati nel SET-Plan e con scelte che riguardano il sostegno agli interventi per l'efficienza energetica e alle tecnologie ad "emissione zero".

La recente scelta del Governo a favore del nucleare è, in quest'ottica, non solo un modo per realizzare una diversificazione più equilibrata tra le fonti, ma anche il rientro in una tecnologia anch'essa in evoluzione, di cui l'ENEA ha continuato negli anni a seguire le tracce per una responsabilità, attribuitagli per legge, di "presidio nucleare".

L'Agenzia Internazionale per l'Energia propone di dare priorità alle tecnologie che sono capaci o promettono di essere a "zero emissione":

- Rinnovabili
- Nucleare
- energia da carbone con cattura e stoccaggio della CO₂

Quest'approccio ha l'evidente implicazione di sottolineare l'esigenza di investimento contestuale in queste tecnologie piuttosto che della contrapposizione fra di esse. In tutte le proiezioni sull'andamento dei consumi energetici, l'aspetto dominante è comunque assunto dagli interventi in materia di efficienza energetica, realizzati con adeguato sviluppo delle nuove tecnologie.

1.2.1 L'efficienza energetica

L'efficienza è ritenuta da tutti la base di una rivoluzione del settore energetico su vasta scala. Il concetto di rivoluzione/evoluzione energetica è basato proprio sul ruolo di risorsa energetica - virtuale ma efficace - che l'efficienza può giocare negli usi finali, dell'elettricità come degli usi di calore e nei trasporti. Un aumento significativo dell'efficienza con cui usiamo energia, può consentire infatti di veder crescere in modo rilevante il contributo delle fonti rinnovabili al fabbisogno globale di energia.

Con la presentazione del Piano d'Azione per l'Efficienza Energetica la Commissione Europea ha compiuto un passo importante verso la risoluzione di problematiche energetiche, indicando una serie di provvedimenti prioritari che comprendono un'ampia rosa di iniziative finalizzate all'efficienza energetica e all'efficacia economica. Sulla base degli scenari disponibili, la riduzione di una percentuale pari al 20% dei consumi finali corrisponderebbe ad un risparmio di circa 30 Mtep, ovvero pari agli incrementi dei consumi previsti al 2030. Il piano mette in luce l'importanza di applicare norme minime di rendimento energetico ad un ampio ventaglio di apparecchiature e prodotti (dagli elettrodomestici come i frigoriferi e i condizionatori fino alle pompe e ai ventilatori industriali), per gli edifici e per i servizi energetici. Insieme alle classi di efficienza e ai sistemi di etichettatura, l'introduzione di norme minime di rendimento energetico rappresenta uno strumento importante per eliminare dal mercato i prodotti che consumano troppo, per informare i consumatori sui prodotti più efficienti e per trasformare il mercato rendendolo più efficiente sotto il profilo energetico.

Saranno elaborati requisiti minimi di rendimento anche per gli edifici nuovi e ristrutturati e verranno incentivati gli edifici a bassissimo consumo di energia (la cosiddetta "casa passiva"). La Commissione ritiene che i più consistenti risparmi di energia possano essere realizzati nei seguenti settori: gli edifici residenziali e commerciali (terziario), con un potenziale di riduzione stimato rispettivamente al 27% e al 30%, l'industria manifatturiera, con possibilità di risparmio di circa il 25%, e il settore dei trasporti, con una riduzione del consumo stimata al 26% (tabella 1).

Settore	Consumo energetico 2005 (Mtep)	Consumo energetico 2020 (Business as usual) (Mtep)	Potenziale di risparmio 2020 (Mtep)	Potenziale di risparmio 2020 (%)
Residenziale	280	338	91	27
Edifici commerciali	157	211	63	30
Trasporti	332	405	105	26
Industria manifatturiera	297	382	95	25

Tabella 1 Risparmi potenziali negli usi finali nei Paesi UE

In tal senso la Direttiva 2006/32/CE fissa "gli obiettivi indicativi, i meccanismi, gli incentivi e il quadro istituzionale, finanziario e giuridico, necessari ad eliminare le barriere e le imperfezioni esistenti sul mercato che ostacolano un efficiente uso finale dell'energia". In particolare, in essa si stabilisce che gli Stati membri adottano e mirano a conseguire un obiettivo nazionale vincolante indicativo globale di risparmio energetico, pari al 9% per il nono anno di applicazione, tramite servizi energetici e altre misure di miglioramento dell'efficienza energetica.

Parimenti la situazione nazionale rispecchia quella europea, come rappresentato dalla struttura dei consumi di energia per fonte e nei diversi settori finali riportata in tabella 2.

Il Piano d'azione dell'Efficienza Energetica Italiano, presentato a settembre 2007, descrive gli orientamenti che il Governo ha già intrapreso ed intende proseguire per centrare l'obiettivo previsto dalla direttiva: 9,6% di risparmio energetico entro il 2016 (circa 11 Mtep). Le misure proposte agiscono sulle principali tecnologie disponibili per implementare un intervento efficace e lungimirante sull'efficienza energetica negli usi finali, creare una sinergia tra la necessità di ridurre la dipendenza energetica, aumentare la sicurezza degli approvvigionamenti e ridurre le

emissioni di gas serra con effetti sulla competitività e innovazione tecnologica del sistema produttivo e la creazione di nuova occupazione.

Per il raggiungimento di tale obiettivo sono stati messi in azione nuovi strumenti, indicati nel piano d'azione stesso, quali la legge finanziaria 2008 (che estende provvedimenti già emanati nel 2007), il progetto efficienza industria 2015, la creazione di una Agenzia Nazionale per l'Efficienza Energetica, compito affidato all'ENEA.

	Consumi (Mtep)	Petrolio (%)	Gas (%)	Carbone (%)	Elettricità (%)
Trasporti	44.650	97%	1%	-	2%
Industria	41.020	19%	40%	12%	29%
Residenziale e Terziario	43.410	11%	55%	4%	30%
Totale	144.100	48%	29%	5%	18%

Tabella 2 Consumi finali per settore e per fonte (2007)

Occorre inoltre citare le campagne di formazione e informazione orientate a tutte le categorie degli utenti finali (comprendenti vari settori: residenziale, terziario, industria), che insieme al ben noto meccanismo dei certificati bianchi costituiscono un adeguato supporto normativo in grado di sostenere ed orientare l'innovazione di un sistema energetico come quello del sistema Italia. L'insieme delle azioni predette, infatti, punta ad un modello di sviluppo in cui possano articolarsi in modo armonico sia i fattori connessi alla necessità di una immediata riduzione dei consumi, che alle necessità di preparare un cambiamento tecnologico-industriale capace di dare impulso all'occupazione e far aumentare le esportazioni di nuove tecnologie efficienti sotto il profilo energetico.

Appare necessario sottolineare come gli scenari energetici elaborati da ENEA per l'Italia mostrano come soprattutto nel breve-medio periodo (fino al 2020) la possibilità di riduzioni consistenti dei consumi di energia, e più ancora delle emissioni di CO₂, sia legata in primo luogo ad un uso massiccio di tecnologie più efficienti, il che richiede evidentemente investimenti per la diffusione e lo sviluppo di tecnologie innovative. Investimenti che necessariamente devono interessare nella sua interezza il mercato energetico sia per quanto riguarda la domanda che l'offerta. Tuttavia, a meno di interventi redistributivi, la parte preponderante dei costi del cambiamento del sistema, come anche la responsabilità delle decisioni di investimento, ricade sugli utenti finali, dunque su un numero enorme di soggetti quali le famiglie e le imprese di piccole dimensioni che devono in concreto effettuare il cambiamento tecnologico mediante l'acquisto delle nuove tecnologie più efficienti. In altre parole, contano i comportamenti ed è perciò importante un'opera di diffusione di conoscenze necessarie.

È altresì bene ricordare come una tale accelerazione tecnologica possa determinare, qualora siano poste in essere delle dinamiche virtuose, quella redistribuzione economica che può favorire la circolazione di denaro con un conseguente stimolo verso i produttori di tecnologie ed incentivo per i consumatori. È presumibile come ciò possa produrre effetti positivi sul sistema economico nazionale. A condizione ovviamente che quest'ultimo sia in grado di

attivare un'offerta in grado di corrispondere a questo aumento della domanda, sviluppando ad esempio nuove filiere industriali, con conseguenze significative in termini di occupazione e di crescita complessiva del Paese.

1.2.2 Il ruolo del nucleare

Come già mostrato sopra, in Italia, in seguito al referendum abrogativo del 1987, non vi sono impianti di produzione energetica basati sulla tecnologia nucleare. Tuttavia in virtù della crisi energetica, economica ad ambientale internazionale, ha ridestato l'interesse nel nostro Paese, per ragioni di sicurezza ed approvvigionamento energetico, verso questa tecnologia.

Sono oggi in esercizio nel mondo 439 reattori nucleari di potenza, per una potenza installata di 372 GWe, che coprono circa il 16% della produzione mondiale di energia elettrica mentre, per quanto riguarda il futuro prossimo venturo, si assiste ad una ripresa di interesse per l'energia nucleare. La maggioranza del parco mondiale attuale è costituito da reattori della cosiddetta II Generazione, corrispondente alla tecnologia nucleare sviluppata negli anni 60-80. La III Generazione, sviluppata negli anni 90, rappresenta lo stato dell'arte attuale, ovvero i reattori disponibili oggi sul mercato. La differenza più rilevante degli impianti nucleari di III Generazione rispetto a quelli di II consiste nell'adozione di sistemi di sicurezza passiva ossia che non richiedono il controllo attivo mediante componenti e/o meccanismi attuati elettricamente oppure grazie all'intervento dell'operatore, per la gestione di incidenti in caso di malfunzionamenti del sistema, ma fanno affidamento sulle leggi della fisica come la gravità, la convezione naturale o la resistenza alle alte temperature. Già da qualche anno si sta lavorando alla progettazione dei reattori della cosiddetta IV generazione. Essi dovrebbero garantire maggior sicurezza e una minore produzione di scorie, oltre ad una maggiore efficienza del ciclo e quindi ad una sostanziale riduzione dei costi. Ma stando alle previsioni attuali e i risultati delle centrali sperimentali che sono in costruzione ora nel mondo (Finlandia), questa tecnologia non potrà essere considerata affidabile prima del 2030/2040, almeno.

Le motivazioni che stanno alla base del rinnovato forte interesse per l'opzione elettronucleare, possono essere ricondotte essenzialmente:

- alla sua sostanziale indipendenza dal costo della materia prima. In presenza di un costo del petrolio e del gas particolarmente elevati, l'investimento nel nucleare ha il vantaggio di un costo del combustibile pari a circa il 5%, anche se è assai impegnativo l'investimento sull'impianto;
- alla necessità di garantire una produzione elettrica di base "carbon free". Ciò è tanto più importante quando si considera che c'è una parte del consumo di petrolio che è sostanzialmente incompressibile ed è quella generata dal settore dei trasporti.

Il processo della fissione nucleare implica un'enorme concentrazione di energia potenziale. Tale concentrazione esige l'impiego di tecnologie complesse e affidabili in quanto sistema che portino la sicurezza al livello necessario. È per questo che l'opzione elettronucleare comporta l'attivazione di un "sistema" triangolare fra PA, imprese e istituzioni scientifiche che, integrato a livello internazionale, permetta la necessaria qualificazione delle tecnologie, la presenza di operatori adeguati e corrette politiche regolatorie.

Il costo del nucleare ha una composizione legata a numerosi fattori che possono essere ricondotti a costo del combustibile, esercizio impianti, decommissioning e smaltimento scorie. I costi possono essere ripartiti secondo le proporzioni di figura 11.

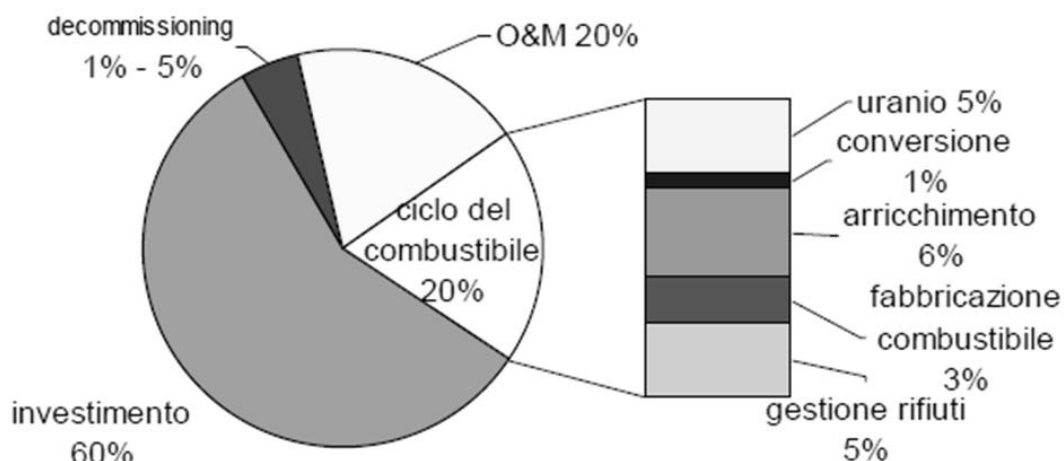


Figura 11 Composizione dei costi della filiera nucleare

Il costo per kWh è fortemente influenzato dal numero delle centrali realizzate. Tanto è maggiore la numerosità delle centrali tanto più si distribuiscono i costi di sistema (sicurezza, controlli, gestione delle scorie). I tempi di recupero dell'investimento hanno grande rilievo, perché è rilevante l'impegno di spesa per la realizzazione dell'impianto e la sua vita utile. La lunghezza dell'orizzonte temporale di riferimento è un elemento di rischio per l'investitore che per avere certezza dei suoi ricavi prospettici, tende a stabilire in qualche caso convinzioni tariffarie ad "hoc". La durata della vita degli impianti nucleari esistenti tende peraltro ad allungarsi fino a raggiungere 50 o addirittura 60 anni, per realizzare il massimo beneficio dell'investimento fatto a suo tempo. Nei paesi che hanno già fatto la scelta nucleare la possibilità di "allungare" la vita delle centrali esistenti tende in alcuni casi a prevalere in quanto più conveniente rispetto all'investimento in nuove centrali.

Il rientro del nostro Paese nel nucleare rappresenta non solo un modo per riequilibrare il mix di fonti oggi dominate nella produzione di energia elettrica dal gas ma anche il reingresso in una tecnologia di grande complessità e con importanti ricadute industriali. Non va trascurato l'effetto "qualitativo" che l'impegno tecnologico legato alla esigenza di sicurezza del nucleare impone a tutte le attività produttive e di servizio che gli sono connesse. La gestione della complessità che è imposta dal nucleare è poi uno stimolo per l'Amministrazione Pubblica che si dovrà confrontare con le esigenze di affidabilità delle procedure adottate per la sua gestione. Non va dimenticato inoltre l'effetto di questa scelta di qualità nella capacità di internazionalizzazione delle nostre imprese. Ciò è tanto più vero se si guarda all'orizzonte temporale di medio periodo, legato necessariamente all'evoluzione delle tecnologie nucleari future.

1.2.3 Tecnologie ad emissioni "zero"

Il carbone è la fonte fossile che mostra i tassi di incremento più elevati negli ultimi anni (figura 12) e i dati statistici evidenziano come la produzione riesca rapidamente ad adeguarsi all'incremento della domanda. La crescita della domanda di carbone avviene in maniera preponderante in Asia e appare determinata dallo sviluppo del settore termoelettrico in Cina ed India (entrambi forti produttori di carbone). L'utilizzo prevalente del carbone è legato alla generazione d'energia elettrica.

Si noti come anche in Giappone i consumi di carbone sono cresciuti negli ultimi anni in virtù della necessità di una maggiore diversificazione delle fonti d'approvvigionamento e della ricerca di fonti energetiche meno costose in una fase di prezzi energetici crescenti, nonostante il Giappone sia un Paese molto attento ai problemi ambientali.

D'altra parte, l'esistenza di imponenti riserve di giacimenti in molte aree del mondo geopoliticamente sicure e l'assenza per più di 100 anni di preoccupazioni legate all'esaurimento di questa risorsa, come evidenziato in tabella 3, fanno sì che l'elemento sicurezza dell'approvvigionamento e quello della scarsità incidano ben poco sul prezzo.

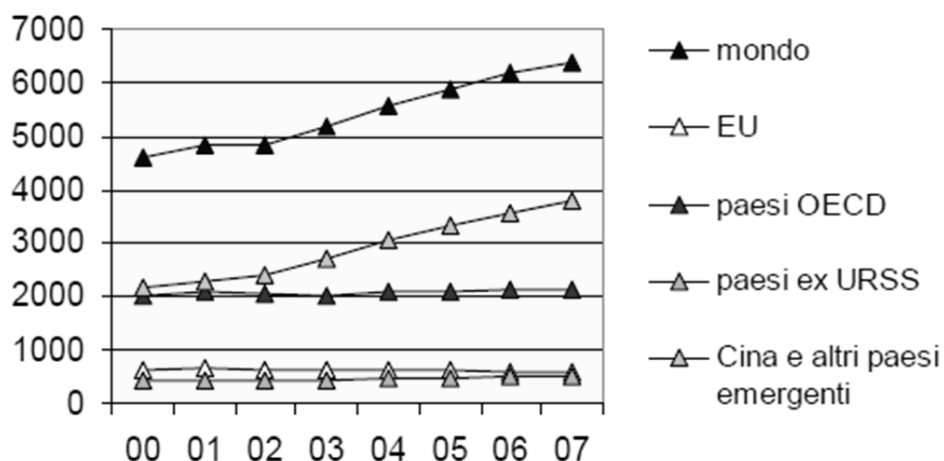


Figura 12 Andamento della produzione di carbone in alcuni Paesi (2000-2007)

Questi fattori, in una fase in cui petrolio e gas seguono traiettorie di prezzo ascendenti, hanno reso di nuovo interessante questo combustibile, il cui uso, come si è visto, ha ripreso a crescere anche nei paesi sviluppati.

Aree geografiche	Mt	% sul totale	R/P* (n° anni)
Unione Europea	29570	3,5%	50
paesi OECD	356910	42,1%	168
paesi ex URSS	225995	26,7%	463
Cina e altri paesi emergenti	264583	31,2%	70
Mondo	847488	100,0%	133

Tabella 3 Riserve dei carbone nel mondo e in alcune aree geografiche: quantità (Mt), percentuali per area, durata

Questi elementi mostrano come la riduzione delle emissioni di gas di serra debba passare attraverso lo sviluppo di tecnologie pulite per l'utilizzo del carbone e come tale sviluppo debba essere un'occasione di collaborazione scientifica e di trasferimento tecnologico necessaria all'adozione delle tecnologie pulite nei grandi paesi asiatici.

Le tecnologie della cattura e confinamento della CO₂ (CCS) rappresentano una preziosa opportunità per un impiego dei combustibili fossili compatibile con l'esigenza di limitare l'emissione di gas serra a livelli sostenibili per l'ambiente. Molte delle tecnologie CCS sono già disponibili (ad esempio la gassificazione del carbone, la produzione di ossigeno, i reattori di shift, i processi di estrazione di gas acidi da miscele di gas) ma hanno bisogno di essere integrate opportunamente con l'impiantistica di produzione energetica per minimizzare le perdite energetiche ed i costi aggiuntivi ad esse associate. In quest'ottica, le attività di R&SD sui sistemi CCS giocheranno un ruolo di primaria importanza ai fini del raggiungimento di tali ambiziosi obiettivi, strada obbligata per il futuro sviluppo e l'applicazione commerciale di tali tecnologie.

Tecnologie di cattura della CO₂

Nei processi di generazione elettrica, la CO₂ può essere separata dagli altri effluenti sia con metodi di cattura pre-combustione, grazie ad un trattamento sul combustibile di origine fossile a monte della combustione, che con metodi di cattura post-combustione che si applicano appunto a valle della combustione, sui fumi prodotti. Esiste poi una terza possibilità, che è rappresentata dall'utilizzo di sistemi a oxy-combustione, che impiegano come comburente ossigeno invece che aria, e che da luogo ad un flusso di CO₂ molto concentrata. Le tecnologie proposte sono attualmente a differenti stadi di maturazione. L'UE intende realizzare a breve dodici impianti sperimentali nei paesi che presenteranno le proposte più valide ed interessanti.

Tecnologie di stoccaggio della CO₂

Il destino relativo alla CO₂ catturata prevede diverse possibilità. Il confinamento geologico può essere attuato in formazioni saline profonde, in pozzi esauriti di petrolio-gas, in giacimenti di carbone profondi o in campi geotermici non sfruttabili. Per quanto riguarda la situazione italiana, si stima per il nostro Paese una capacità di sequestrazione geologica della CO₂ negli acquiferi profondi, ivi incluse le aree geotermiche, di 440 Mt. Per quanto riguarda i giacimenti di olio e gas onshore il valore stimato è di 1.790 Mt di CO₂. Pertanto, complessivamente, in Italia si potrebbero sequestrare 2.230 M/t di CO₂.

Le principali barriere all'applicazione delle tecniche di stoccaggio geologico sono individuabili nella insufficiente conoscenza della geologia delle aree d'interesse, per quanto riguarda in particolare gli aspetti mineralogici, idrologici e geochimici e nella limitatezza delle conoscenze in merito al comportamento della CO₂ immagazzinata, sia ai fini degli effetti globali (quali rischio di fughe che potrebbero in parte vanificare lo sforzo di cattura e confinamento) che locali dati da effetti dannosi sull'ambiente e sulla popolazione in caso di rilascio rapido di quantità significative. Altri ostacoli che attualmente ne limitano l'uso sono quelli della inadeguatezza della normativa relativa alla gestione dei rifiuti, all'uso del sottosuolo e del mare e all'accettabilità sociale, in relazione in particolare ai rischi di effetti locali dannosi. I molti progetti, avviati in varie parti del mondo, mirano pertanto da un lato a validare i metodi per la scelta dei siti e la stima dei rischi in una pluralità di contesti geologici anche molto diversificati e dall'altro a ottimizzare le tecniche di controllo dalla superficie dell'evoluzione negli strati geologici profondi della CO₂ iniettata. Il fine ultimo è quello di sviluppare "best practice" e "standard" per tutte le fasi operative connesse, che servano da base nella definizione delle procedure autorizzative e delle responsabilità correlate alla scelta dei siti, all'esecuzione del confinamento, al controllo a breve e lungo termine, all'abbandono dei siti di confinamento.

1.2.4 Effetti dell'accelerazione tecnologica nel medio e lungo periodo

Gli obiettivi della Comunità Europea di riduzione dei consumi, di aumento delle energie rinnovabili e di riduzione dei gas serra sono certamente difficili da raggiungere. Non c'è dubbio però che senza un impegno in R&S decisamente più elevato del passato che dia luogo ad un percorso d'innovazione e di cambiamento accelerato delle tecnologie energetico-ambientali, essi risultano punti di arrivo quasi inavvicinabili.

Molti Paesi europei hanno preso sul serio questa sfida e gli altri, compreso il nostro, rischiano di esser trascinati in un processo di cui pagheranno i costi senza averne i benefici. Questi ultimi non saranno soltanto la CO₂ evitata, ma anche il possesso di tecnologie che aumenteranno la competitività di paesi leader come Germania e Gran Bretagna che da tempo si sono collocati in questa prospettiva. Chi non avrà investito in R&S e nelle nuove tecnologie si troverà, con ogni probabilità, ad incentivare, come già succede oggi, le energie rinnovabili e allo stesso tempo ad importare la relativa tecnologia dai paesi leader, oltre a pagare il conto del mancato rispetto degli impegni assunti a livello internazionale per la riduzione di anidride carbonica.

Nella convinzione, invece, della virtuosità del percorso indicato dalla Commissione Europea e delle potenzialità d'innovazione indicate in maniera esplicita con il riferimento ad una "nuova rivoluzione industriale" che ne potrebbe scaturire, si è voluto evitare di procedere secondo ipotesi di principio non sostenute da dati quantitativi. In altre parole sono stati definiti diversi scenari riferiti al caso specifico del nostro Paese. Le ipotesi adottate per l'elaborazione delle simulazioni, sono quelle previste negli scenari IEA 2008, sia per quel che riguarda l'evoluzione del prezzo del petrolio che per quel che riguarda l'evoluzione e il costo delle diverse tecnologie energetiche. L'evoluzione dei consumi di energia per il nostro Paese è stimata tenendo conto delle proiezioni demografiche elaborate dall'ISTAT. Per il trend di crescita del PIL, oltre ai dati del recente DPEF, sono stati adottati trend di crescita in linea con gli andamenti di lungo periodo della nostra economia.

Gli scenari considerati, in analogia con quelli IEA, sono quello ACT che prevede un'accelerazione tecnologica limitata alle tecnologie esistenti o già in fase di sviluppo avanzato. Lo scenario BLUE, che prevede lo sviluppo di nuove tecnologie e una riduzione del 50% delle emissioni. Infine quello ACT+ che è la combinazione dei due precedenti scenari, il primo per il medio e il secondo per il lungo periodo. In figura 13 sono rappresentati i contributi dell'accelerazione tecnologica dello scenario ACT+, rispetto allo scenario di riferimento, nel medio e lungo periodo.

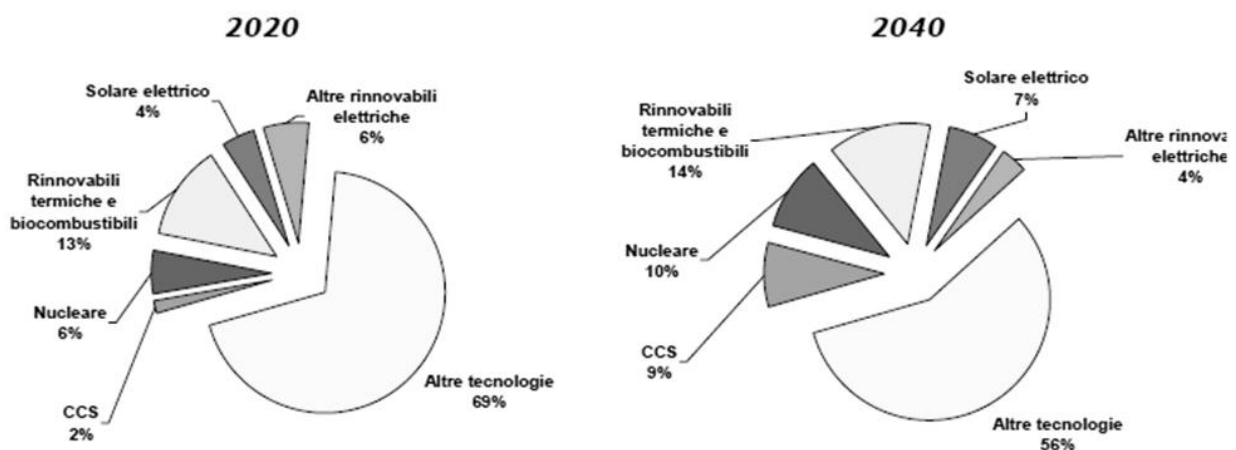


Figura 13 Contributo di nucleare, CCS e rinnovabili alla riduzione delle emissioni negli scenari di accelerazione tecnologica

Le analisi di scenario evidenziano i seguenti risultati principali:

- Pur adottando la scelta IEA di attribuire rilievo all'impiego del carbone a ragione sia della dimensione delle riserve accertate che per la loro accessibilità in molte parti del mondo, i tempi necessari per la disponibilità della tecnologia "zero emission" consentono di prefigurare la relativa produzione di energia solo a partire dal 2025, con una quota sul totale che arriva al 9% nel 2040.
- Il nucleare contribuisce senz'altro a modificare il mix energetico e dunque a rispondere al tema dell'approvvigionamento. Peraltro, pur partendo dalle indicazioni del Governo rispetto a tempi ed impegno sul nucleare e proiettando in avanti lo stesso impegno, la quota del nucleare con tecnologia di terza generazione (considerato che l'operatività della quarta è attesa non prima di 25-35 anni) arriva a contribuire alla riduzione complessiva delle emissioni per il 6% nel 2020 e il 10% nel 2040.
- Risulta confermata l'importanza decisiva dell'investimento nelle tecnologie per l'efficienza energetica e, in particolare, in quelle per l'efficienza negli usi finali dell'energia, perché da tale investimento dipende, secondo la simulazione, il 45% della riduzione delle emissioni. Gli effetti sono assai differenziati per i diversi settori. Il residenziale e i servizi hanno i migliori risultati (14 e 11%, rispettivamente) seguiti dall'industria al 9%. È importante rilevare che, secondo la simulazione, gli investimenti in tecnologie per l'efficienza negli usi finali dell'energia determinano già nel 2020 una riduzione nella bolletta energetica dell'ordine di 5 miliardi di euro per anno.
- Il settore dei trasporti incide in modo significativo sui consumi energetici (30% circa) e sulle relative emissioni di gas serra e risponde assai poco (6%) agli interventi tecnologici per ridurre consumi ed emissioni sui motori a combustione esistenti. D'altra parte, secondo le indicazioni che provengono dalla Commissione Europea, l'introduzione di motori alimentati a celle a combustibile e idrogeno non sembrano produrre effetti significativi prima del 2030. C'è da chiedersi quale potrebbe essere il contributo di una massiccia introduzione di auto "ibride" o addirittura elettriche, per una traiettoria virtuosa del sistema dei trasporti che rimane oggi un problema centrale per qualsiasi paese. Si tratta di consumi di petrolio che risultano sostanzialmente incompressibili e in crescita costante nonché, per il nostro Paese, ragione importante di dipendenza dall'estero.
- Solare, biomasse, biocombustibili e le altre rinnovabili raggiungono nelle simulazioni gli obiettivi assegnati dall'Europa. Gli investimenti sul solare fotovoltaico e termodinamico, già ingenti al 2020 (circa 15 miliardi di euro), superano i 20 miliardi di euro in ognuno dei due decenni successivi.

Capitolo 2

Dall'epoca della Rivoluzione Industriale ai giorni d'oggi, le attività umane, in continua crescita, e l'uso su grande scala dei combustibili fossili, per esigenze energetiche delle attività industriali, hanno avuto un impatto sempre più influente sull'ambiente.

La domanda energetica ha subito negli anni un aumento non solo in relazione allo sviluppo industriale, ma anche in seguito all'incremento della popolazione mondiale. Il fabbisogno energetico procapite, legato soprattutto alla mobilità, è aumentato notevolmente nei Paesi ricchi e in quelli in via di sviluppo: basti pensare, come esempio, che l'Italia è il primo Paese dell'UE per numero di automobili procapite (circa 60 ogni 100 abitanti nel 2007) e cifre significative sul numero di veicoli in circolazione sono riportate nella tabella che segue.

Benzina	22.913.649
Diesel	11.007.108
GPL	992.132
Metano	375.351
Altre	9.042
Totale	35.297.282

Tabella 4 Auto circolanti in Italia nel 2007

Il settore dei trasporti assorbe circa il 18% del consumo mondiale di energia e impiega per la maggior parte combustibili derivanti dal petrolio. Per circa il 95% il settore dei trasporti dipende esclusivamente da prodotti petroliferi.

I principali inquinanti prodotti dal trasporto veicolare sono:

- Il monossido di carbonio (CO), prodotto nella combustione incompleta
- Gli ossidi di azoto (NOx), che oltre a concorrere alla formazione di piogge acide e ad essere nocivi per l'apparato respiratorio, contribuiscono allo smog fotochimico, generando ozono
- Gli idrocarburi incombusti (HC), cancerogeni e anch'essi responsabili dello smog, sono frutto della combustione incompleta
- Il particolato (PM) emesso esclusivamente dai veicoli Diesel e nocivo per l'apparato respiratorio e cardiovascolare
- Composti organici volatili (VOC), includono idrocarburi e composti contenenti ossigeno e cloro come clorofluorocarburi (CFC). Anch'essi sono prodotti nella combustione incompleta di idrocarburi
- L'anidride carbonica (CO₂), prodotta dall'ossidazione dei combustibili fossili e dalla deforestazione

Come evidenziato in figura 14, i motori a benzina e i motori Diesel emettono la maggior parte degli inquinanti e tenendo conto di questo grafico la soluzione migliore parrebbe essere quella di adottare veicoli che facciano uso per la propulsione di combustibili alternativi a quelli fossili, come elettricità o idrogeno. Tuttavia una tale affermazione necessita di un'adeguata valutazione riguardo i processi di produzione dei combustibili alternativi allo scopo di determinare quanto in effetti siano "puliti", quantificando l'emissione di inquinanti dovuta alla produzione degli stessi.

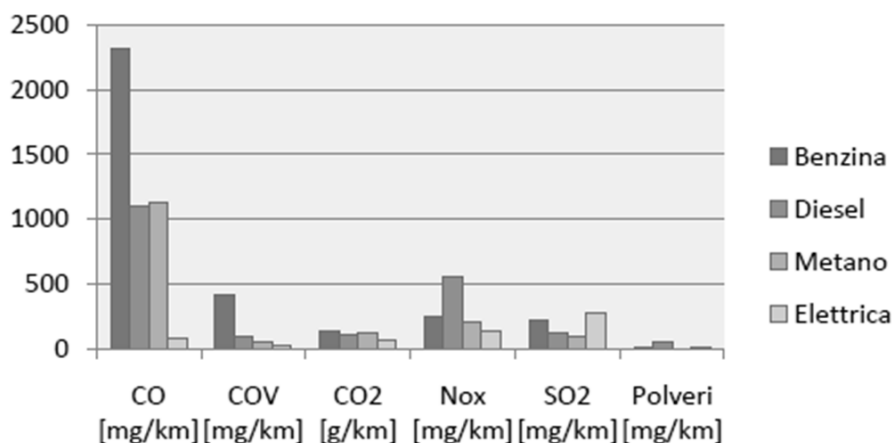


Figura 14 Emissioni totali in atmosfera (Cives, anno 2000)

Un altro genere di inquinamento, sempre provocato dal traffico su strada e riguardante maggiormente le aree urbane, è quello acustico: ad esso si associano non solo problemi legati all'apparato uditivo ma anche alla psiche, al sonno e alla concentrazione.

Le normative vigenti impongono delle soglie massime ammissibili di rumore pari a 65 dBA diurni e 55 dBA notturni; vi è, tuttavia, una percentuale della popolazione (circa il 20%) esposta quotidianamente a livelli di rumore caratteristici delle aree industriali e non dei centri abitati.

Il confronto, riportato in figura 15, tra le emissioni acustiche, rapportate alla soglia del dolore per diverse modalità, evidenzia, appunto, la facilità con cui nei grandi centri urbani, ad elevate attività umane e mobilità, si possono raggiungere valori di rumorosità al di fuori della soglia di accettabilità.

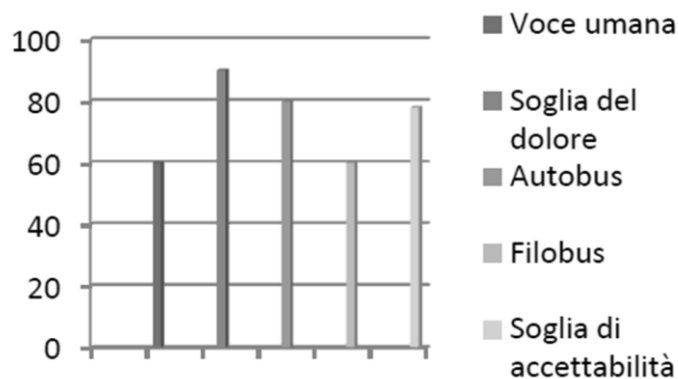


Figura 15 Confronto tra emissioni acustiche per diverse modalità

2.1 Le normative vigenti

La rilevanza dei problemi ambientali ha accelerato, e continua a farlo, l'impegno della collettività verso uno sviluppo sostenibile.

Il primo grande passo al livello globale è stato fatto nel 1997 con la nascita del Protocollo di Kyoto, un trattato cui hanno aderito la maggior parte dei Paesi industrializzati del mondo, impegnandosi a ridurre entro il 2012 le emissioni di biossido di carbonio e di gas serra (metano, ossido di azoto, idrofluorocarburi, perfluorocarburi e esafluoruro di zolfo) del 6,5% rispetto ai livelli rilevati nel 1990.

Il Protocollo propone e richiede agli Stati membri il rafforzamento o l'istituzione di politiche nazionali di riduzione delle emissioni e la cooperazione tra gli stessi per migliorare l'efficacia di tali politiche. L'accordo preso ha posto altresì l'accento sulla necessità di intervenire in maniera decisa sul settore dei trasporti [5] [6].

2.1.1 Normativa europea

La comunità Europea ha emanato una serie di direttive al fine di controllare la presenza di alcune sostanze nocive nell'atmosfera tra cui:

- 1) Direttiva 96/62/CE che stabilisce il contesto entro cui operare per la valutazione e la gestione della qualità dell'aria;
- 2) La Normativa 70/220/EEC nasce con lo scopo di regolare l'inquinamento veicolare e i suoi successivi emendamenti hanno portato alla stesura delle direttive EURO.

Le ormai famose direttive "EURO" hanno subito un'evoluzione negli anni, imponendo limiti sempre più restrittivi come è possibile notare analizzando la normativa EURO 5 la cui validità è stata fissata dal Parlamento Europeo per il 2009 e non più per il 2011, come invece prevedevano le case automobilistiche.

Si tratta di una direttiva molto restrittiva, che prevede un ulteriore taglio del 20% delle emissioni di NOx per i motori diesel e del 25% per quelli a benzina. Inoltre i motori diesel dovranno abbattere dell'80% l'emissione di polveri sottili, il che renderà obbligatorio l'applicazione di nuovi filtri antiparticolato più efficienti di quelli attuali. Un importante cambiamento in questa normativa rispetto l'EURO 4 consiste nell'introduzione dei limiti di particolato anche per i motori a benzina a iniezione diretta funzionanti a miscela magra.

Dal 2014, poi, entrerà in vigore lo standard Euro 6, che comporterà un ulteriore abbattimento delle emissioni di ossidi di azoto del 68% rispetto all'EURO 5.

Un altro significativo obiettivo della Comunità Europea relativo alla regolamentazione dei trasporti riguarda le quantità di CO₂. In effetti questo composto non è un inquinante, ma il naturale prodotto di sintesi di qualsiasi processo di combustione. Il limite fissato è quello di ridurre le emissioni fino a 120 g/km entro il 2012, proponendo non solo miglioramenti tecnologici da apportare al motore dei veicoli, ma anche promuovendo l'uso di biocarburanti. Al di là del quadro legislativo, risulta particolarmente importante l'azione singola degli Stati membri, i quali tramite la promozione di appalti pubblici ecologici, gli incentivi fiscali, le infrastrutture e la gestione del traffico (blocchi della circolazione, zone a traffico limitato, targhe alterne) possono indirizzarsi sempre più verso uno sviluppo sostenibile.

Veicoli benzina						
Normative	Anno	CO	HC+NO _x	POLVERI	HC	NO _x
EURO 1	1993	2,72	0,97	-	-	-
EURO 2	1997	2,2	0,5	-	-	-
EURO 3	2000	2,3	-	-	0,2	0,15
EURO 4	2005	1	-	-	0,1	0,08
EURO 5	2009	1	-	0.005	0,1	0,06

Tabella 5 Evoluzione dei limiti di emissione (g/km) per veicoli a benzina

Veicoli Diesel						
Normative	Anno	CO	HC+NO _x	POLVERI	HC	NO _x
EURO 1	1993	2,72	0,97	0,14	-	-
EURO 2	1997	1	0,5	0,08	-	-
EURO 3	2000	0,64	-	0,05	-	0,50
EURO 4	2005	0,5	-	0,025	-	0,25
EURO 5	2009	0,5	0.23	0,005	-	0,18

Tabella 6 Evoluzione dei limiti di emissione (g/km) per veicoli Diesel

2.1.2 Normativa americana

Gli Usa sono in pole position verso l'eliminazione della dipendenza dal petrolio dell'autotrazione. Per valutare l'ecologicità dei comuni veicoli, si fa riferimento alle leggi emanate dalla California, del Massachussets e dello stato di New York (1998).

Per venire incontro ai gravi problemi di inquinamento, la California ha adottato la normativa più restrittiva di tutti gli Stati Uniti. Recenti ricerche, hanno stabilito che più della metà dello smog prodotto nella California deriva da veicoli diesel e a benzina, e che l'intervento più urgente è quello di modificare il parco macchine in circolazione. Molti Stati stanno adottando le medesime leggi. Inizialmente è stata emanata una normativa, la LEV (Low Emission Vehicle) I, per venire incontro a queste problematiche, ma successivamente la stessa è stata modificata (LEV II). Entrambe le normative dividono il parco veicoli in categorie in base al loro peso, utilizzo e la loro presunta vita media (espressa in miglia percorsi).

La seconda normativa è entrata in vigore per il periodo 2004-2010 e prevedeva ulteriori restrizioni per le emissioni, in linea con gli accordi internazionali in materia di rispetto ambientale.

La classificazione sul mercato dei veicoli secondo il LEV II si configura come segue:

- Transitional low-emission vehicle (TLEV)
- Low-emission vehicle (LEV)
- Ultra-low emission vehicle (ULEV)
- Super ultra-low emission vehicle (SULEV)
- Zero-emission vehicle (ZEV)

2.1.3 Normativa giapponese e cinese

Il Giappone ha introdotto regolamentazioni anti inquinamento già negli anni '80, ma solo nel 1992 tali norme sono diventate molto restrittive. Attualmente la normativa Giapponese è la più severa per quanto riguarda le emissioni di polveri sottili ed NOx. Un estratto dalla normativa giapponese è riportato in tabella

Dati estrapolati dalla Normativa giapponese attuale			
CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)	PM (g/km)
0.63	0.024	0.014 (0.08 dal 2011)	0.013 (0.005 dal 2011)

Tabella 7 Dati estratti dalla normativa antinquinamento giapponese

Un piccolo cenno per la Cina, che attualmente rappresenta il più importante attore internazionale in materia di consumo e produzione energetica e di conseguenza è anche il maggior produttore di emissioni inquinanti in atmosfera. Questo quadro, impone un rapido e deciso intervento per la Cina in particolare (e forse a breve anche per l'India), sebbene i paesi in via di sviluppo per ovvie ragioni, godano di una minore limitazione ambientale da parte della comunità internazionale a garanzia di un equivalente sviluppo socio-economico rispetto ai Paesi occidentali ed al Giappone. In tale prospettiva, la Cina ha adottato la normativa europea ma con entrata in vigore ritardata rispetto al vecchio continente. Ad esempio, EURO 4, ha avuto inizio a Pechino solo nel gennaio 2008 e nel resto della Paese è previsto per luglio 2010.

2.2 Possibili soluzioni per un trasporto sostenibile

Esistono differenti approcci per un obiettivo così ambizioso, quello normativo-istituzionale e quello tecnologico, che in particolar modo nella prospettiva di breve e medio termine devono necessariamente convivere per essere efficaci e sperare di dar luogo a dei risultati sensibili e concreti. In prospettive più a lungo termine invece, appare necessario un profondo cambiamento che possa essere in grado di sostenere in maniera definitiva gli obiettivi di salvaguardia ambientale e tutela della salute dei cittadini, che si basi su un deciso e rivoluzionario sviluppo tecnologico e produttivo.

2.2.1 Limitazione della circolazione di veicoli

Questo provvedimento è il più semplice, punta a chiudere intere aree urbane alla circolazione per abbassare i livelli delle sostanze inquinanti all'interno dei valori rappresentati in tabella.

Questa soluzione non è sicuramente la migliore, perché limitata a zone cittadine e per di breve durata, per non creare disagi ai cittadini.

2.2.2 Utilizzo di combustibili alternativi

Nell'immediato è la soluzione di più facile attuazione. Combustibili come il metano ed il GPL esistono da anni, in particolar modo quest'ultimo che attualmente vede un fortissimo interesse, ma finora non sono molto presi in considerazione per la scarsa rete di distribuzione e per un certo livello di pericolosità dei sistemi di accumulo del combustibile rispetto alle tradizionali vetture a benzina o diesel. Solo ultimamente le case automobilistiche stanno spingendo sul loro utilizzo e propongono soluzioni vantaggiose, anche dal punto di vista dell'economicità dei prezzi di questi carburanti. Questi combustibili, essendo gas liquefatti ad alta pressione, hanno la caratteristica di avere una ottima miscelazione con l'aria comburente dovuto in particolare alle seguenti caratteristiche: [7]

- Ottima distribuzione della miscela aria/combustibile
- Ottimo controllo del rapporto aria/combustibile nei transitori termici (ad esempio a motore freddo) e dinamici (ad esempio nelle fasi di accelerazione del veicolo) e per l'assenza del film di combustibile liquido nei condotti di aspirazione;
- il rapporto aria/combustibile stechiometrico può essere mantenuto costante, in modo rigoroso, in tutto il campo di funzionamento del motore.

In buona sostanza, tutto questo significa un'ottima combustione, che consente di raggiungere ottime prestazioni, bassi consumi, ridotte emissioni ed assenza, quasi completa di residui carboniosi all'interno del motore, ancorché ridotta rumorosità complessiva del motore.

Per la sua struttura molecolare, il metano presenta un'alta resistenza alla detonazione (superiore a 120 ottani) che permette di utilizzare elevati rapporti di compressione (oltre 12 a 1) senza bisogno di additivi chimici come per le benzine, con il risultato di aumentare il rendimento energetico con una notevole riduzione dei consumi.

Nonostante l'elevato numero di vantaggi offerto dall'uso dei gas, non vanno sottovalutati alcuni svantaggi legati al loro utilizzo: per prima cosa, anche se la combustione di produce particolato in quantità molto ridotte, le emissioni principali sono costituite da ossidi di azoto. Per quanto attiene a questi inquinanti, risultano documentate e descritte dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), alterazioni morfologiche dei bronchioli e degli alveoli polmonari in base alla durata dell'esposizione e della concentrazione dell'inquinante. Nel campo epidemiologico, ad esempio, (sempre secondo l'OMS) si attribuisce agli ossidi di azoto una percentuale di bronchiti del 16% del totale registrabile in aree fortemente inquinate ed industrializzate [8]. Per questo, l'OMS, sta proponendo di rivedere fortemente le soglie da non superare sia in base alla durata dell'emissione, sia in base all'effetto addizionale e di miscela con le altre fonti di emissioni presenti in una determinata area.

Altro svantaggio legato al metano e al gpl è il metodo con cui questo gas deve essere trasportato dalle zone di estrazione fino a noi, che comporta un complesso sistema di scambi internazionali, trasformazioni e distribuzione capillare.

Non è da sottovalutare anche il limite del serbatoio per lo stoccaggio a bordo del veicolo. In effetti il problema è più significativo per il metano che necessita per essere liquefatto di pressioni molto elevate, dell'ordine di qualche centinaia di bar, il che richiede un serbatoio molto resistente e di conseguenza pesante e ingombrante.

Il biodiesel è un prodotto naturale rispondente alle norme UNI 10946 e UNI 10947, che può essere utilizzato come carburante per autotrazione o come combustibile per gli impianti di

riscaldamento [9]. Le proprietà che lo contraddistinguono, lo rendono una valida alternativa ai comuni combustibili e sono:

- Rinnovabilità: si ottiene, infatti, dalla spremitura di semi oleaginosi di colza, soia e girasole, e, da una reazione di transesterificazione che determina la sostituzione dei componenti alcolici (glicerolo) con alcool metilico (metanolo)
- Biodegradabilità: se disperso si dissolve in pochi giorni

L'uso del biodiesel in sostituzione del gasolio, quindi, determina molti vantaggi a livello ambientale, quali:

- Scarso contributo all'effetto serra, visto la poca produzione di anidride carbonica
- Vengono immesse in atmosfera, minori quantità di CO (-35 %) e HC (- 20%) rispetto a quelle prodotte dalla combustione del gasolio, grazie alla presenza di ossigeno
- Vengono del tutto abbattute le emissioni di biossido di zolfo, dal momento che il biodiesel risulta essere quasi completamente desolfurato
- Non contiene sostanze particolarmente dannose per la salute umana come, ad esempio, gli idrocarburi aromatici o gli idrocarburi policiclici aromatici contenuti negli altri combustibili
- Il più elevato numero di cetano migliora l'accendibilità che agevola le partenze a freddo

D'altro canto bisogna tener conto di alcuni svantaggi:

- La densità energetica è inferiore a quella del gasolio, quindi a parità di combustibile corrisponde una minore autonomia
- Presenta incompatibilità con numerose sostanze, quali: ottone, bronzo, rame, stagno e zinco che vanno sostituiti con alluminio ed acciaio, e può risultare corrosivo per le gomme utilizzate per i condotti di alimentazione, che devono essere rimpiazzate da polietilene o polipropilene fluorati.

Quest'ultima caratteristica implica che il biodiesel non è utilizzabile puro nei motori attuali, tanto che per ora è considerato tollerabile solo al 5% in peso. Allo stato dell'arte è largamente diffuso in Europa, che ne è il primo produttore al mondo, affermandosi nel campo dell'autotrazione, in Germania ed in Francia, mentre in Italia, il 95% della quantità prodotta viene impiegata nel funzionamento delle centrali termiche.

2.2.3 Evoluzione dei motori convenzionali

Per quanto riguarda i sistemi propulsivi tradizionali, la ricerca è orientata ad ottimizzare tutti i parametri che possono incidere su un miglioramento dell'efficienza e sulla riduzione delle emissioni inquinanti. Si possono distinguere due tipologie di intervento: interventi motoristici e post-trattamento.

È necessario fare una distinzione tra i motori ad accensione spontanea (Diesel) e quello ad accensione comandata (Otto). Nel primo caso possiamo catalogare i suddetti sistemi nel seguente modo [10]:

Interventi Motoristici

- Disegno Camera di combustione (un opportuno disegno della camera e della testa del pistone possono incrementare la turbolenza impressa alla carica, e quindi favorire in particolar modo la diminuzione del particolato emesso, e degli HC)
- Sistema di iniezione (controllando pressione d'iniezione, tempo, e dimensione della gocciolina di gasolio)

- Sistema elettronico di controllo (la centralina consente di avere un'ottima regolazione, nel rispetto sia delle emissioni, sia dei consumi e delle prestazioni, su tutto lo spettro di funzionamento del motore)
- Sistema EGR (Exhaust Gas Recirculation)
- Sistema di alimentazione dell'aria (un opportuno progetto dei condotti dell'aria e delle valvole di aspirazione imprime all'aria la giusta turbolenza per un miglior miscelamento con il combustibile iniettato)

Post – trattamento

- Catalizzatori ossidanti
- Dispositivi per l'abbattimento di NOx (NOx storing)
- Trappole per particolato [11]

I motori ad accensione comandata possono essere ottimizzati con analoghi sistemi:

Interventi Motoristici

- Carica omogenea ad accensione per compressione (Homogeneous Charge Compression Ignition – HCCI)
- Iniezione Diretta (Direct Injection – DI) [12]
- Sovralimentazione (Turbocharging)
- Rapporto di Compressione Variabile (Variable Compression Ratio – VCR)
- Attuazione Variabile delle Valvole (Variable Valve Actuation - VVA)
- Ricircolo dei Gas di Scarico (Exhaust Gas Recirculation - EGR)

Post – trattamento

- Convertitore catalitico trivalente [13]

2.2.4 Veicoli elettrici

I veicoli elettrici a batteria presentano caratteristiche tali da renderli interessanti per la riduzione dell'inquinamento atmosferico ed acustico nelle aree urbane [14]. Quelli oggi disponibili sul mercato sono classificabili in due categorie: quelli ottenuti dalla conversione dei veicoli a combustione interna e quelli progettati direttamente come elettrici. La conversione di veicoli convenzionali rappresenta la soluzione di più largo uso a causa della mancanza di reali motivazioni che spingano all'acquisto di un veicolo dotato di un impianto elettrico di serie. Infatti le prestazioni dei diversi tipi di veicoli elettrici in commercio costituiscono delle limitazioni ad una loro più ampia diffusione. Osservando la tabella 8, infatti, è possibile evidenziare le principali caratteristiche di suddetti veicoli:

- autonomia massima è di circa 100 Km
- tempo di ricarica delle batterie è, nel migliore dei casi, pari a 6 ore
- la velocità massima raggiungibile è di circa 100 km/h
- prezzo delle batterie impiegate è elevato e la loro affidabilità è molto bassa

Le basse prestazioni ottenute possono essere ricondotte alla diversa potenza, erogabile per unità di peso, della fonte energetica sfruttata dai veicoli elettrici rispetto a quelle sfruttate nei veicoli convenzionali. Ad esempio, da circa 60 litri (≈ 50 kg) di benzina ricaviamo una potenza meccanica utilizzabile di circa 120 KWh mentre da una batteria Ni-MH, del peso di 300 Kg, otteniamo una potenza meccanica utilizzabile di 15 KWh. Questo tipo di propulsione alternativa trova, però, applicazione in trasporti di persone e merci in aree urbane, con percorsi giornalieri inferiori all'autonomia massima.

Veicolo	Autonomia Massima(Km)	Velocità Massima(Km/h)	Tempo di Ricarica (ore)
FIAT 600 Elettra	90	100	8
GM Impact	130	130	7
BMW E1	230	125	6
HONDA EVX	150	130	6-7
NISSAN FEV	240	130	6-7
FAAM Jolly 600	100	53	6-8
TECNOBUS - Gulliver	88	35	6-7
IVECO - Altrobus	60	53	7

Tabella 8 Esempi di veicoli elettrici in commercio

Un ulteriore sviluppo tecnologico dei veicoli elettrici potrebbe far riferimento sia al miglioramento dei componenti esistenti che all'introduzione di nuovi. In questo ultimo ambito è di notevole interesse la ricerca di componenti, quali volani meccanici e supercondensatori, che fungono da accumulatori istantanei di energia. Tali dispositivi permettono di svolgere l'importante funzione di attenuare le fluttuazioni di potenza del sistema di accumulo di energia, durante improvvise frenate e ripartenze, migliorando le efficienze e allungando la vita media delle batterie.

2.2.5 Veicoli a celle a combustibile

Con ogni probabilità, la vera rivoluzione degli autoveicoli sta avvenendo con l'introduzione delle celle a combustibile [15]. Questa tecnologia non è nuova, ma fino a pochi anni fa non ci sono stati incentivi nel suo utilizzo. Attualmente la tecnologia non è ancora matura, a causa di problemi di natura tecnica ed economica. Le celle a combustibile sono dispositivi elettrochimici che permettono di convertire l'energia chimica di un combustibile in energia elettrica senza l'intervento di un ciclo termodinamico. Questo permette innanzitutto di raggiungere elevati rendimenti, di utilizzare un'ampia gamma di combustibili e di avere un impatto ambientale "nullo", o quantomeno ridotto rispetto a quello dei tradizionali motori. Questo convertitore di energia deve essere necessariamente accoppiato ad un motore elettrico, e si parlerà di sistema fuell-cell/motore elettrico.

Nel 2000 previsioni ottimistiche sostenevano che nel 2005 si sarebbe avviata una produzione di massa di questi sistemi, ed i primi veicoli in commercio sarebbero stati venduti al prezzo di

40.000 \$. Purtroppo però, a causa degli elevati costi degli stack delle fuel-cell (5.000 \$/kW), questa visione utopistica è sfumata.

Nella scelta della tipologia di cella da impiegare per un utilizzo auto veicolare c'è da tenere in considerazione non soltanto il costo dell'elettrolita, ma anche la temperatura di utilizzo. La tipologia che calza al meglio per applicazioni automobilistiche è la PEM (Proton Exchange Membrane), con temperature di utilizzo al di sotto dei 100°C, anche se oggi si cominciano a studiare applicazioni come le SOFC, che lavorano sopra agli 800°C.

Il combustibile utilizzato direttamente da questi dispositivi è l'idrogeno. Non essendo esso presente in natura nella sua forma gassosa (utilizzata nella cella) esiste un problema non trascurabile di conversione. Inoltre l'idrogeno è un gas estremamente volatile ed esplosivo, e la ricerca sta puntando verso il "reforming a bordo", che consiste nel ricavare l'idrogeno a partire da altri vettori energetici, quali metano, idrocarburi derivati dal petrolio, metanolo, carbone, ammoniaca, ecc. Alcune configurazioni presentano la possibilità di effettuare il reforming direttamente sui piatti della cella. I processi di reforming (quali ossidazione parziale, steam reforming e water-gas-shift) non sono esenti dal produrre sostanze inquinanti: oltre alla produzione di idrogeno, la reazione genera CO₂ e CO. Quest'ultima, inoltre, è una sostanza dannosa per le superfici catalitiche della cella. La reazione di reforming (endotermica), in compenso, è avvantaggiata dal calore liberato dall'altra reazione, quella di ossidoriduzione (esotermica). Una possibile alternativa al reforming è il serbatoio ad "idrocarburi metallici", in cui l'idrogeno è intrappolato in una matrice metallica ed estratto successivamente attraverso variazione di pressione e temperatura, con inevitabili perdite di energia e quindi diminuzione dell'efficienza.

2.2.6 Propulsione ibrida

Potrebbero avere buona diffusione nel breve periodo i veicoli ibridi termici/elettrici (HEV) il cui funzionamento si basa sulla combinazione di un motore a combustione interna con una o più macchine elettriche [16].

Ciascun veicolo analizzato in precedenza presenta vantaggi e svantaggi. La tecnica ibrida si prefigge di sfruttare al meglio i vantaggi di ogni tecnologia. Un veicolo è definito "ibrido" quando utilizza differenti sistemi di conversione, accumulo e generazione dell'energia. Si ha un veicolo ibrido quando, ed esempio, vengono accoppiati un sistema di generazione basato su un convertitore primario (motore a combustione interna, turbina a gas e fuel-cell) ed un sistema di accumulo a bordo di tipo reversibile, come ad esempio batterie ricaricabili o supercondensatori.

L'ibridizzazione dei veicoli a batteria, ad esempio, con un generatore termico di energia elettrica di piccola taglia è stata la prima risposta per risolvere e superare i problemi caratteristici di questi veicoli: scarsa autonomia e lunghi tempi di ricarica.

La storia degli ibridi, in realtà, inizia nei primi del Novecento quando la tecnologia automobilistica vedeva molte soluzioni tra loro radicalmente diverse in concorrenza sul mercato: vapore, elettricità, motori a combustione interna, ecc. Lo sviluppo dell'industria automobilistica ci ha poi insegnato che, affinché una soluzione si affermi occorre che siano soddisfatte tre condizioni: facilità e versatilità d'uso, disponibilità di infrastrutture e costi accettabili. Come visto, il concorrere di tutte e tre le condizioni ha determinato il successo del motore a combustione interna alimentato con combustibili fossili derivanti dal petrolio.

Capitolo 3

Negli ultimi anni, con l'introduzione delle normative antinquinamento e grazie alla spinta in avanti della tecnologia, lo studio e lo sviluppo di sistemi di propulsione alternativa ha suscitato nuovo interesse.

I veicoli convenzionali, in genere, vengono utilizzati in ampi intervalli di funzionamento sia a livello di potenza che di velocità. È evidente che le condizioni di velocità e potenza richieste nel normale funzionamento, non sono le condizioni ideali per il funzionamento di un motore a combustione interna, che per limitare le emissioni e garantire buoni rendimenti, dovrebbe funzionare ad un regime di rotazione pressoché costante.

In più si deve tener conto di quella parte di energia si perde durante le fasi di transizione (es. per mettere in moto il veicolo), per vincere gli attriti e le resistenze, e durante la decelerazioni e frenate, per mezzo dei freni meccanici. Senza contare l'energia consumata dal veicolo "al minimo" durante i periodi di sosta al semaforo piuttosto che nelle traffico cittadino.

L'idea generale alla base dei veicoli ibridi è, da un lato, quella ottimizzare il profilo di potenza generata dal motore a combustione interna provvedendo a fornire una sorta di valore medio della potenza richiesta dal percorso. Dall'altro, il sistema di accumulo energetico è in grado di soddisfare i picchi di potenza eventualmente necessari a coprire i carichi maggiori, come ad esempio durante le fasi di accelerazione, di marcia in salita e in tratti ad alta velocità. Il sistema di accumulo, inoltre, è utile nelle fasi di frenata per recuperare parte dell'energia cinetica del veicolo che normalmente viene dispersa sotto forma di calore nei veicoli convenzionali. Non è poi da trascurare la possibilità di marciare a motore spento durante sia durante le fermate e i periodi di bassa richiesta energetica sia in zone particolari come, ad esempio, i centri urbani dove è in vigore la zona a traffico limitato.

3.1 I veicoli ibridi

3.1.1 Cenni storici

I primi veicoli ibridi di serie furono realizzati in Europa nei primi del Novecento: nel 1901 Camille Jenatton presentò al Salone di Parigi un sistema ibrido parallelo con un motore termico da 4.4 kW e un motore-generatore elettrico da 10.3 kW. Nel 1903 Lohner-Porsche realizzò un sistema ibrido in serie, con un motore termico da 14.7 kW che azionava un motore-generatore elettrico in corrente continua di 20.6 kW; qualche anno più tardi fu la volta di Mercedes in collaborazione con Mixte.

Nel 1917 una nota azienda di veicoli elettrici statunitense, Baker and Woods, sviluppò propri veicoli ibridi-elettrici.

Nei primi anni Trenta si interruppe, però, la produzione degli ultimi veicoli ibridi-elettrici, mentre i motori a combustione interna iniziarono a prendere definitivamente il sopravvento.

Negli anni Sessanta, di fronte alle chiare conseguenze ambientali di uno sviluppo fondato sullo sfruttamento dei combustibili fossili, si manifestò nuovamente l'interesse per i veicoli ibridi-elettrici. Inoltre, le crisi petrolifere del 1973 e del 1979 e le previsioni di ulteriori crisi future determinarono le prime scelte politiche.

Negli stessi anni Toyota iniziò a studiare la tecnologia ibrida sviluppando nel 1965 un modello di un sistema ibrido turbina a gas/motore elettrico che applicò nel 1969 ad un autobus.

La stessa tecnologia venne applicata nel 1975 alla Toyota Century Hybrid e nel 1977 alla Toyota Sport 800 gas turbine hybrid.

La Prima Guerra del Golfo (1991) pose nuovamente al centro dell'attenzione sia la questione energetica, con la dipendenza dei maggiori paesi occidentali dal petrolio fornito dai produttori del medio Oriente, sia la questione ambientale.

Nel 1993 l'amministrazione Clinton stipulò un accordo con General Motors, Ford e Chrysler (PNGV, Partnership for a New Generation of Vehicles) per la realizzazione di un veicolo ibrido-elettrico rivoluzionario, la Supercar, in grado di percorrere 80 miglia consumando 1 gallone di carburante (circa 33 km/l).

Il programma Supercar fallì per l'arbitrarietà dell'obiettivo di percorrenza fissato e, pur fornendo un grande impulso alla ricerca di materiali e allo sviluppo dei sistemi ibridi, non si dimostrò adatto a una produzione su larga scala.

Nel 1997 sempre Toyota lanciò la Prius, dotata del Toyota Hybrid System (THS), il primo veicolo ibrido-elettrico commercializzato su larga scala che nel 2000 venne lanciata negli Stati Uniti e in Europa.

Nel 1999 la Honda Insight fu il primo veicolo ibrido-elettrico ad essere commercializzato negli Stati Uniti.

Nel 2003 Honda offrì sulla Civic a richiesta la trazione ibrida, riproponendo il sistema IMA (Integrated Motor Assist) della Insight: con un sistema di chiusura di 3 valvole su 4 in decelerazione e in frenata, tali veicoli realizzano una riduzione del 50% degli attriti interni al motore termico.

Nel 2003 La Toyota lanciò la nuova Prius, caratterizzata da un motore-generatore elettrico da 50 kW con modalità di guida a trazione completamente elettrica, che venne proclamata 'auto dell'anno' nel 2004 per l'America Settentrionale e nel 2005 per l'Europa.

A marzo 2005 iniziò la produzione della Lexus RX400h, il primo SUV (Sport Utility Vehicle) al mondo equipaggiato con sistema a trazione ibrida con l'applicazione del sistema Hybrid Synergy Drive (Toyota) ad un veicolo con 4 ruote motrici, dimostrando così come sia possibile ottenere livelli di economia di consumi e abbattimenti delle emissioni senza dover rinunciare all'eccellenza delle prestazioni, comfort e flessibilità dell'uso.

3.1.2 Architettura

I veicoli ibridi (HEV) sono sistemi di propulsione avanzata in cui l'energia necessaria alla trazione è prodotta da due o più sorgenti, di cui almeno una è reversibile: nel caso dei veicoli ibridi elettrici si ha un motore tradizionale a combustione interna e un motore elettrico alimentato da un pacco di batterie.

In generale i componenti principali dei veicoli ibridi sono:

- motore endotermico (ICE)
- motore elettrico (EM)
- accumulatori di energia (F per combustibile e B per batterie)
- convertitore di potenza (P)
- cambio (G)
- trasmissione che collega il blocco del propulsore alle ruote

Tutti gli elementi sono interfacciati da un algoritmo di controllo (power management) che regola la gestione dei due flussi energetici.

Questa tecnologia consente di ottimizzare e aumentare l'efficienza complessiva del veicolo cercando di beneficiare dei vantaggi di entrambi i tipi di motore, compensando i difetti di ciascuno: il funzionamento del motore termico, infatti, viene ottimizzato all'interno di un range di velocità di rotazione e la propulsione può essere gestita dal solo motore elettrico, o termico o accoppiati in funzione della necessità di marcia, con risparmi sui consumi e sulle emissioni inquinanti.

A differenza dei veicoli elettrici a batteria, l'energia viene prodotta direttamente a bordo dal generatore, eliminando così il problema dell'accumulo e degli ingombri dei pacchi di batterie: i combustibili fossili liquidi riescono a portare a bordo cinquanta volte in più di energia rispetto le batterie a parità di peso.

Qualunque sia la gestione di controllo che ne differenzia prestazioni e architettura, si hanno delle caratteristiche comuni per tutti i veicoli ibridi:

- Il motore elettrico può fungere sia da motore che da generatore consentendo un flusso di potenza dalla batteria alle ruote e viceversa.
- L'impiego della frenata rigenerativa, cioè un sistema di recupero dell'energia a disposizione durante le fasi di decelerazione: il motore elettrico, con funzione in questo caso di generatore, ricarica gli accumulatori. La ripartizione della forza frenante tra quella tradizionale e rigenerativa varia in funzione della velocità del veicolo e del tempo.
- Durante le fermate o nelle fasi in cui non è richiesta potenza il motore endotermico viene spento riducendo consumi ed emissioni (sistema "stop and go").
- Il motore elettrico ha una potenza sufficiente per riavviare, se necessario, il motore termico in tempi brevi senza che il conducente avverta alcun inconveniente.

Le possibili configurazioni dei veicoli ibridi elettrici sono [17]:

- ibrido serie
- ibrido parallelo
- ibrido serie-parallelo
- ibrido complesso

Sistema ibrido serie

I veicoli ibridi in serie utilizzano esclusivamente il motore elettrico per la trazione e l'energia ad esso necessaria è prodotta da un generatore trascinato dal motore termico e immagazzinata negli accumulatori.

Il motore a combustione interna viene utilizzato a regimi di rotazione costanti in corrispondenza del punto di massimo rendimento, consentendo una drastica riduzione delle emissioni nocive e della rumorosità del veicolo.

Il motore termico viene dimensionato per fornire la potenza media richiesta dal veicolo, quindi ne viene installato uno a cilindrata ridotta, ma non essendo collegato meccanicamente alle ruote non può fornire direttamente trazione al veicolo.

Questa configurazione, tuttavia, presenta notevoli perdite alle medie ed alte velocità connesse al calore disperso a causa delle numerose conversioni dei flussi energetici e alla ricarica e scarica degli accumulatori.

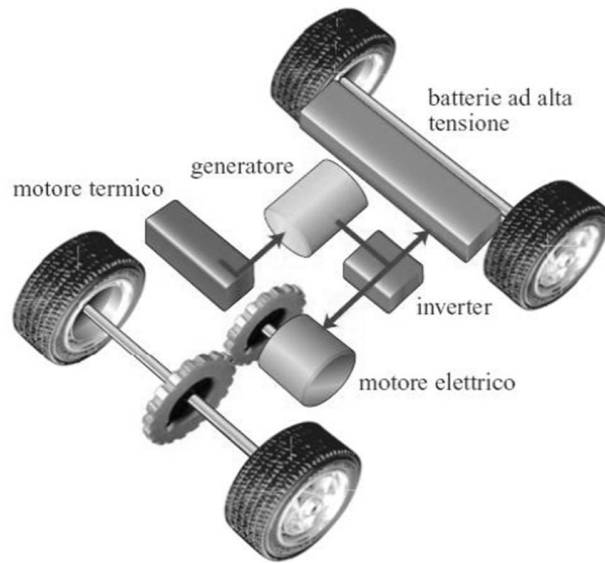


Figura 16 Sistema ibrido serie

I principali pregi e difetti di questa tipologia di architettura sono riassunti in tabella 9.

Riguardo il sistema di controllo del veicolo ibrido serie le modalità operative sono riassunte nel seguente elenco e sono rappresentate visivamente in figura 17. Le frecce gialle indicano il verso in cui fluisce l'energia.

- Startup/guida normale/accelerazione: sia la batteria che il motore endotermico forniscono energia al motore elettrico.
- Basso carico: essendo la potenza fornita dal motore termico maggiore di quella richiesta dal veicolo, parte di essa viene utilizzata per ricaricare le batterie.
- Frenata/decelerazione: il motore elettrico funge da generatore e ricarica le batterie, sfruttando parte dell'energia di frenata.
- Ricarica batterie da fermo.

Pregi	Difetti
<ul style="list-style-type: none"> • Il motore a combustione interna lavora con la massima efficienza • Il generatore opera al massimo rendimento • Flessibilità nella disposizione del motore termico non avendo alcun legame meccanico diretto con le ruote • Il motore a combustione interna ha una potenza inferiore rispetto quella dei veicoli tradizionali 	<ul style="list-style-type: none"> • Tre componenti di propulsione: motore termico, elettrico e generatore • Richiede batterie più grandi, quindi, con maggiore peso • Tripla conversione dell'energia: da chimica a meccanica (ICE), da meccanica a elettrica, da elettrica di nuovo meccanica (ME), con conseguenze sulle perdite

Tabella 9 Pregi e difetti di veicoli ibrido serie

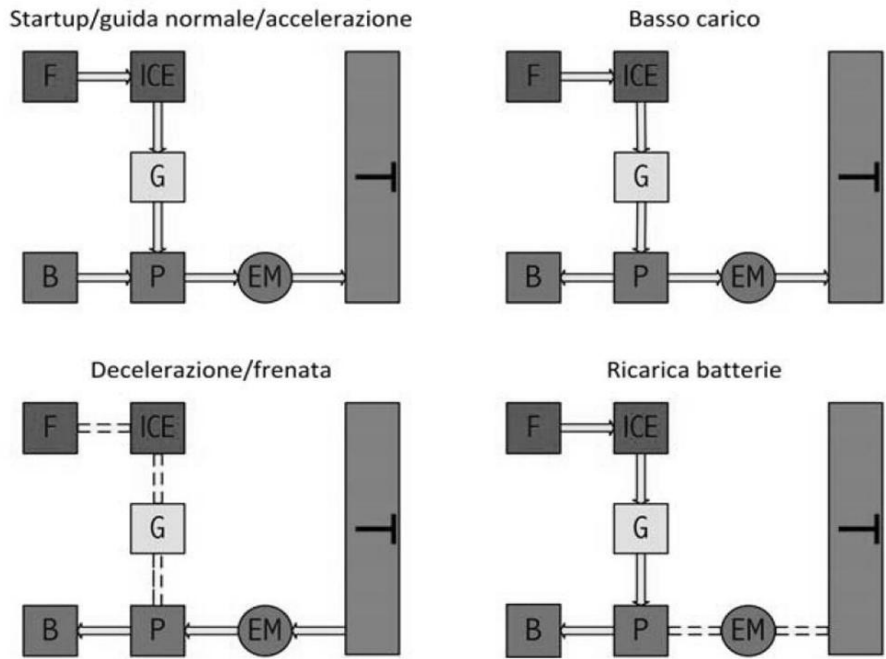


Figura 17 Modalità operative per veicoli ibridi serie

Sistema ibrido parallelo

In questa configurazione il motore endotermico ed elettrico sono accoppiati all'asse di trasmissione, sommando così le loro potenze: il sistema è dotato di due frizioni necessarie a trasmettere la potenza dai due motori all'albero di trasmissione.

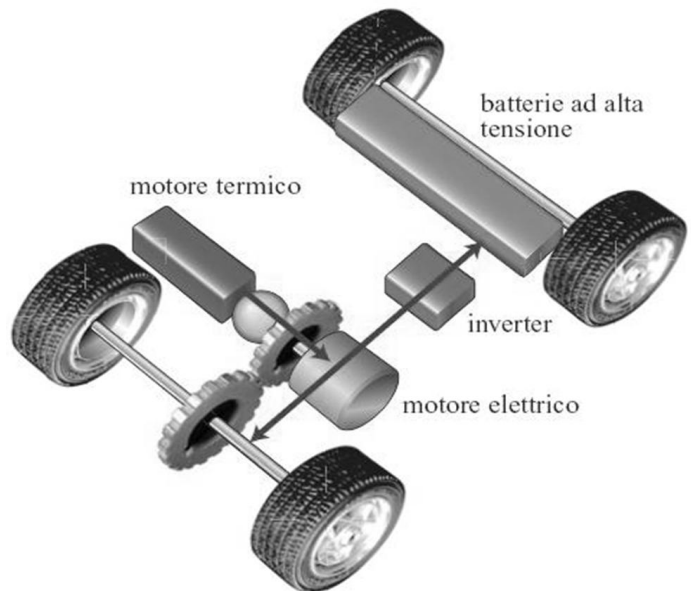


Figura 18 Sistema di ibrido parallelo

La logica di controllo e la disposizione dei componenti si fanno più complessi ed il motore endotermico è chiamato a funzionare a regimi di rotazione più variabili con conseguenze penalizzanti sui consumi e sulle emissioni.

Il power management di un sistema ibrido in parallelo presenta le seguenti modalità operative:

- Startup/accelerazione: entrambi i motori forniscono potenza
- Guida normale: il motore endotermico fornisce trazione mentre quello elettrico è spento
- Decelerazione/frenata: il motore elettrico funge da generatore e ricarica le batterie tramite il convertitore di potenza
- Ricarica batteria in movimento: è possibile ai bassi carichi che il motore termico ricarichi le batterie

Pregi	Difetti
<ul style="list-style-type: none"> • A parità di prestazioni, permette l'uso di un motore a combustione interna più piccolo ed efficiente; • Il veicolo offre complessivamente buone prestazioni dalla cooperazione di entrambi i motori; • Il motore elettrico può caricare esso stesso le batterie, quindi a volte è possibile eliminare il generatore; • Minor conversioni dei flussi energetici. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema di trazione e trasmissione più complesso; • Riduzione del rendimento e aumento delle emissioni per il motore termico che è costretto a lavorare a regimi più variabili; • Assenza di flessibilità di ambientazione.

Tabella 10 Pregi e difetti di veicoli ibrido parallelo

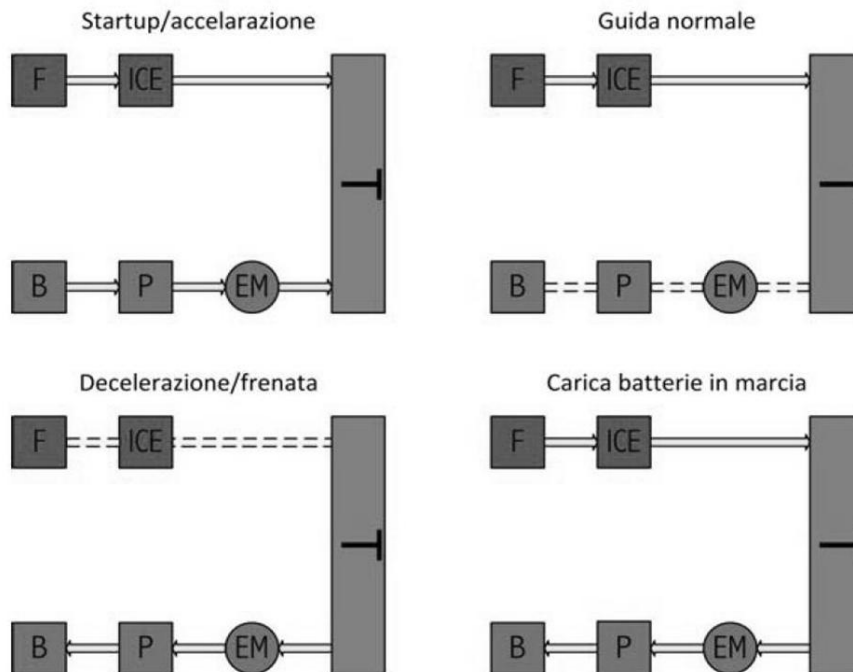


Figura 19 Modalità operative ibrido parallelo

Sistema ibrido serie-parallelo

Questa configurazione sfrutta i vantaggi dell'una e dell'altra e necessita, rispetto a queste, di un generatore aggiuntivo (assente negli ibridi in parallelo) e del collegamento diretto tra motore endotermico e ruote (assente negli ibridi in serie). Questa architettura, nonostante l'incremento dei costi e della complessità strutturale, permette di gestire una più vasta gamma di modalità operative del flusso energetico, raggruppabile in due gruppi: *Engine Heavy* e *Electric Heavy*.

Le fasi di guida comuni ad entrambe le strategie sono:

- decelerazione/frenata: il motore elettrico funge da generatore e ricarica le batterie;
- ricarica batterie in movimento: il motore endotermico fornisce al tempo stesso potenza alle ruote per la trazione e potenza al generatore per ricaricare le batterie;
- ricarica batteria da fermo: il motore termico, a veicolo fermo, può essere lasciato acceso per ricaricare le batterie.

Engine Heavy

- Startup/basso carico: è attivo solo il motore elettrico mentre quello endotermico è spento;
- Accelerazione: i due motori si dividono la potenza da fornire al veicolo;
- Guida normale: il motore elettrico è spento e quello termico fornisce tutta la potenza alle ruote.

Electric Heavy

- Startup/basso carico: il solo motore elettrico è attivo mentre quello termico è spento;
- Accelerazione/guida normale: a seconda della politica di gestione e della condizione di marcia entrambi i motori forniscono potenza alle ruote in misura variabile.

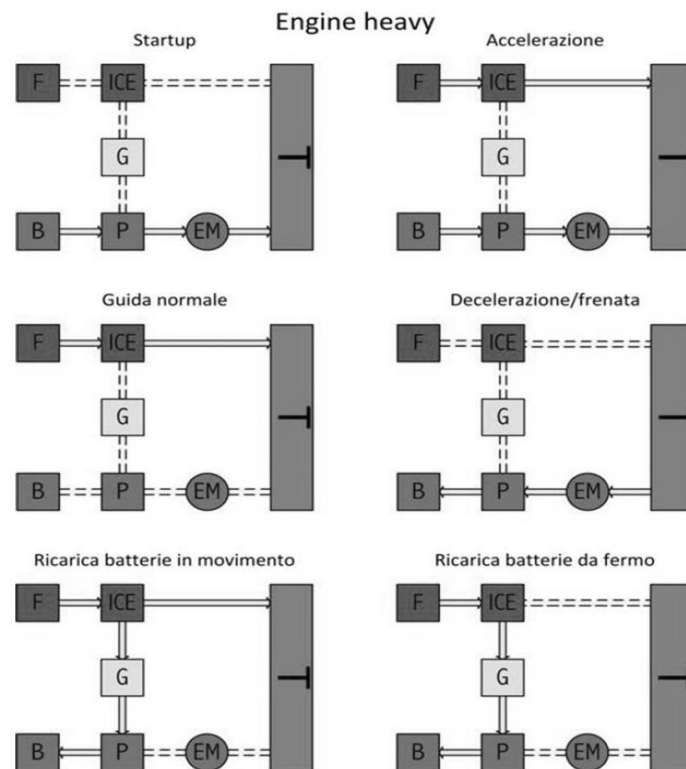


Figura 20 Modalità operative per veicoli engine heavy

Sistema ibrido complesso

Gli ibridi complessi si differenziano dai veicoli ibridi serie-paralleli per la bidirezionalità del flusso di potenza del motore elettrico, mentre il generatore elettrico nel sistema serie-parallelo consente un flusso di potenza in un solo senso.

Pur essendo penalizzante al livello strutturale e dei costi, questa configurazione permette di sfruttare 3 sorgenti di energia: il motore termico e due motori elettrici.

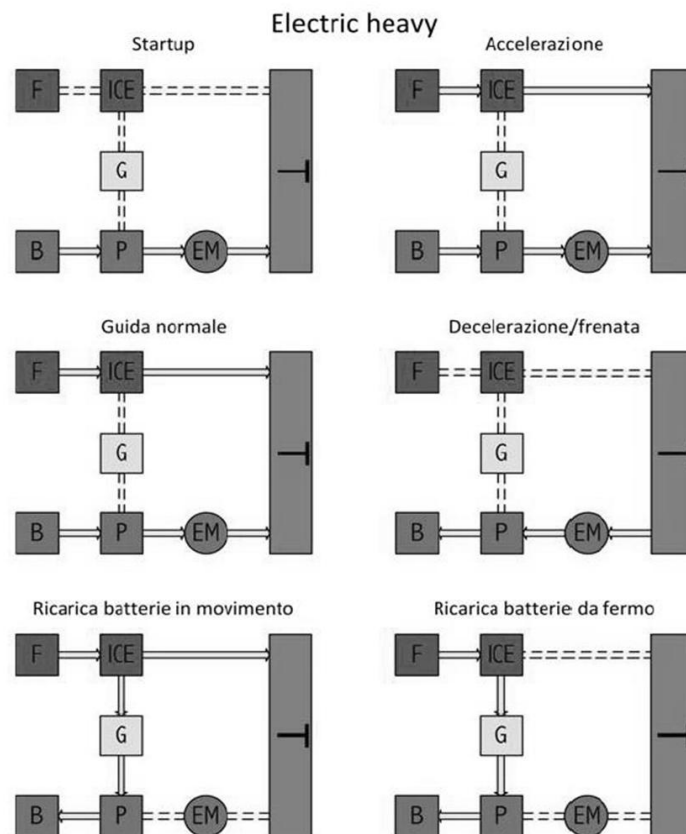


Figura 21 Modalità operative per veicoli electric heavy

Sistema parallelo con rotismo epicicloidale

Questa sistema ibrido, applicata sulla Toyota Prius, è composto da 3 motori: un motore termico, un motore-generatore elettrico per la ricarica degli accumulatori durante la marcia e il riavvio del motore termico e un secondo motore-generatore per la trazione delle ruote anteriori e la frenata rigenerativa. Il dispositivo di ripartizione della potenza, rotismo epicicloidale, consente di eliminare elementi di trasmissione, essendo il differenziale direttamente mosso dall'anello esterno dal rotismo, solidale al motore elettrico. In questo modo si riescono a disaccoppiare le velocità di rotazione del motore termico e di quello elettrico.

Nonostante la complessità strutturale, tale sistema offre una notevole flessibilità di funzionamento e combina i principali vantaggi dei sistemi ibridi in serie e in parallelo. La trazione può essere assicurata dal solo motore elettrico nelle condizioni di basso carico e di bassa velocità, mentre è previsto l'utilizzo combinato del motore termico e del motore elettrico nelle condizioni di carico e di velocità maggiori. Il sistema di gestione seleziona in maniera

automatica la combinazione ottimale di funzionamento dei due motori e in assenza di carico, il motore termico può essere avviato per ricaricare gli accumulatori attraverso il generatore.

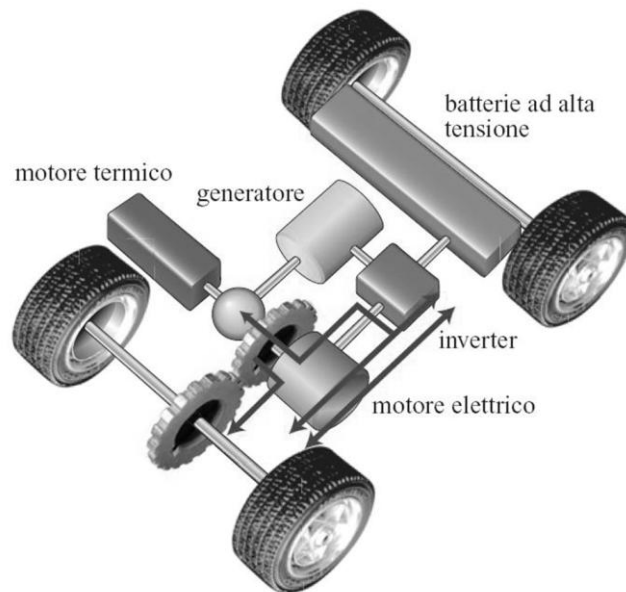


Figura 22 Sistema ibrido Toyota Prius

Altre configurazioni

Vi sono, inoltre, sulla base delle configurazioni sopra descritte, altre possibili architetture: *ibrido split* e *ibrido minimo*.

Ibrido Split

In questa architettura la parte elettrica e quella termica sono associate ciascuna ad un asse del veicolo, manca quindi una diretta connessione tra le due parti e non esiste alcun sistema di alimentazione delle batterie direttamente dal motore termico.

Ibrido Minimo

È una soluzione molto prossima alla struttura del veicolo tradizionale in cui alternatore e motorino di avviamento sono sostituiti da un'unica macchina di potenza collegata meccanicamente all'albero motore e elettricamente al sistema di bordo. Tale macchina, associata ad un sistema di accumulo, è in grado di fornire potenza aggiuntiva al motore nelle fasi di maggiore richiesta, di realizzare la frenata rigenerativa e di consentire il funzionamento in start/stop del motore termico, permettendo la riduzione dei consumi del 10-15%.

3.1.3 Vantaggi e svantaggi

Come tutti i veicoli, anche quelli ibridi presentano delle caratteristiche che possono essere considerate vantaggiose rispetto ad altri sistemi propulsivi ed altre meno. Nella Tabella 8, e con maggior dettagli nei paragrafi seguenti, sono riportati i principali vantaggi e svantaggi comuni ai veicoli ibridi [18].

VANTAGGI	SVANTAGGI
- Il motore termico lavora a punto fisso	- Maggiori costi di acquisto
- Recupero in frenata	- Sofisticata gestione del sistema
- Possibilità "solo elettrico"	- Eventuale aumento di ingombro e peso
- Meccanismo "idle-off"	- Efficienza dei sistemi accumulo

Tabella 11 Vantaggi e svantaggi dei veicoli ibridi

Ottimizzazione rendimento del motore primo

Come è stato visto, la presenza dell'accumulatore elettrico permette di separare le due funzioni di conversione dell'energia e di generazione di potenza alle ruote, funzioni che in un veicolo tradizionale devono essere soddisfatte contemporaneamente dal motore termico, che quindi lavora a regime variabile seguendo i carichi imposti dalla guida. Lasciando al motore termico principalmente la funzione di conversione dell'energia, si ottiene un miglior funzionamento sia del termico stesso, che viene ottimizzato per una ristretta regione di funzionamento, sia della propulsione (generazione di potenza) che può essere gestita in modalità solo elettrica, termica o accoppiata, in funzione della configurazione del veicolo e delle necessità di marcia.

Durante i cicli urbani, infatti, la velocità di giri del motore di un veicolo tradizionale varia con estrema sensibilità. Il consumo specifico di un motore cambia al variare della coppia e del numero di giri, figura 23, ed in città è molto frequente la marcia a potenza ridotta, dove i consumi specifici sono molto elevati. L'ibridazione consente poi di evitare in tutte le partenze dell'auto, e quindi anche a freddo, il funzionamento in potenza del motore termico, grazie alla possibilità di marcia a bassa velocità con la macchina elettrica: questo contribuisce a ridurre radicalmente le emissioni. In alcune configurazioni è possibile adoperare un motore termico di potenza molto ridotta rispetto alla potenza massima alle ruote e farlo funzionare nell'intorno dei punti di ottimo rendimento, conseguendo la riduzione del peso del motore, dei consumi e delle emissioni.

Recupero di energia in frenata

La presenza delle batterie offre la possibilità di recuperare l'energia dissipata durante le frenate, con risparmi dell'ordine del 20%, prevalentemente nelle tratte urbane, caratterizzate da frequenti frenate/ripartenze. In un veicolo che viaggia in piano, la richiesta di energia durante le fasi di marcia a velocità costante (predominanti nell'uso extraurbano) dipende dalle resistenze aerodinamiche e da quella di rotolamento dei pneumatici, mentre durante le fasi di accelerazione (predominanti nell'uso urbano) dipende anche dall'inerzia del veicolo.

Si consideri che in un ciclo urbano quasi il 50% dell'energia che arriva alle ruote è necessaria per accelerare, e viene quindi trasformata in energia cinetica del veicolo, come è mostrato in figura 24. In un veicolo tradizionale questa energia viene dissipata completamente durante le frenate meccaniche. In un veicolo ibrido, invece, assumendo un rendimento del generatore elettrico del 70% ed un rendimento di carica e scarica delle batterie uguale al 70% (e quindi un rendimento complessivo del recupero pari al 49%), l'energia restituita al motore in fase di accelerazione è perciò (a meno delle perdite dovute alla necessità di una frenatura meccanica

residua nella fase finale del rallentamento del veicolo) quasi la metà di quella resa disponibile dalla frenata, e complessivamente circa 1/4 circa (il 49% del 50%) dell'energia necessaria a muovere il veicolo sul ciclo urbano.

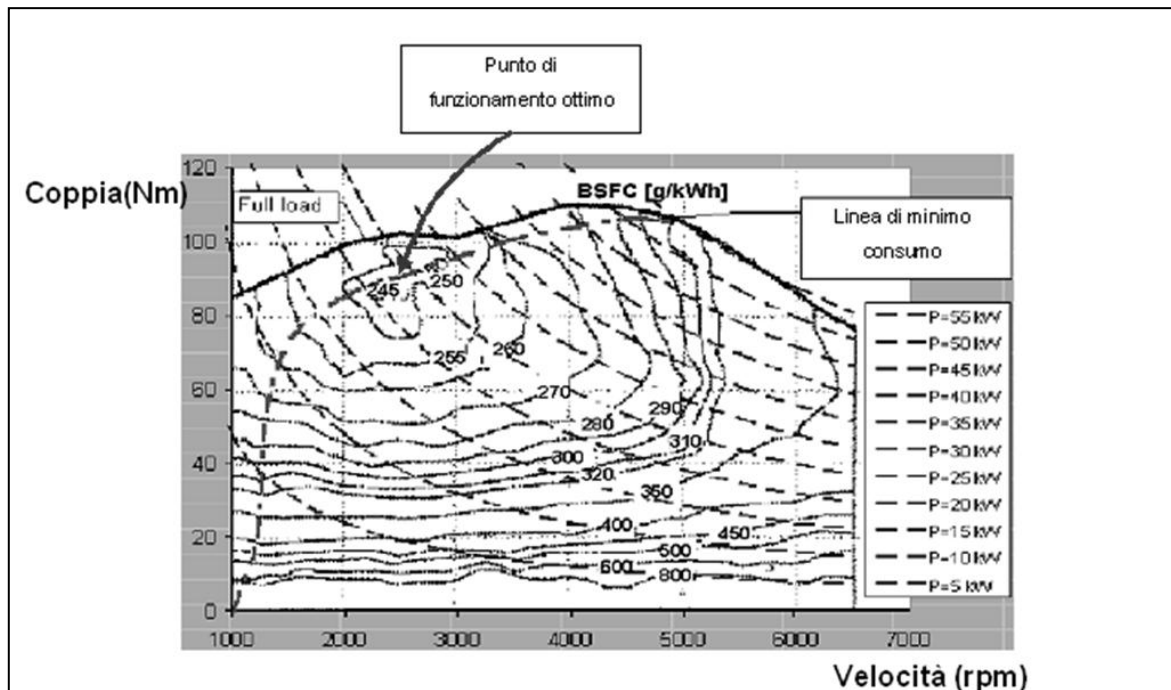


Figura 23 Mappa di un motore ad accensione comandata

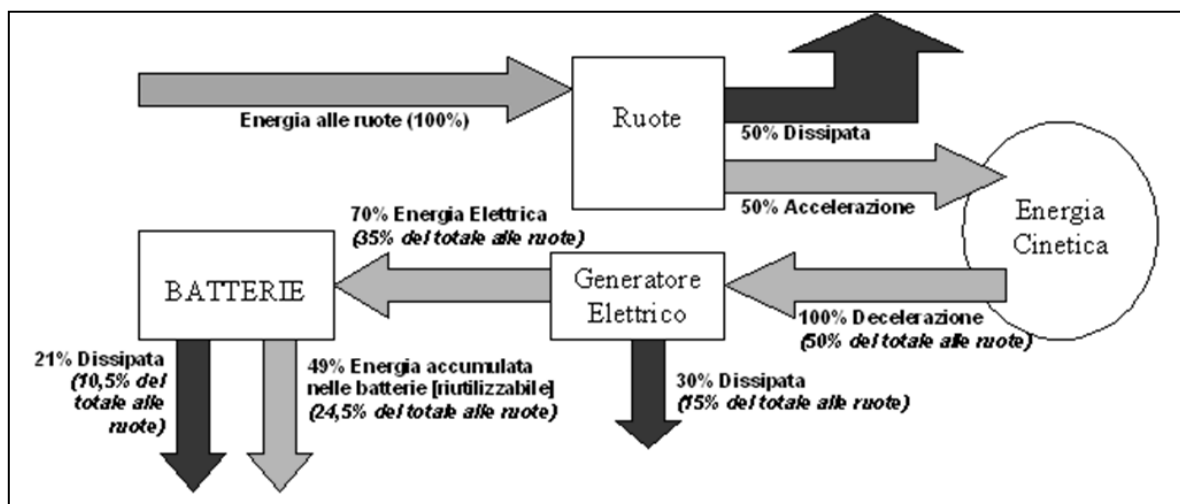


Figura 24 Flussi energetici nel recupero in frenata

Modalità solo elettrico

In quasi tutte le tipologie è possibile viaggiare in modalità "solo elettrico": le batterie, se non sono troppo piccole, danno la possibilità di percorrere alcuni chilometri, con una flessibilità

d'impiego maggiore sia rispetto al veicolo convenzionale che a quello "elettrico puro", che rimane inevitabilmente limitato nell'autonomia nella maggior parte degli usi. Quando viene azionata questa modalità, le emissioni inquinanti sono nulle e la rumorosità del veicolo è molto ridotta.

Modalità "idle-off"

Un altro vantaggio è la capacità di spegnere il motore termico quando non è necessario, ad esempio durante le soste nel traffico o nei semafori. Questa modalità viene chiamata "idle-off", letteralmente "spento se libero".

Nel complesso le prestazioni di questi veicoli sono del tutto comparabili con quelle dei veicoli tradizionali, con una riduzione dei consumi e delle emissioni.

Svantaggi

Le principali motivazioni che hanno a tutt'oggi rallentano l'affermazione di questa interessante ed efficace tecnologia sono da imputare principalmente a delle problematiche di carattere tecnico ed economico.

Innanzitutto la necessità di due sistemi di alimentazione, oltre alla sofisticata elettronica di gestione ottimale di tali sistemi comportano un sostanziale aumento dei prezzi: attualmente a parità di potenza, il costo di un veicolo ibrido è circa il doppio rispetto ad un equivalente veicolo convenzionale.

A ciò va aggiunto che, analogamente ai veicoli "elettrici puri", le batterie rimangono il punto debole dal punto di vista tecnologico: i continui cicli di carica e scarica accorciano, infatti, in maniera significativa la vita media degli accumulatori e le loro relative prestazioni, con un evidente impatto sia sul comportamento del veicolo che su quello della manutenzione e quindi costo dello stesso.

Capitolo 4

I numerosi aspetti trattati fino a questo punto evidenziano in maniera chiara l'esistenza di un panorama globale che offre molteplici possibilità a tecnici, studiosi e ricercatori per studiare, proporre e sviluppare soluzioni che siano in grado di rispondere alle esigenze di una società sempre più complessa ed eterogenea.

La ricerca e le case automobilistiche, come detto sopra, sono da tempo impegnate in questo settore ed hanno realizzato molto nei vari segmenti della autotrazione e non solo. Attualmente, infatti, vi sono offerte per il mercato dell'ibrido che spaziano dai classici modelli di berlina (Toyota Prius, Honda Insight), passando per i Suv (Lexus Rx 400h, Porsche Cayenne Hybrid), i fuoristrada (Chevrolet Silverado), furgoni commerciali (Daihatsu Hijet Cargo), autobus e mezzi pubblici, fino ad arrivare a motorini e scooter (Piaggio MP3 hybrid).

Tutte queste proposte sono molto interessanti da un punto di vista tecnologico, economico ed ambientale.

A mio avviso, tuttavia, la tecnologia ibrida, offre i suoi maggiori vantaggi in contesti nei quali esistono delle particolari condizioni di traffico e mobilità che obbligano l'utilizzo dei tradizionali motori a combustione interna a regimi che ne "offendono" le caratteristiche tecniche, dovendo funzionare sempre a regimi lontani dalle specifiche di progetto. Dicendo ciò mi riferisco in particolar modo al contesto urbano cittadino laddove la marcia è caratterizzata da frequenti accelerazioni e frenate, basse velocità ed una sostanziale imprevedibilità di condizioni di guida.

È inoltre da considerare l'incidenza di altri due fattori fondamentali che caratterizzano l'ambito urbano e favoriscono lo sviluppo di una tecnologia ibrida come soluzione ai problemi del traffico. Mi riferisco, chiaramente, sia all'inquinamento ambientale che a quello apparentemente più banale, ma evidentemente di rilevante interesse sociale, del parcheggio.

È proprio ragionando su queste premesse che il mio interesse riguardo ai veicoli ibridi si sia diretto verso lo studio delle prestazioni e l'ottimizzazione di un piccolo veicolo pensato per un utilizzo prettamente urbano che rappresentasse una valida proposta alla mobilità nelle città.

Questo lavoro di studio e sviluppo è stato condotto in collaborazione con il Centro di Ricerca ENEA Casaccia e le Università di Roma "La Sapienza" e "Roma Tre".

4.1 Il progetto Microcar

Il progetto Microcar, promosso dall'ENEA in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Nucleare e Conversioni di Energia dell'Università "La Sapienza" ed il Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università di Roma "Tor Vergata" e Roma 3, è nato con l'intento di progettare e realizzare una piccola vettura ad uso urbano, Urb-e "urban electric", dotata di un sistema di propulsione in configurazione ibrido serie ed un sistema d'accumulo a supercondensatori [19].

L'obiettivo caratterizzante il progetto è quello di sviluppare un veicolo che consumi ridotte quantità di combustibile, inferiori a 2,5 litri di benzina per 100 km, e di conseguenza avere delle minime emissioni ambientali, che rispettino le norme EURO IV.

La scelta dell'architettura serie è giustificata dalla destinazione d'uso del veicolo stesso. Infatti tale sistema è quello che meglio si presta ad essere impiegato a basse velocità, con continue frenate ed accelerazioni che comportano un importante contributo della frenata rigenerativa.

Riguardo i supercapacitori, in virtù di numerose simulazioni sono stati preferiti alle normali batterie per la loro capacità di fornire velocemente potenza e per la loro durata di vita in condizioni di stress cui un veicolo urbano è sottoposto, e perché la leggerezza del pacco supercondensatori, rispetto ad uno di batterie di pari potenza permette di ridurre il peso del veicolo sul quale vengono installati e di conseguenza producono un vantaggio iniziale sulla riduzione dei consumi.

4.1.1 Caratteristiche tecniche del veicolo

Il progetto prevede una vettura con le seguenti caratteristiche:

- Peso a vuoto in ordine di marcia: 500 kg;
- Potenza massima richiesta dal gruppo di trazione: 13/16 kW;
- Gestione del gruppo elettrogeno a velocità variabile in funzione della richiesta di potenza;
- Sistema di accumulo a Supercondensatori;
- Consumi inferiori a 2,5 l/100 km;
- Emissioni EURO IV con catalizzatore migliorato;
- Tensione di alimentazione del sistema: 84 V;
- Velocità massima: 70 km/h;
- Accelerazione massima 1.35 m/s²;
- Pendenza superabile: 7% per almeno 4 km;
- Possibilità di superare una rampa di pendenza 17% lunga 30 m.

Le prestazioni richieste, soprattutto le massime sono volutamente superiori ai limiti stabiliti per legge per la categorie dei quadricicli col fine di realizzare un sistema scalabile con facilità anche per la categoria quadricicli pesanti per trasporto merci.

La Urb-e è un veicolo ibrido serie, presenta un motore a combustione (MCI) collegato ad un generatore elettrico in corrente alternata (GE), l'insieme dei due componenti forma il gruppo motogeneratore, unico elemento in grado di fornire potenza elettrica al sistema. Il generatore elettrico è collegato ad un bus di potenza (detto link o nodo), la cui tensione è stata fissata da progetto a 72 V continue, per mezzo di un inverter (inverter AC/DC) il cui scopo è quello di regolare la corrente alternata che il generatore deve immettere nel nodo e quindi la coppia resistente che questo offre al motore termico, inoltre l'inverter trasforma la corrente generata in corrente continua. Sul link si affacciano anche il motore elettrico di trazione (ME) anch'esso in corrente alternata, interfacciato, come accade per il generatore, tramite un inverter AC/DC, che ha invece la funzione di regolare la corrente di trazione richiesta dalla macchina e quindi la coppia motrice alle ruote, ed il pacco di supercondensatori (UCAP), il quale ha lo scopo di fornire energia elettrica al motore di trazione nelle situazioni in cui il generatore elettrico non fosse in grado, stabilizzare il link alla tensione di progetto per permettere il corretto funzionamento del sistema ed accumulare l'eventuale surplus energetico fornito dal gruppo elettrogeno nelle situazioni di bassa potenza richiesta ed immagazzinare l'energia prodotta

dalla frenata rigenerativa. Per permettere la corretta funzionalità degli stessi, tra gli ultracapacitori ed il link è presente un trasformatore di tensione in corrente continua (VBoost).

Una tale architettura porta a delle considerazioni importanti. I supercondensatori non hanno la capacità di fornire energia sufficiente al veicolo per percorrere grandi distanze (2-3 chilometri al massimo), quindi il generatore elettrico deve essere utilizzato per fornire almeno la potenza media richiesta nei transitori e per ricaricare i condensatori una volta terminati tali periodi. I supercondensatori invece hanno lo scopo di coprire i gradienti di potenza elevati che istantaneamente il generatore non sarebbe in grado di erogare. Ne consegue quindi un funzionamento più simile a quello di un veicolo convenzionale, almeno per quanto riguarda le sensazioni del pilota, con il motore termico che presenta un'evoluzione dinamica nel tempo molto influenzata dalle condizioni di guida.

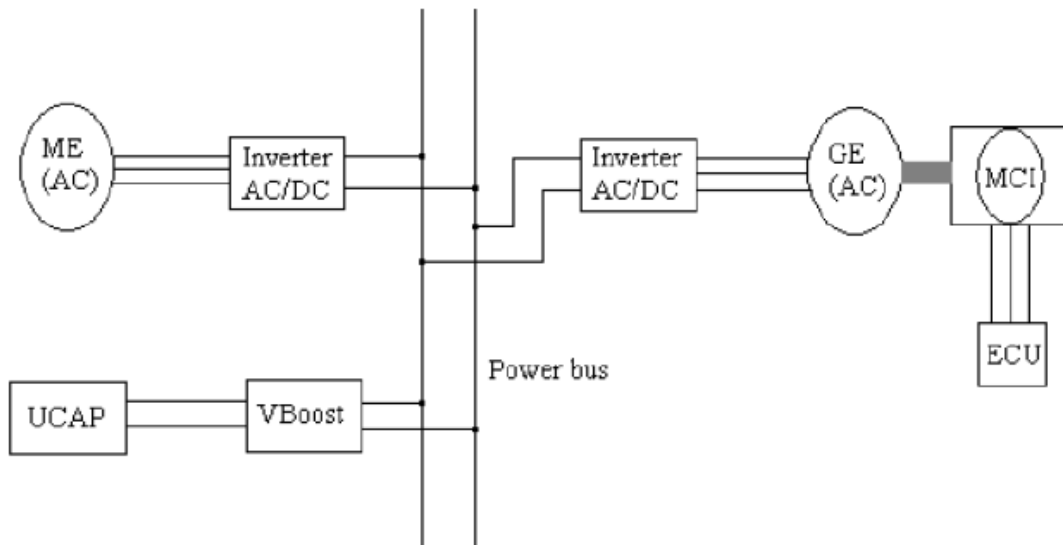


Figura 25 Schema elettrico del veicolo

4.1.2 Telaio

Lunghezza	2,625 m	
Larghezza	1,382 m	
Altezza	1,180 m	
Passo	2,075 m	
Carreggiata ant.	1,3 m	
Carreggiata post.	1,32 m	

Tabella 12 Caratteristiche principali e foto telaio

Costituito da una struttura in tubolari a sezione tonda in Fe-360, è stato progettato in modo da rispondere alla regolamentazione di dimensione e sicurezza prevista per la categoria dei quadri cicli.

4.1.3 Il motore endotermico

E' stato adottato un motore a benzina Piaggio da 250 cc, utilizzato su numerosi modelli della Casa. Si adatta bene alle esigenze del progetto per via dell'elevato rapporto potenza/peso che permette di realizzare un'unità di generazione molto compatta con evidenti vantaggi in termini di peso, parametro fondamentale per minimizzare i consumi.

Marca e modello	Piaggio Quasar
Tipo	Accensione comandata 4 tempi
Cilindrata	Monocilindro da 244,3 cc
Alesaggio	72 mm
Corsa	60 mm
Raffreddamento	A liquido
Distribuzione	4 valvole - SOHC
Potenza massima	16,2 kW (22 CV) @ 8250 giri/min
Coppia massima	20,2 Nm @ 6500 giri/min
Iniezione	Elettronica
Alimentazione	Circuito chiuso con iniezione
Peso	36 kg
Omologazione	Euro 3
Catalizzatore	3 vie

Tabella 13 Specifiche motore endotermico

Per renderlo idoneo all'applicazione sulla Urb-e, il propulsore è stato sottoposto ad alcune modifiche, quali:

- realizzazione di un sistema di regolazione del carico del tipo drive by wire mediante motorizzazione elettrica della farfalla motore
- modifica dei condotti di aspirazione e scarico e la mappatura elettronica per favorire l'elasticità del motore ed adattarlo ad una richiesta di potenza massima molto più bassa di quella erogabile nella sua configurazione normale
- lo scarico inoltre è stato fornito di un catalizzatore di migliore qualità

In questa fase di sperimentazione l'accoppiamento del motore a combustione interna e del generatore elettrico avviene con un rapporto di trasmissione 1:1, ciò significa che il numero di giri del motore termico sarà sempre lo stesso del generatore. Per questo motivo una scelta progettuale molto importante è stata quella di dover limitare il numero di giri del motore termico al regime massimo del generatore elettrico, cioè 5000 giri/min. Di conseguenza anche la potenza massima del motore termico viene limitata a 5 kW e per brevi periodi a 8 kW e la coppia massima a 20 Nm per non rischiare di danneggiare il generatore. Questi ultimi valori saranno quindi i valori massimi di potenza erogabili dal gruppo elettrogeno.

In fase progettuale e all'inizio della fase di realizzazione, per perseguire gli obiettivi del progetto e in particolare quelli relativi ai bassi consumi di carburante, sono state fatte delle simulazioni computerizzate e dei test al banco prova per verificare le caratteristiche di funzionamento del motore termico e ottimizzare il funzionamento del gruppo elettrogeno.

Attraverso l'analisi dei piani quotati del consumo specifico e delle emissioni in funzione della coppia e del numero di giri del motore a combustione interna si sono individuate le zone di funzionamento con i minimi consumi di combustibile e con le minori emissioni inquinanti. I punti operativi scelti per la nostra applicazione sono evidenziati con degli asterischi in figura

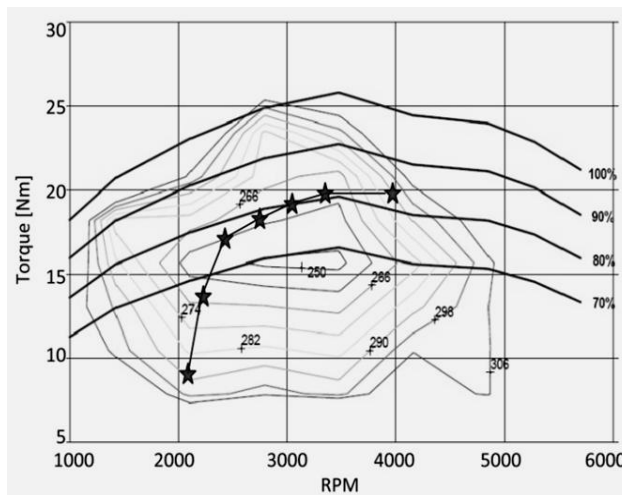


Figura 26 Punti di funzionamento ottimali per il motore termico

4.1.4 Il motore elettrico di trazione

Il motore elettrico di trazione è montato anteriormente in posizione trasversale e collegato alle ruote mediante differenziale a rapporto costante 6:1. È un motore elettrico di tipo sincrono a magneti permanenti, scelta che rende più affidabile e compatta la macchina stessa, appositamente sviluppato. Il motore presenta caratteristiche meccaniche molto adatte all'utilizzo automobilistico, con la possibilità di considerare una potenza nominale pari ad un terzo di quella necessaria ad un motore endotermico per garantire al veicolo Urb-e le medesime prestazioni richieste.

Costruttore	ACM Engineering
Modello	BRL 180/2 8 poli
Tipologia	Sincrono a magneti permanenti
Tensione nominale	48 V
Potenza nominale	8 kW
Potenza massima	14 kW
Coppia nominale	30 Nm
Coppia massima	48 Nm
Regime massimo	4600 giri per minuto
Raffreddamento	A liquido
Peso	25 kg

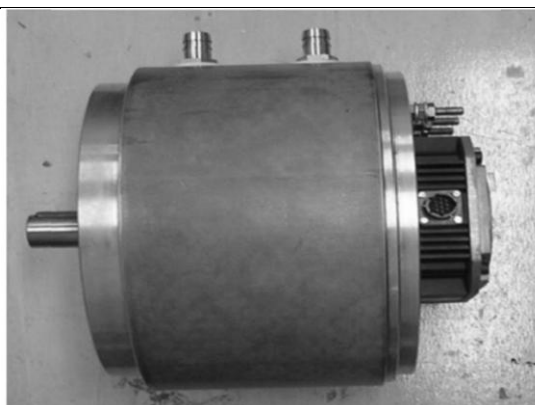


Tabella 14 Caratteristiche principali e foto del motore elettrico di trazione

In figura 27 è riportata la mappa quotata del rendimento del motore elettrico di trazione e l'andamento della coppia massima erogabile rispetto al numero di giri. Si noti che viene mostrato il comportamento del motore anche in funzionamento inverso (coppie negative) cioè

come generatore, caratteristica utilizzata durante la fase di recupero dell'energia cinetica (frenata rigenerativa).

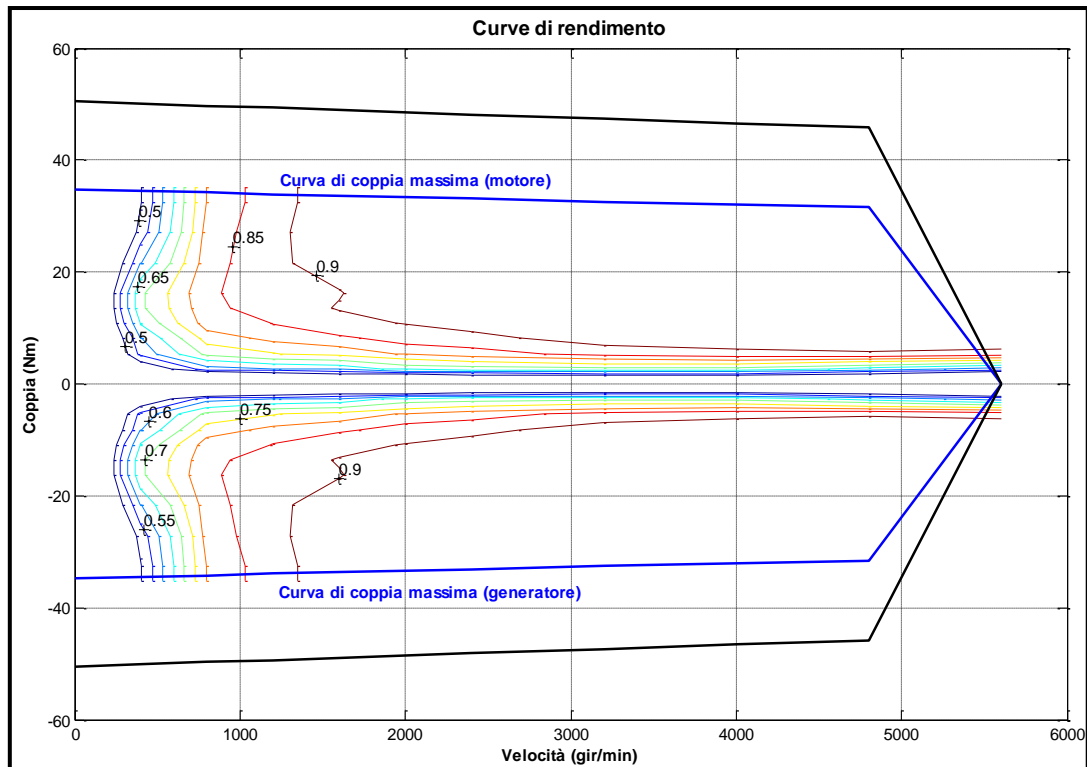


Figura 27 Piano quotato del motore elettrico di trazione

4.1.5 Il generatore elettrico

Così come il motore elettrico, anche il generatore è derivato da una macchina di serie ed è stato appositamente modificato per l'applicazione sul veicolo Urb-e. In particolare sono stati cambiati sia il sistema di raffreddamento che gli ingombri.

Costruttore	ACM Engineering
Modello	BRL 220/1 6 poli
Tipologia	Sincrono a magneti permanenti
Tensione nominale	48 V
Potenza nominale	5 kW
Potenza massima	8 kW
Coppia nominale	20 Nm
Coppia massima	32 Nm
Regime massimo	5000 giri per minuto
Raffreddamento	A liquido
Peso	31 kg

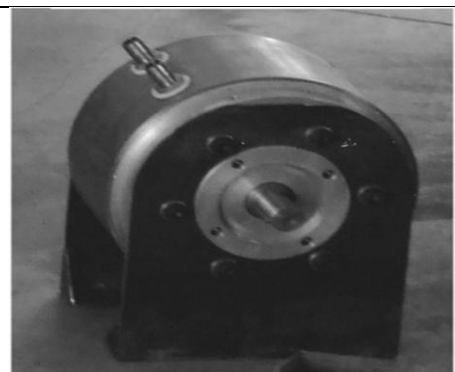


Tabella 15 Caratteristiche principali e foto del generatore elettrico

È collegato al motore termico con un sistema di cinghia e puleggia, scelto in alternativa ad un collegamento diretto con giunto elastico, per consentire in fase di messa a punto la possibilità di variare il rapporto di trasmissione e per ridurre inoltre l'ingombro longitudinale del gruppo motogeneratore.

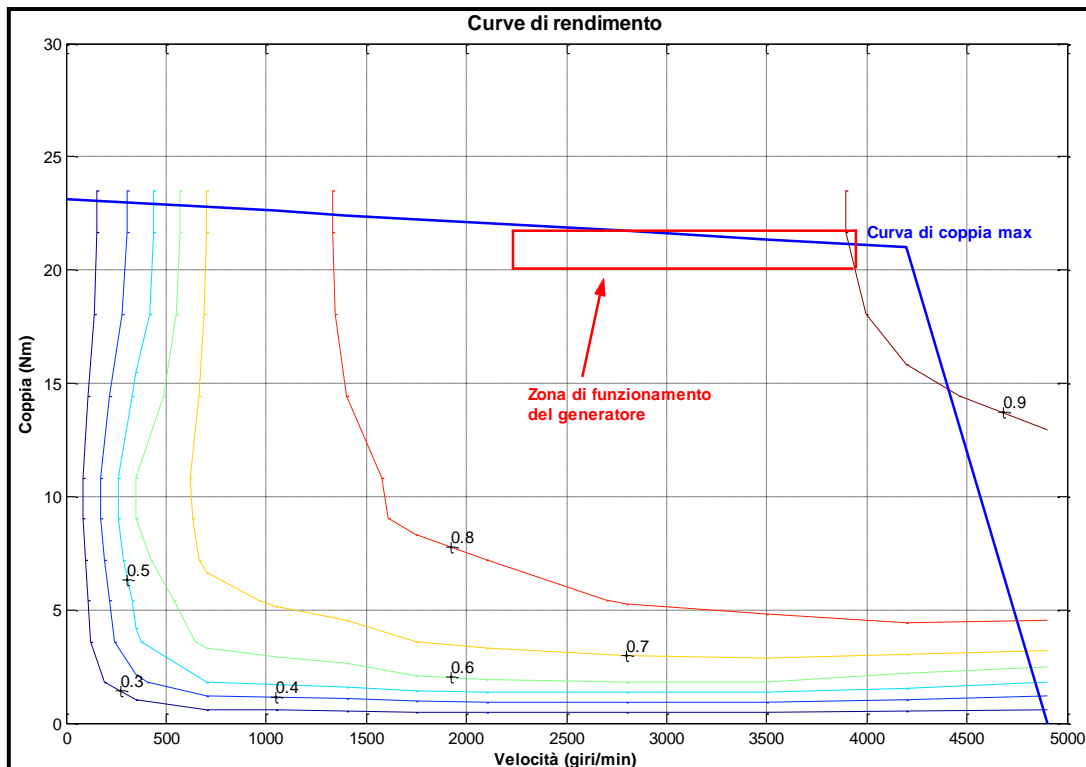


Figura 28 Piano del quotato generatore elettrico

4.1.6 Il sistema di accumulo

Il sistema di accumulo è tra le componenti più importanti nell'architettura di un veicolo ibrido in quanto assolve alla funzione di immagazzinare, a bordo del veicolo stesso, l'energia necessaria alla propulsione. Nel progetto Microcar, si è scelto di impiegare la tecnologia dei supercapacitori. Tale scelta è motivata dalle ottime caratteristiche in termini di leggerezza, affidabilità a diverse temperature e reversibilità, oltre che dall'elevata densità di potenza e dall'elevato numero di cicli di vita tipici di questi apparati. I principali pregi e difetti dei supercapacitori sono riassunti in tabella 16 [20].

Queste peculiarità contribuiscono alla realizzazione di un veicolo realmente leggero con un sistema di accumulo non soggetto ad usura e capace di durare nel tempo almeno quanto il veicolo stesso (10 anni di vita minima). Per le tradizionali batterie, infatti, l'entità dell'energia effettivamente accumulabile non dipende solamente dai rendimenti degli organi interessati, ma anche dai tempi propri delle reazioni elettrochimiche che caratterizzano questa tecnologia. L'intensità di corrente che queste possono sopportare è funzione, a parità di condizioni, dello stato di carica. Inoltre in fase di carica, la corrente accettabile è piuttosto bassa in confronto a quella erogabile in fase di scarica. Caratteristica questa che è sfavorevole nella fase di frenata rigenerativa. È da considerare altresì che sebbene siano in grado di fornire elevati valori di corrente per lunghi periodi, presentano lo svantaggio notevole di essere caratterizzate da pesi elevati e volumi ingombranti. Per finire bisogna dire che sono soggette ad un rapido e facile deterioramento delle prestazioni se sottoposte a sovratensioni, frequenti inversioni di polarità o processi scarica completi. Voglio sottolineare infine che da un punto di vista ambientale i supercapacitori sono anche vantaggiosi per l'assenza al loro interno di sostanza dannose quali metalli pesanti (nichel, cadmio, piombo, ecc..).

Vantaggi	Svantaggi
Alta Potenza Specifica (4-5 kW/kg)	Bassa energia Specifica (5-6 Wh/kg)
Alta densità di Potenza (1.5-2 kW/litri)	Bassa densità di energia (8-10 Wh/litri)
Elevato numero cicli vita (500'000 – 1'000'000 cicli)	Elevate variazioni della tensione durante il funzionamento
Facilità di valutazione dello stato di carica	
Comportamento di carica e scarica simmetrico	
Elevata efficienza	

Tabella 16 Principali vantaggi e svantaggi dei supercapacitori

I moduli installati sul veicolo Urb-e hanno le caratteristiche riportate in tabella 17.


Costruttore	Maxwell	
Modello	BMOD 0500-E0166	
Numero moduli	4 collegati in serie	
Tensione nominale	64,8 V	
Capacità	125 F	
Energia specifica	3,17 Wh/kg	
Potenza specifica	5,4 kW/kg	
Energia di accumulo	72,91 Wh	
Potenza massima	124,2 kW	
Raffreddamento	4,7 litri	
Peso	23 kg	

Tabella 17 Caratteristiche principali dei supercapacitori

4.2 La gestione dei flussi energetici del veicolo

I veicoli convenzionali, quelli che comunemente chiamiamo "macchine", vengono generalmente utilizzati in ampi intervalli di funzionamento. Le condizioni di velocità e potenza richieste nel loro normale esercizio, non rappresentano le condizioni ideali di esercizio per un motore a combustione interna, che per limitare le emissioni inquinanti e avere buoni rendimenti, dovrebbe operare ad un regime di rotazione e con una coppia pressoché costanti. A questo dobbiamo aggiungere le perdite di energia durante le fasi di transizione, per vincere gli attriti e le resistenze, e durante le decelerazioni e le frenate, per mezzo dei freni meccanici, senza contare l'energia consumata dal veicolo "al minimo" durante i periodi di fermata con motore acceso. Queste circostanze rendono l'utilizzo del motore a combustione interna molto svantaggioso in termini di efficienza, cioè lo sfruttamento del combustibile che consumiamo nelle nostre "macchine" per spostarci è altamente dispendioso dal punto di vista energetico.

L'idea che sta alla base dei propulsori ibridi è quella ottimizzare il profilo di potenza generata dal motore a combustione interna, provvedendo a produrre una sorta di valore medio della

potenza richiesta e, ricorrendo ad un sistema di accumulo appropriato, da una parte ad erogare la potenza in più che serve a coprire i carichi di punta, dall'altra ad accumulare la potenza prodotta in eccesso, o meglio recuperata, in fase di frenata, fermata e periodi di bassa richiesta, oltre che, eventualmente, per marciare a motore primario spento in zone particolari come, ad esempio, i centri urbani.

Lasciando al motore termico principalmente la funzione di conversione dell'energia, si ottiene un miglior rendimento sia del motore stesso, che viene progettato ed ottimizzato per operare in una ristretta regione di funzionamento, sia della propulsione (generazione di potenza) che può essere gestita in modalità solo elettrica, termica o accoppiata, in funzione della configurazione del veicolo e delle necessità di marcia. L'ibridazione consente poi di evitare in tutte le partenze dell'auto, e quindi anche a freddo, il funzionamento in potenza del motore termico, grazie alla possibilità di marciare a bassa velocità con la sola macchina elettrica, contribuendo a ridurre radicalmente le emissioni inquinanti.

La presenza di sistemi di accumulo offre la possibilità di recuperare l'energia dissipata durante le frenate, con risparmi dell'ordine del 20%, prevalentemente nelle tratte urbane, caratterizzate da frequenti frenate/ripartenze.

In quasi tutte le tipologie di ibrido è possibile viaggiare in modalità "solo elettrico": il sistema di accumulo, se sufficientemente dimensionato, consente la possibilità di percorrere alcuni chilometri, con una flessibilità d'impiego maggiore sia rispetto al veicolo convenzionale che a quello "elettrico puro", che rimane inevitabilmente limitato nell'autonomia nella maggior parte degli usi. Quando viene azionata questa modalità, le emissioni inquinanti sono nulle e la rumorosità del veicolo è molto ridotta.

Un altro vantaggio è la capacità di spegnere il motore termico quando non è necessario, ad esempio durante le soste nel traffico o nei semafori. Questa modalità viene chiamata "idle-off".

Nel complesso le prestazioni di questi veicoli sono del tutto comparabili con quelle dei veicoli tradizionali, con una riduzione dei consumi e delle emissioni. Per contro però esistono degli svantaggi che non hanno ancora permesso la diffusione di questa tecnologia quali:

- la necessità di due sistemi di alimentazione
- la sofisticata elettronica di gestione di tali sistemi

che a tutt'oggi comportano una forte lievitazione dei prezzi. A parità di potenza, in effetti, il costo di un veicoli ibrido è quasi doppio di quello di uno convenzionale.

4.2.1 Efficienza del veicolo

Le considerazioni fatte nel precedente paragrafo portano all'introduzione del concetto di efficienza del veicolo ibrido, definita come rapporto tra lo spazio percorso dal veicolo ed il consumo equivalente di combustibile, somma del consumo effettivo di carburante e dell'energia elettrica [21]. L'efficienza è influenzata fortemente dallo stato di carica del sistema di accumulo che, a sua volta, ha una grande influenza sulle performance del veicolo.

In figura 29 è rappresentata un'analisi di efficienza di un generico veicolo ibrido in funzione del suo stato di carica per un ipotetico percorso a gradini. Quando il SOC è prossimo al 100%, la ricarica dell'accumulatore è inibita, penalizzando sia la frenata rigenerativa sia la gestione ottimale del motore termico. Considerazioni opposte possono farsi se il SOC è prossimo o al disotto del valore minimo consentito, in queste condizioni è la macchina elettrica che viene inibita, penalizzando sempre la gestione del motore termico che dovrà provvedere interamente alla propulsione del veicolo.

Gli effetti della variazione dello stato di carica possono essere riassunti nella seguente maniera:

- la peggiore efficienza è osservata quando lo stato di carica è molto basso (inferiore ai valori minimi consentiti), questo causa una pessima utilizzazione del motore termico che deve sopperire integralmente alle variazioni di carico richieste
- le condizioni migliori si verificano quando lo stato di carica assume un valore intermedio, in quanto non ci sono limitazioni alla strategia ottima di controllo
- quando lo stato di carica è prossimo al valore massimo, la gestione del motore termico non è ottimale in quanto non è possibile compensare il surplus di energia, che è in grado di fornire, attraverso la ricarica delle batterie.

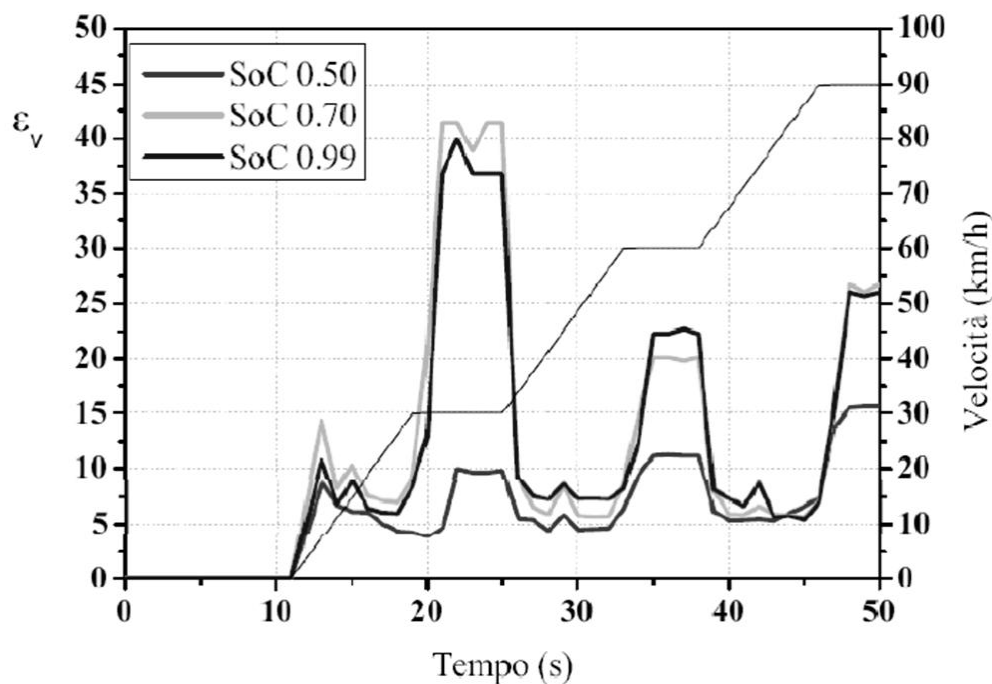


Figura 29 Andamento dell'efficienza di un veicolo ibrido generico per un percorso a gradini

E' da tener presente che le considerazioni fatte sono di carattere generale e rappresentano un ipotetico utilizzo ottimale del sistema ibrido. Appare evidente quindi come la gestione del veicolo ibrido sia una questione fondamentale. Visto che le scelte fatte hanno influenza in tutti gli ambiti della funzionamento del veicolo stesso, è chiaro come ogni aspetto deve essere pertanto considerato dipendente dagli altri e viceversa.

4.2.2 Scelta dei supercapacitori

La scelta del sistema di accumulo dell'energia elettrica rappresenta il primo passo nella definizione della gestione del veicolo. Attualmente vengono studiati e realizzati sistemi di accumulo:

- con batterie
- con supercondensatori
- misto

A seconda del tipo di accumulatore che viene utilizzato cambiano radicalmente le disponibilità energetiche del veicolo, la capacità di potenza fruibile alla trazione, l'autonomia ed il peso del veicolo. È quindi necessario individuare una modalità di gestione dei flussi energetici che sfrutti al meglio le caratteristiche del sistema scelto.

Un veicolo ibrido a supercondensatori come la Urb-e implica un comportamento molto influenzato dalle modalità con le quali si opera l'interazione tra motogeneratore e supercondensatori. Tanto più lenta si sceglie la dinamica del generatore, tanto più alto sarà il carico energetico che dovrà essere fornito dal sistema di accumulo. Viceversa, se si sceglie una dinamica veloce del motogeneratore, il contributo dei condensatori alla trazione sarà basso. Nella figura 30 si possono distinguere i due casi.

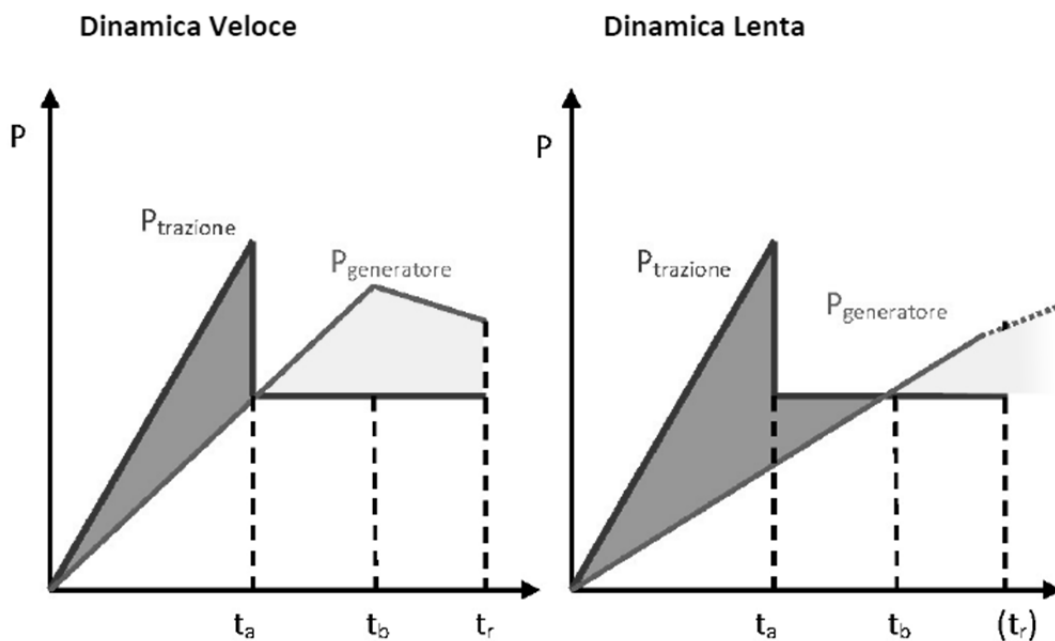


Figura 30 Dinamico del sistema di accumulo di energia

Supponiamo una richiesta di accelerazione di durata t_a seguita da un periodo a velocità costante. Rappresentando in rosso la potenza necessaria alla trazione ed in blu quella fornita dal generatore si può notare come una dinamica più veloce comporti un minor apporto di energia da parte dei supercondensatori, indicata in verde e di conseguenza un minor tempo di ricarica che deve essere realizzato quando la richiesta di potenza scende. L'area di colore giallo è appunto il surplus di energia che il generatore fornirà per la loro ricarica.

Dagli studi effettuati dallo stesso Centro di Ricerca Enea, nell'ambito dei veicoli ibridi a celle combustibile, deriva una tendenza a considerare tutte le condizioni di marcia del veicolo (accelerazione, guida a velocità costante, frenatura) nello stesso modo. Effettivamente, considerando la potenza richiesta al motogeneratore come un flusso energetico continuo, a prescindere da quale organo del veicolo e in quale percentuale viene richiesta, il problema si riduce ad un inseguimento di carico.

Bisogna tener conto del fatto che i supercondensatori si comportano, a seconda delle condizioni di marcia, alternativamente come una richiesta di carico alla quale il motogeneratore deve far fronte ovvero come un aiuto al motogeneratore stesso, fornendo potenza necessaria alla trazione. Quindi i calcoli di gestione devono essere effettuati con l'obiettivo di realizzare

una dinamica sufficientemente equilibrata, capace di sfruttare la ridotta densità energetica di questo tipo di sistema di accumulo.

Scegliere le modalità con cui la potenza deve essere suddivisa tra motogeneratore e supercondensatori equivale a realizzare un "filtro" che ponga delle restrizioni alla dinamica del motore termico e la scelta di una legge di ricarica dei supercondensatori. Per fare un esempio pratico: se nei transitori di potenza i supercapacitori forniscono una certa quota di potenza, devono poi essere ricaricati in un tempo relativamente basso, per permettere sempre le migliori condizioni di guida e non lasciare mai il guidatore senza la potenza necessaria alle sue richieste di guida. La scelta di un sistema di accumulo a soli supercondensatori e la conseguente gestione dei flussi energetici risulta molto complessa, in modo da rendere il più possibile stabile il funzionamento del motogeneratore, senza tuttavia lasciare il sistema di accumulo in condizioni di riserva di energia troppo bassa.

Inoltre bisogna tener conto che i supercondensatori, per essere "sfruttati" al meglio, devono lavorare in un campo ristretto di tensione. Nel caso specifico della Urb-e la tensione può variare tra i 36 e i 60 V, ossia tra uno stato di carica (SOC) compreso tra il 55% ed il 90%. Questo perché sotto la soglia minima i condensatori non sono più in grado di mantenere la tensione del link sufficientemente elevata per permettere il corretto funzionamento delle macchine elettriche (inverter e DSP). Se, d'altra parte, la tensione cresce troppo, i condensatori non sono più in grado di accumulare ulteriore carica, e al contrario delle batterie convenzionali, che hanno la capacità di accumulare correnti in sovraccarico, si deteriorano velocemente. Per questo motivo è stata definito uno "stato di carica obiettivo" attorno al quale mantenere la zona di funzionamento dei supercondensatori, in modo da ottimizzarne le operazioni.

Studi preliminari sui supercondensatori hanno individuato una fascia di utilizzo ottima compresa tra il 90% ed il 70% di carica massima, in cui il rendimento dell'inverter non scende mai sotto il 94%, mentre per tensioni più basse questo decresce rapidamente anche al diminuire della corrente fornita. È stata fissata una tensione di 50/55 V (SOC 75%), in modo da lasciare anche un buon margine per realizzare la frenata rigenerativa che per un veicolo urbano comporta un considerevole apporto energetico "gratuito", che permette di ridurre l'intervento del generatore.

4.3 Strategia di controllo del gruppo motogeneratore

Il motogeneratore è il componente fondamentale della Urb-e, il suo scopo è quello di fornire la potenza elettrica necessaria alla trazione e alla carica dei supercondensatori, affinché vengano ottemperate le richieste del pilota senza alcuna restrizione e senza mettere in pericolo la "stabilità" del sistema. La centralità di questo componente è altresì dovuta al fatto che attraverso un'oculata gestione dello stesso è possibile ridurre al minimo le variazioni di potenza che deve fornire e conseguentemente ridurre significativamente i consumi di combustibile.

Proprio per le peculiarità del sistema a supercondensatori, caratterizzato da una grande potenza disponibile ma da una bassa densità di energia, per la gestione del gruppo elettrogeno è stato scelto il metodo di "inseguimento del carico", dove per carico si intende la richiesta di coppia meccanica/elettrica da fornire. Le principali modalità operative che possono essere attuate sono essenzialmente due:

- controllo a carico costante
- controllo a carico variabile

Le variabili su cui si può agire sono il regime di rotazione del gruppo motogeneratore, la coppia resistente offerta dal generatore elettrico e il carico del motore termico espresso come parzializzazione della valvola a farfalla. Infatti è possibile considerare il carico in ogni istante linearmente proporzionale alla coppia erogata, indipendente dal numero di giri e, nei motori ad accensione comandata, corrisponde all'apertura della valvola a farfalla. In altre parole la posizione della valvola a farfalla influenza direttamente la coppia erogata: se il carico diminuisce, cioè la valvola a farfalla viene chiusa, la curva di coppia erogata viene traslata verso il basso in modo proporzionale alla variazione del carico all'interno del piano quotato considerato.

4.3.1 Logica di controllo a carico costante

La gestione a carico costante consiste nel tenere la posizione della valvola a farfalla fissa al valore che massimizza l'efficienza del motore e far variare la coppia resistente offerta dal generatore elettrico accoppiato al motore termico. I vantaggi di questo tipo di gestione sono l'utilizzo del motore a combustione interna in condizioni controllate che ne ottimizzano l'efficienza e l'assenza di un sistema di regolazione del corpo farfallato. Lo svantaggio sta nella gestione del transitorio difficoltosa se non è nota la curva di carico, e nell'introduzione di un apparato che sia in grado di variare la coppia resistente del generatore. Inoltre bisogna tener presente che questo tipo di logica può essere utilizzato solo in condizioni di stabilità e quindi occorre tenersi lontani da tutti quei fattori di utilizzo che possono portare all'instabilità del sistema stesso.

Si supponga che il funzionamento del motore termico sia indicato in figura 31 dal punto 1, in corrispondenza della potenza erogata P_1 e del numero di giri n_1 . Il valore della coppia C_1 è individuato dalla curva di coppia resistente che rappresenta il carico imposto dal generatore. Finché la potenza erogata dal generatore è pari a P_1 si è in una condizione di equilibrio in quanto la coppia erogata e quella resistente si equilibrano. Si supponga ora di voler far aumentare la potenza erogata dal motore termico fino al valore P_2 , mantenendosi dentro la zona di funzionamento ottimale: la logica di gestione a carico costante impone di spostarsi fino al punto 2 seguendo la curva di coppia a carico costante. Per far ciò è necessario introdurre uno squilibrio nel sistema e attraversare un transitorio in cui la coppia resistente e la coppia erogata non coincidono più. Si supponga per esempio di ridurre in modo istantaneo da C_1 verso C_2 la coppia resistente del generatore in modo che si crei una differenza di coppia tra quella erogata dal motore e quella imposta dal generatore. Abbassandosi la coppia resistente, il motore termico accelera, cioè il suo regime di rotazione passa da n_1 rpm verso n_2 rpm, mantenendo comunque costante il carico del motore termico. Per evitare che il motore acceleri eccessivamente e si porti in condizioni diverse da quelle descritte dal punto 2 è necessario che si ripristini un equilibrio stabile stavolta nel punto 2. Ciò è possibile farlo intervenendo nuovamente sulla regolazione della coppia del generatore la cui diminuzione deve essere bloccata al valore C_2 . In tal modo la coppia erogata dal motore riequilibrerà la coppia resistente e si instaurerà una nuova condizione di equilibrio ad un diverso regime di giri e di potenza erogata.

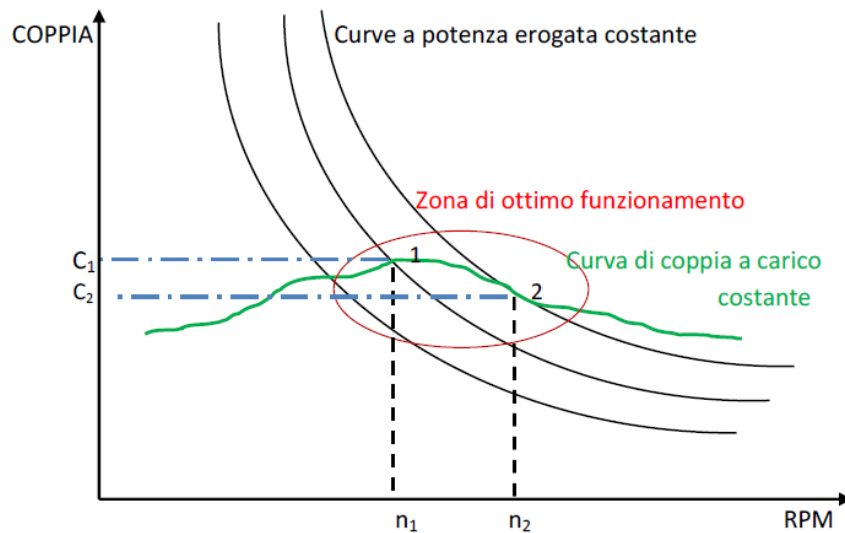


Figura 31 Logica di gestione a carico costante

Stabilità ed instabilità del carico

Come accennato in precedenza, se il funzionamento del sistema passa dalla zona a coppia decrescente a quello a coppia crescente, si entra in una condizione di funzionamento instabile. Si immagini per esempio di voler passare dal punto 1 al punto 3 di figura 32. La coppia resistente deve esser fatta diminuire per passare da C_1 a C_3 , ma stavolta, se si mantiene il carico costante, il motore anziché rallentare tende ad accelerare, poiché la nuova coppia resistente, durante la regolazione, resta sempre più bassa di quella fornita. Questa situazione rende impossibile il raggiungimento della condizione di equilibrio desiderata perché le due coppie non riusciranno più ad eguagliarsi. La stessa cosa si verifica se si vuole risalire dal punto 3 al punto 1: se la coppia resistente viene fatta aumentare, a parità di carico, il numero di giri decresce, mentre la coppia erogata decresce anch'essa; diventa quindi impossibile far crescere il numero di giri.

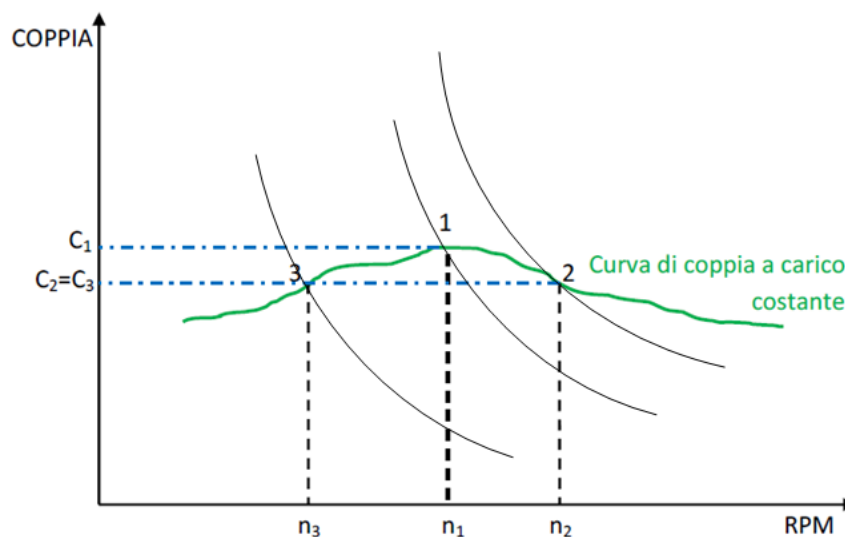


Figura 32 Stabilità ed instabilità del carico

Si descrivono sinteticamente questi due comportamenti del gruppo elettrogeno attraverso il concetto di stabilità: il tratto decrescente della curva di coppia a carico costante rappresenta le condizioni in cui si ha il comportamento stabile, in quanto permette di raggiungere l'equilibrio tra la coppia resistente del generatore e la coppia erogata dal motore; viceversa il tratto crescente della curva descrive il comportamento instabile in quanto non è possibile raggiungere un equilibrio tra le due coppie. Nel funzionamento stabile, un piccolo aumento di coppia resistente riesce sempre ad essere bilanciata da quella del motore, quindi se si vuole perturbare l'equilibrio, l'entità dello squilibrio prodotto deve essere decisa in funzione della posizione effettiva del punto di arrivo. Viceversa in caso di funzionamento instabile basta una minima variazione della coppia resistente per avviare la fase di transizione, indipendentemente dal punto in cui si vuole arrivare. Queste problematiche hanno portato ad alcune considerazioni sulla validità legate alla logica di gestione descritta.

4.3.2 Logica di controllo a carico variabile

La gestione a carico variabile prevede di far variare la parzializzazione della valvola a farfalla mantenendo costante la coppia esercitata dal generatore. Il vantaggio principale offerto da questa logica di gestione è rappresentato dal fatto che il generatore viene fatto lavorare a coppia costante per cui non richiede un sistema di regolazione e si evitano anche tutte le problematiche che possono sorgere durante i transitori a causa del funzionamento discontinuo della macchina elettrica in termini di carico. Per contro è necessario realizzare un meccanismo per la regolazione della valvola a farfalla che viene comandato elettronicamente dalla centralina di gestione.

Supponiamo che il motore lavori nelle condizioni descritte dal punto 1 di figura 33, in corrispondenza di un numero di giri pari a n_1 , una potenza erogata pari a P_1 ed un carico definito da una certa apertura della valvola a farfalla. A tale situazione corrisponde una coppia resistente del generatore pari a CR . Si assuma ora di voler aumentare la potenza prodotta dal motore da P_1 fino a P_2 , facendo variare il carico e tenendo costante la coppia resistente. Si fa innanzitutto aumentare l'apertura della valvola a farfalla di una quantità x in modo che, mentre la coppia resistente del generatore rimane fissa, quella erogata dal motore, che nelle condizioni di equilibrio la uguagliava, cresce (la curva di carico trasla verso l'alto). In questo modo si verifica uno squilibrio tra le due coppie e ciò dà la possibilità al motore termico di accelerare da n_1 verso n_2 rpm (aumentando l'apertura della valvola a farfalla aumenta la quantità di combustibile bruciato e di conseguenza aumentano il numero di giri e la potenza). Quando, spostandosi lungo la curva a carico superiore, il motore raggiunge il numero di giri desiderato (n_2) è necessario fare una seconda regolazione sul carico, riportando la valvola a farfalla all'apertura che permette di ottenere una coppia erogata pari a quella resistente. In tale nuova situazione di equilibrio l'apertura della valvola a farfalla risulta più alta di quella iniziale e la potenza erogata dal motore risulta pari a P_2 . Lo stesso sistema eseguito in senso opposto può essere adottato per passare dalla potenza P_2 a quella P_1 . Come nel caso precedente, anche in questo bisogna tener conto della stabilità di funzionamento verificando l'andamento delle curve di coppie per i vari carichi imposti; inoltre è da tenere presente che tanto maggiore sarà lo squilibrio di coppia che si genera regolando l'apertura della farfalla, tanto più veloce è la variazione del numero di giri, è quindi necessario regolare la valvola a farfalla in modo opportuno per mantenere il sistema stabile e tenere sotto controllo i consumi.

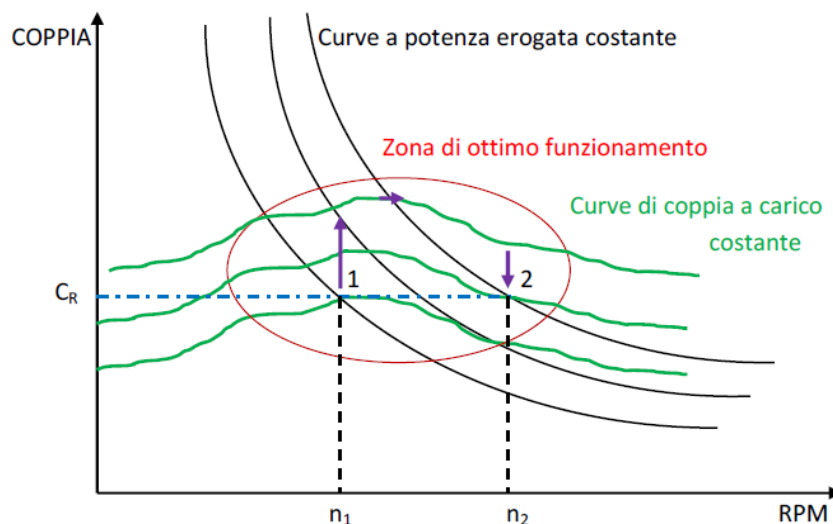


Figura 33 Logica di controllo a carico variabile

4.3.4 La logica di controllo adottata per il veicolo Urb-e

La logica di gestione che si è deciso di adottare è in realtà un misto delle due strategie appena illustrate [22], in quanto si ritiene che utilizzandole entrambe si possa ottenere un'ottima gestione del gruppo elettrogeno in qualsiasi situazione si possa trovare.

Una logica "dinamica" risponde in maniera idonea alle condizioni di marcia che ci si aspetta che varino piuttosto frequentemente durante la guida, principalmente per un veicolo pensato per un uso cittadino, per cui il gruppo elettrogeno si troverà raramente a lavorare stabilmente in un punto di equilibrio ben determinato. Inoltre la presenza dei supercondensatori permette solo di tamponare le richieste di potenza della trazione e non hanno l'energia sufficiente a sostituirlo, il loro scopo è pertanto quello di rendere le variazioni di potenza del generatore più lenta "dolce".

Sarà inoltre necessario individuare una serie di condizioni di ottimo per ogni diversa condizione di marcia attorno ai quali far lavorare il gruppo. Immaginiamo che la retta in rosso in figura 34 rappresenti tutte le combinazioni ottimali di coppia resistente e numero di giri ad ogni regime di potenza. Questa curva viene determinata per punti mediante simulazioni e test al banco e rappresenta il percorso a minor consumo specifico per il motore termico. Per passare dal punto 1 con potenza P_1 al punto 2 con potenza P_2 si sceglie di seguire la strada rappresentata dalle frecce: si agisce prima sulla coppia resistente del generatore attraverso un transitorio rappresentato dalla freccia orizzontale, poi si agisce sull'apertura della valvola a farfalla regolando il carico del motore termico durante il transitorio rappresentato dalla freccia verticale.

Si è scelta questa modalità di intervento perché agire prima sulla coppia resistente e poi sul carico semplifica la regolazione del sistema e quindi la sua stabilità. L'ideale sarebbe in realtà rendere i transitori rappresentati dalle frecce i più brevi possibile. In tal modo si ottengono una serie di gradini di piccole dimensioni che approssimano la curva rossa non percorribile attraverso un'unica regolazione contemporanea dei due parametri. Lo stesso sistema può essere seguito nel caso in cui si voglia diminuire la potenza erogata dal motore.

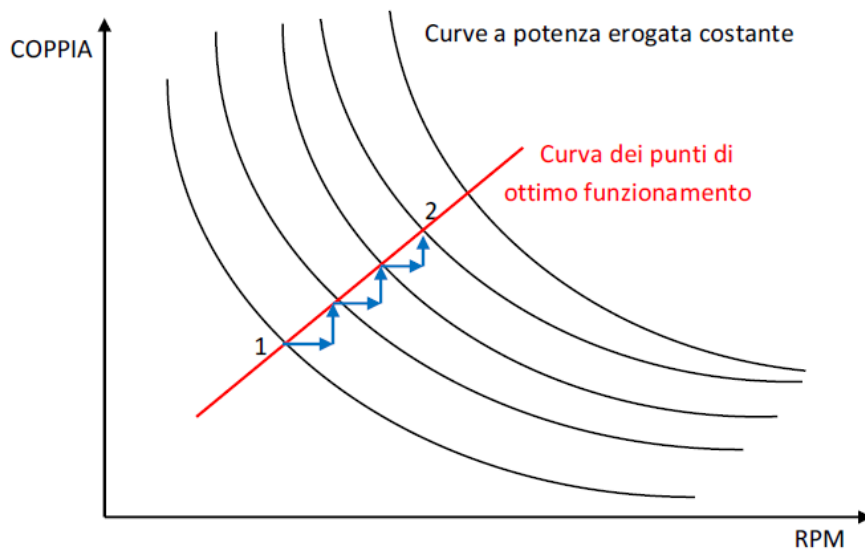


Figura 34 Logica di controllo adottata

4.4 Il codice di gestione del veicolo Urb-e

Il codice di gestione, di cui in figura 35 è riportata un diagramma di flusso, si compone di cinque sezioni principale, che si occupano di:

- Ricevere le informazioni dai sensori del veicolo (Can Receive)
- Elaborare le informazioni e le richieste del guidatore e determinare le condizioni energetiche ideali (Logica di Gestione)
- Controllare la potenza elettrica generata mediante un riferimento di coppia ed uno di velocità (Controllo Gruppo Motogeneratore)
- Inviare le richieste al motore di trazione ed al generatore (Can Send)
- Calcolare tutti i parametri di marcia (Parametri di Viaggio)

Il linguaggio scelto per realizzare il sistema è il C/C++ utilizzato dai programmi informatici "Simulink" ed "XPcTarget" della suite Matlab. La scelta di utilizzare Simulink è stata dettata dal suo funzionamento come GUI (Grafic User Interface) che lo rende molto semplice da utilizzare oltre che funzionale. Si è tenuto anche in considerazione la presenza delle applicazioni già realizzate e dell'ampia compatibilità con numerosi componenti hardware, tra i quali quelli che sono stati scelti per il veicolo.

Per rendere possibile la visualizzazione e la gestione in tempo reale dei dati, per effettuare quelle che sono le procedure di inizializzazione del sistema elettrico ed altre funzionalità accessorie, è stato appositamente realizzata un'interfaccia "user friendly", riportata in figura 35, molto simile ad un cruscotto automobilistico, con tutti gli indicatori utili al guidatore. Questo è possibile grazie all'utilizzo di un car-pc che funzioni da "host" capace di ricevere ed acquisire i dati elaborati direttamente dalla centralina di bordo e di uno schermo a cristalli liquidi TFT con funzionalità touch screen.

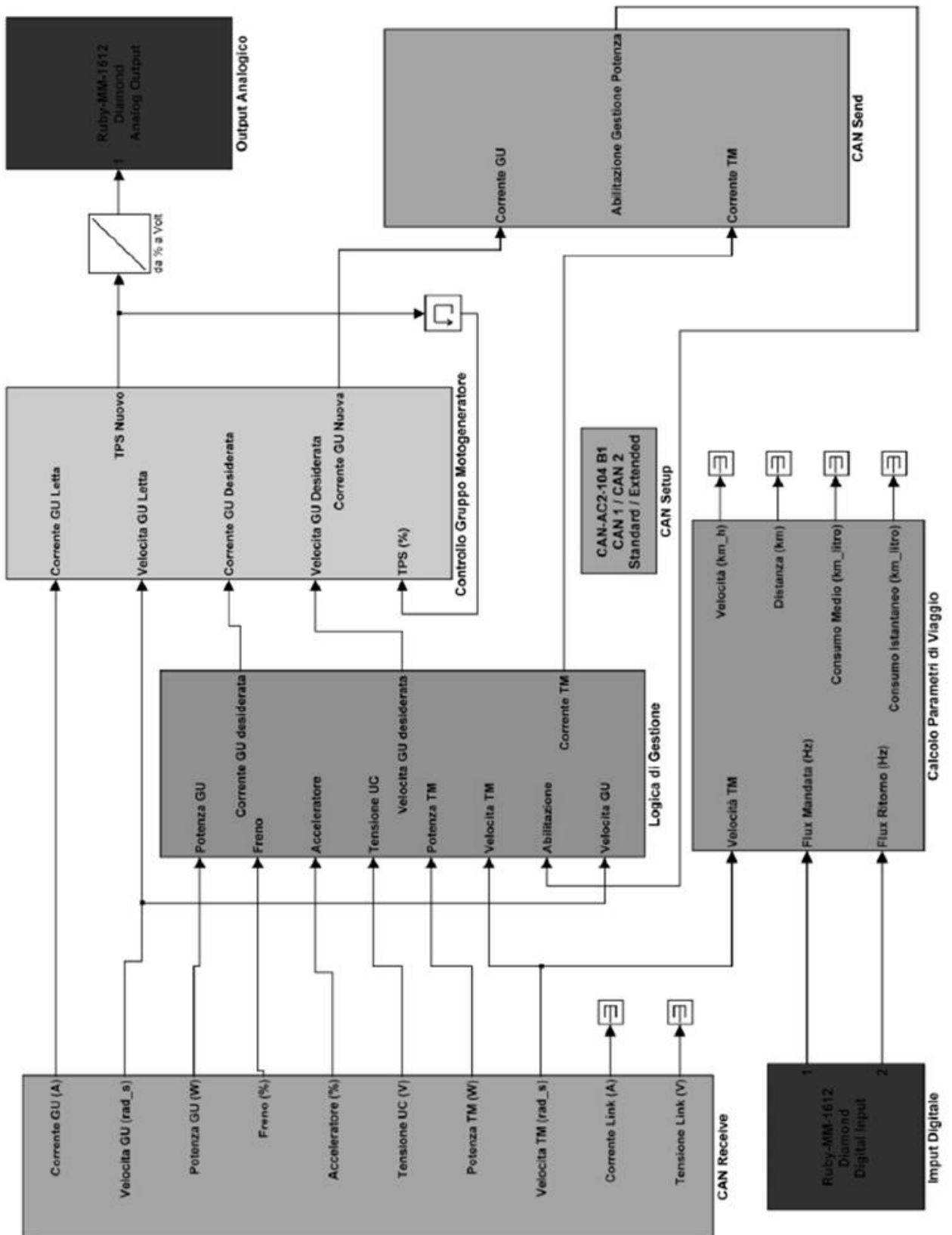


Figura 35 Diagramma di flusso del codice di gestione del veicolo

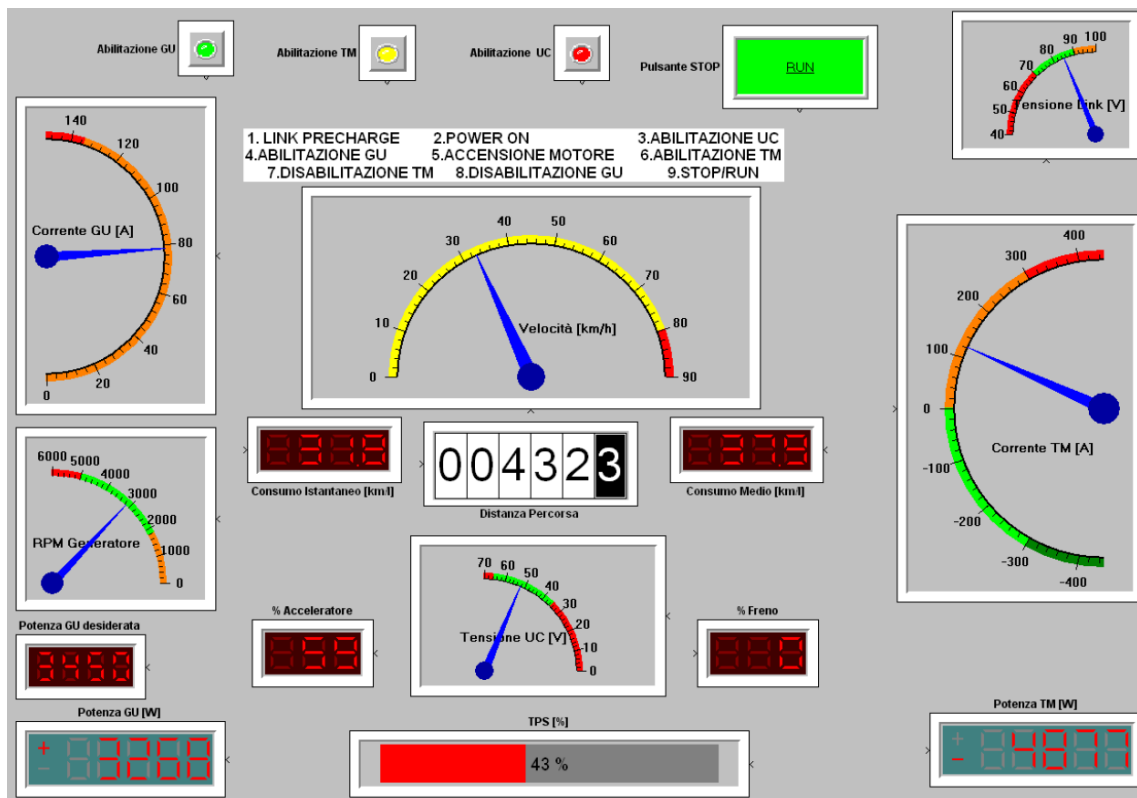


Figura 36 Interfaccia grafica codice di gestione

4.4.1 Trasmissione dati

Il sistema di trasmissione dati, sviluppato dal Dipartimento di Elettrica e Gestione della Potenza dell'Università di Roma3, è realizzato sotto forma di flusso di dati digitale attraverso un Bus a 64 bit di tipo CAN. Si compone di due sotto sezioni distinte che si occupano l'una, "CAN RECEIVE" di ricevere i dati del veicolo, e l'altra, "CAN SEND", di inviare i dati principalmente alla centralina di controllo per il processamento e l'elaborazione dati di gestione dei vari componenti.

Blocco RECEIVE

Riceve tutti i segnali letti dai sensori installati a bordo del veicolo:

- Corrente e tensione di Link
- Tensione dei Supercapacitori
- Freno
- Acceleratore
- Velocità del Motore di Trazione
- Corrente del Generatore
- Velocità del Generatore

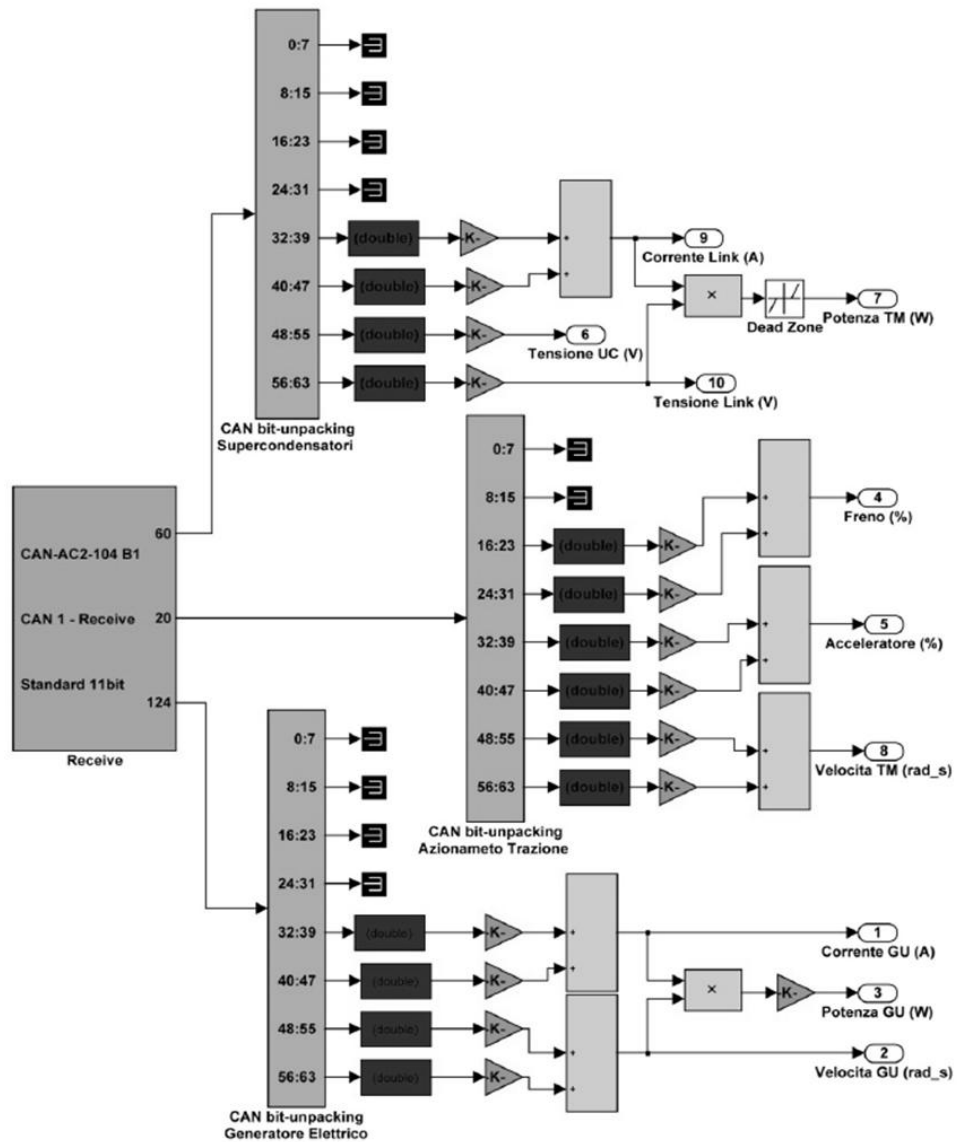


Figura 37 Blocco RECEIVE

Blocco SEND

Invia i dati che sono stati elaborati della centralina Prometheus ai rispettivi componenti del veicolo. I principali controlli sono:

- Abilitazione supercapacitori
- Abilitazione motore di trazione
- Abilitazione generatore
- Corrente motore di trazione
- Corrente generatore
- Corrente supercapacitori

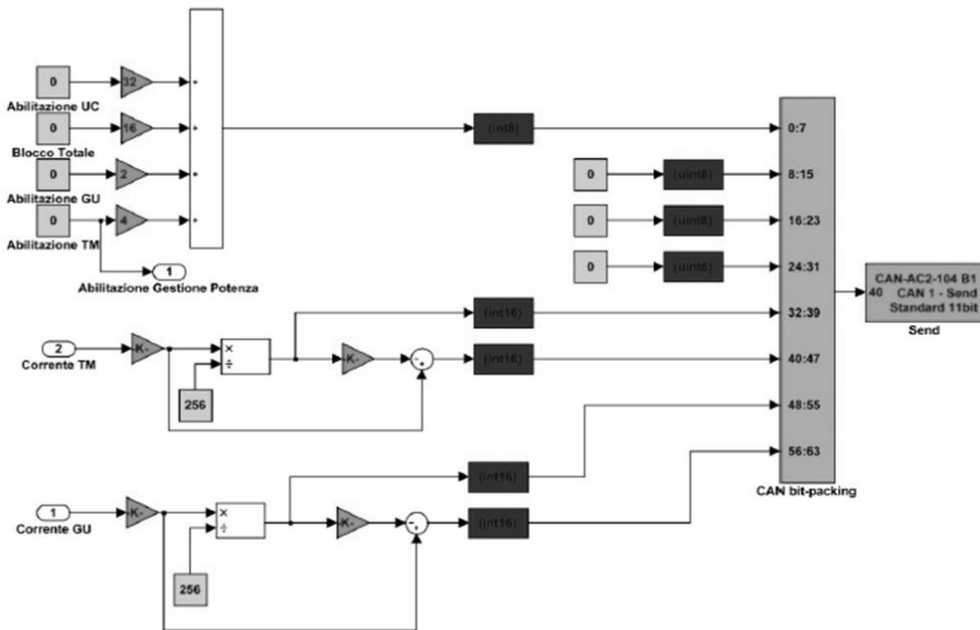


Figura 38 Blocco SEND

4.4.2 Logica di gestione dei segnali acquisiti

La gestione del veicolo è interamente contenuta in questa sezione. E' possibile osservare il flusso dei dati che vengono gestiti dalla centralina di controllo Prometheus: a sinistra sono presenti tutti i parametri di input, a sinistra quelli in output (figura 39). Si è scelto di affrontare il problema dei flussi energetici suddividendolo in tre condizioni di funzionamento:

- marcia normale
- frenata rigenerativa
- freno motore

Questo modo di ragionare è in accordo con quanto detto nel capitolo precedente dal momento che è stato considerato un flusso energetico principale che è quello che viene apportato dal generatore e corrisponde alla condizione "marcia normale", ed è su questo che si basa il concetto di filtro. Gli altri due casi sono considerati ausiliari e rappresentano un aiuto a quello principale solo in date condizioni, perciò si è preferito introdurre dei vincoli di tipo on-off che abilitano questi contributi energetici.

Le condizioni di vincolo sono racchiuse nel blocco "if-else" e sono rappresentate dalla velocità del motore di trazione, dalla posizione del pedale dell'acceleratore e dalla posizione del pedale del freno. Le posizioni di acceleratore e freno vengono utilizzate come monitoraggio delle condizioni attuali di marcia, mentre la velocità del motore di trazione rappresenta la condizione limitante per la frenata con rigenerazione. È prevista infatti una velocità minima del motore elettrico sotto la quale è impossibile effettuare rigenerazione, a causa della bassa tensione di esercizio (la tensione è proporzionale alla velocità di rotazione) che non permette la produzione di corrente desiderata da parte dell'inverter. Tale velocità limite per il caso in questione è stata valutata attorno ai 105 rad/s che equivalgono ad una velocità del veicolo di circa 15 km/h.

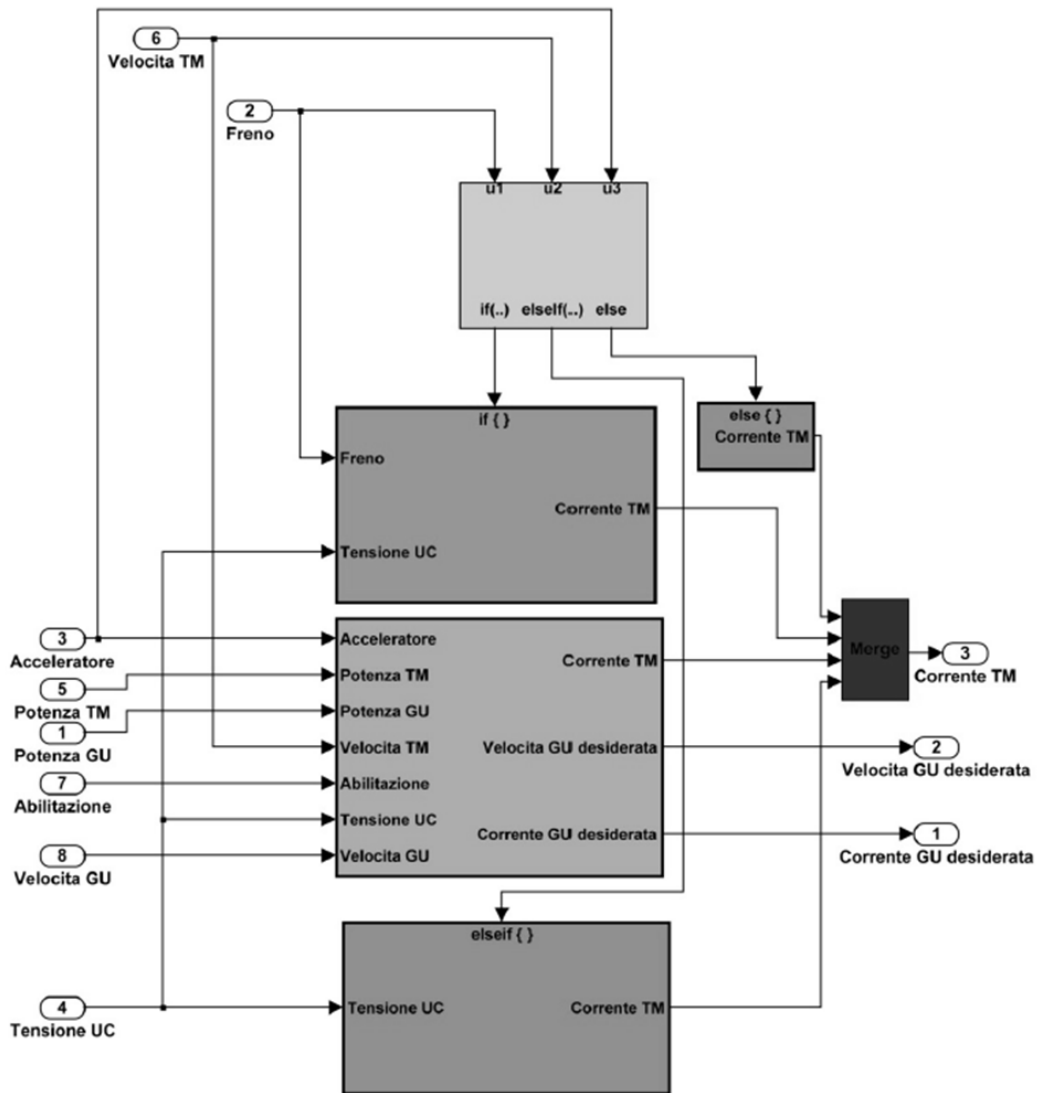


Figura 39 Diagramma di flusso della logica di gestione dati nella centralina di controllo

4.4.3 La frenata rigenerativa

La frenata rigenerativa si attiva quando il pedale del freno è premuto almeno per il 5% ed il pedale dell'acceleratore è rilasciato. Per evitare il sovraccarico dei condensatori si è scelto di fermare la rigenerazione quando la tensione del sistema di accumulo raggiunge i 60 V, ovvero un SOC pari al 92%. Per quanto riguarda la coppia frenante, si è scelto un andamento lineare fino al valore nominale di corrente (200 A) corrispondente ad una corsa del pedale del freno pari al 50%, tale corrente rimane costante fino al 70% della corsa del pedale e cresce ancora linearmente, in condizione di sovraccarico, fino alla corrente di picco gestibile dal motore (400 A) pari al 100%

della pressione del pedale del freno. La scelta nella mappatura della frenata è stata effettuata considerando che la condizione di rendimento massimo per il motore di trazione è proprio quello di velocità e corrente nominale, si è scelto allora di mantenere tale requisito per il più ampio valore possibile e di sfruttare le capacità in sovraccarico solo quando si necessita di una potenza frenante molto elevata, come in situazioni di emergenza. E' da precisare che la coppia frenante elettrica è stata posta indipendente dalla velocità del veicolo poiché è stata

considerata, almeno in questa fase del progetto, come un aiuto alla frenatura meccanica. La coppia frenante meccanica è infatti sempre presente e non è in nessun caso disinseribile o regolabile in funzione delle condizioni di marcia.

L'influenza della coppia frenante elettrica è tuttavia bassa rispetto a quella meccanica. Quando è attiva la frenata rigenerativa, il suo contributo corrisponde ad un incremento di coppia frenante totale di circa il 10%, contributo che cresce quando la frenata risulta più marcata. Tuttavia il suo contributo non influenza la ripartizione di frenata, che varia subisce una variazione massima del 5%.

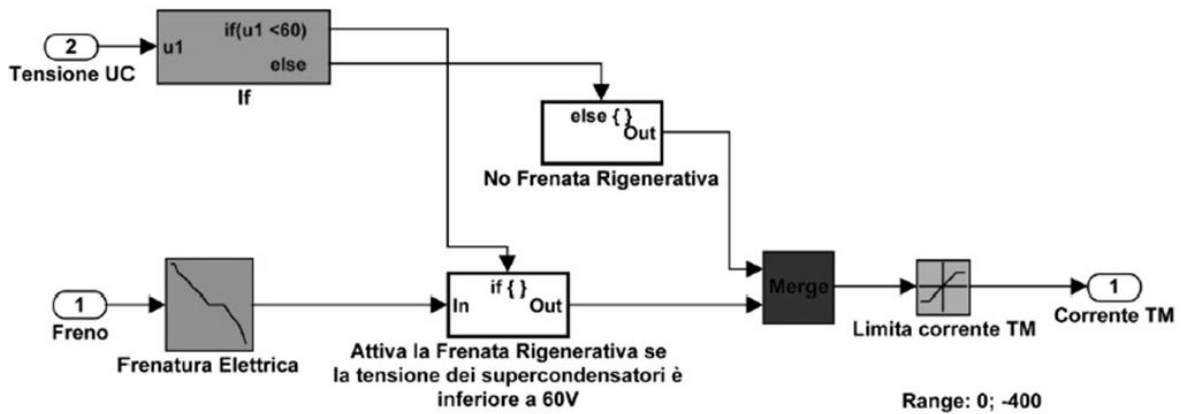
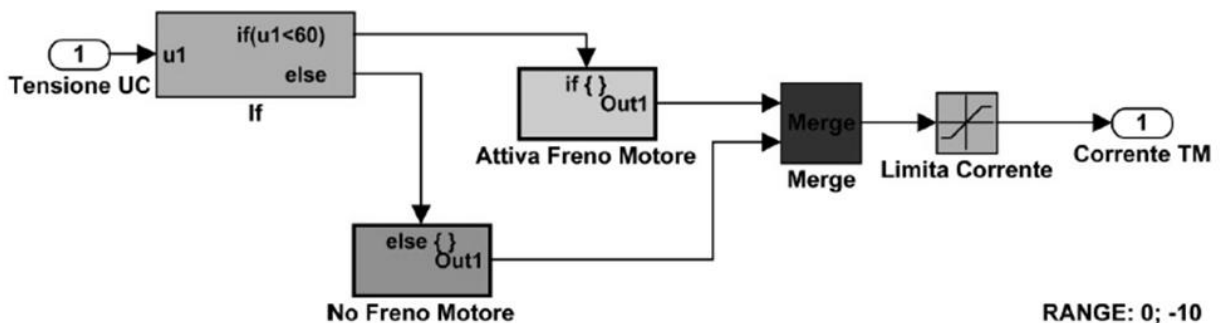


Figura 40 Schema a blocchi della frenata rigenerativa

4.4.4 Freno motore



Questa condizione si attiva quando il freno e l'acceleratore sono entrambi in rilascio. E' stata introdotta per simulare quella che è la condizione di freno motore in un veicolo tradizionale con motore a combustione interna. Si è scelto di introdurre una coppia resistente piuttosto bassa per non rallentare eccessivamente il veicolo durante la marcia. Ovviamente le potenze elettriche che vengono generate dal freno motore sono piccole (circa 500 W a 50 km/h), ma la filosofia del veicolo è quella del risparmio energetico e quindi anche questa modesta potenza prodotta può essere utile ai fini della riduzione dei consumi; inoltre prevedere tale condizione

di freno motore permette una sensazione di guida più "classica" per il pilota, abituato ad un veicolo convenzionale.

4.4.5 Gestione della potenza

In questa parte viene gestita principalmente la potenza di trazione del veicolo. La corsa dell'acceleratore viene trasformata in una richiesta di coppia motrice al motore elettrico, anche per questo tipo di segnale è stato scelto un comportamento di tipo particolare. La coppia cresce linearmente fino al suo valore nominale, quando il pedale è premuto tra lo 0 ed il 70%, e cresce ancora linearmente fino alla corrente di picco tra il 70 ed il 100%. Tale mappatura è stata scelta per utilizzare la riserva di potenza in sovraccarico solo in particolari condizioni e quindi mantenersi in quel range di potenze che possono comunque essere fornite dal generatore.

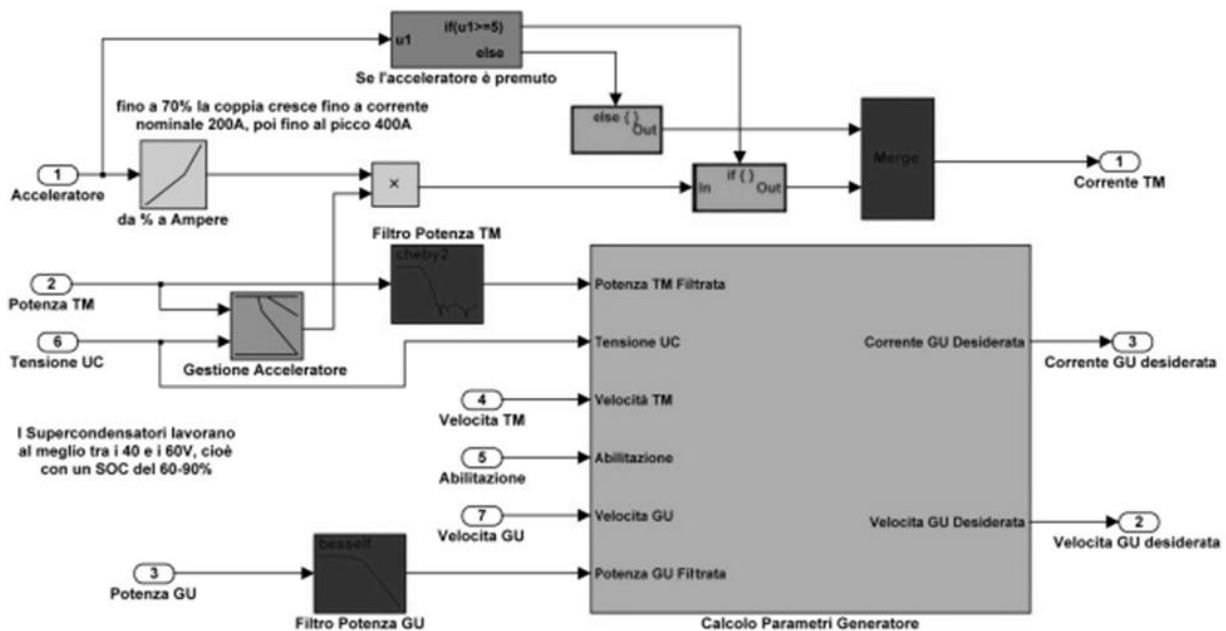


Figura 41 Schema a blocchi della gestione della potenza

Poiché i supercondensatori non devono mai trovarsi in uno stato di carica troppo basso, tale da non essere in grado di fornire la giusta potenza di ausilio al generatore, condizione molto pericolosa ai fini della sicurezza e della guidabilità del mezzo, si è reso necessario introdurre un effetto di taglio della potenza assorbita dalla trazione. E' stata realizzata una mappa che, in base alla carica dei supercondensatori ed alla potenza richiesta dal motore elettrico, genera una riduzione automatica della potenza assorbita dal motore di trazione, mediante un fattore moltiplicativo compreso tra 0 ed 1. Questa mappa è stata fissata considerando un tempo caratteristico di tre secondi, tempo massimo che il generatore può impiegare per portarsi alla potenza richiesta, di cui si parlerà nel paragrafo successivo. Se tale potenza non può essere coperta dai supercondensatori, viene ridotta alla massima potenza che questi possono erogare nei tre secondi. Tale accorgimento è stato necessario perché nel caso in cui la tensione dei supercondensatori risultasse troppo bassa, si avrebbe lo spegnimento di sicurezza di tutta la parte elettrica, condizione che renderebbe il veicolo inguidabile.

E' da notare che una corretta logica di gestione dei condensatori, qualsiasi siano le condizioni di marcia, è sufficiente a scongiurare una situazione così spiacevole, tuttavia il requisito di sicurezza, fondamentale per il funzionamento di un qualsiasi veicolo, ci ha imposto di introdurre tale accorgimento.

Sono stati inoltre inseriti due filtri sui segnali di Potenza Generatore e Potenza Motore di Trazione che hanno lo scopo di filtrare, appunto, i dati letti dai sensori in modo da renderli di più facile fruibilità ed elaborazione. Infatti il primo segnale presenta una forte dispersione dovuta dall'irregolarità di coppia del motore termico, il secondo è influenzato dall'andamento sinusoidale della corrente alternata, dall'inverter e dalle richieste dell'acceleratore. Il filtro sul segnale del generatore presenta una importanza rilevante dal momento che il suo scopo è quello di attenuare il più possibile le variazioni di potenza e di ritardare la sua regolazione rispetto alla potenza istantaneamente richiesta in modo da sfruttare al meglio l'energia interna dei supercondensatori. Una gestione delicata delle variazioni permette, infatti, al motore di lavorare con miscele aria/combustibile poco grasse e di conseguenza mantenere i consumi a livelli più bassi possibile. La corretta taratura di questo filtro assicura che nelle condizioni di improvvisa richiesta di potenza il generatore non segua tale andamento, ma lo approssimi in modo molto graduale, al contrario, una volta cessata la richiesta di potenza questo deve diminuire la sua erogazione con un certo ritardo per permettere una ricarica almeno parziale dell'energia che i condensatori hanno ceduto per soddisfare la richiesta della trazione.

4.4.6 Calcolo dei parametri del motogeneratore

Questa sottosezione della logica di gestione è la parte più importante dell'intero codice realizzato, il suo scopo è quello di calcolare la potenza che il generatore deve fornire e le modalità con cui tale potenza deve essere prodotta. Per realizzare questo blocco della gestione sono state fatte delle scelte iniziali in base alle quali sviluppare i parametri utilizzati.

In primo luogo è stato introdotto un tempo caratteristico massimo entro il quale il generatore deve essere in grado di passare da un valore di potenza ad un altro, che quindi rappresenta anche il tempo minimo di "vita in marcia" dei supercondensatori, la cui energia interna deve essere sempre sufficiente ad erogare tutta la potenza richiesta dal motore di trazione per un tempo di tre secondi appunto, senza scaricarsi eccessivamente.

È stato imposto un tempo di ricarica a veicolo fermo pari a 30 secondi, ed è stata fissata una legge di ricarica in condizioni di veicolo in movimento, dipendente da due parametri, lo stato di carica del sistema di accumulo e la velocità del veicolo. Al crescere del SOC diminuisce la potenza di ricarica, mentre all'aumentare della velocità viene incrementato il tempo necessario di ricarica per permettere ai supercondensatori di accogliere il maggior quantitativo di energia possibile dalla frenata rigenerativa, che cresce in senso probabilistico al crescere della velocità del veicolo, specialmente in ambito urbano. La legge di attenuazione della potenza di ricarica è di tipo quadratico, essendo l'energia cinetica del veicolo una funzione dall'andamento quadratico con la velocità.

Alla potenza di ricarica dei supercondensatori viene sommata la potenza spesa nell'azionamento della trazione, che quindi deve essere reintegrata. Tale potenza viene bypassata quando è inferiore a 1 kW in modo tale da non utilizzare il generatore e quindi sfruttare solo in supercondensatori quando le potenze in gioco sono basse.

La somma dei due carichi viene limitata alla potenza massima erogabile dal generatore la quale presenta una "zona morta", compresa tra 0 e 2 kW, entro la quale viene comandato al

generatore non fornire potenza, per non far lavorare il gruppo elettrogeno nelle condizioni in cui il rendimento globale risulta eccessivamente basso.

La variazione della potenza richiesta al generatore viene poi limitata a 1 kW/secondo in salita e 0.5kW/secondo in discesa, condizione che deve essere in accordo con il filtro di cui si è discusso in precedenza. La potenza richiesta viene quindi processata in modo tale da essere fornita nelle condizioni ottimali, ossia nelle condizioni di massimo rendimento del sistema motore termico - generatore elettrico. Per poter spostarsi tra i punti di ottimo del piano quotato dei consumi del motore termico occorre fornire al generatore due parametri, ossia il numero di giri al quale portarsi e la coppia resistente da applicare. La curva dei punti di ottimo è stata realizzata mediante simulazioni al computer e test specifici sul motore a combustione e sul generatore che saranno trattati più avanti.

4.4.7 Controllo in retroazione del motogeneratore

Questa parte di codice è deputata al controllo dei parametri di esercizio del gruppo motogeneratore. La logica scelta è del tipo "PI", cioè proporzionale/integrale, sia per la gestione della valvola a farfalla del motore termico che per il riferimento di corrente del generatore elettrico, proporzionale alla coppia resistente offerta.

La decisione di realizzare una logica di controllo non eccessivamente sofisticata risiede in due motivi principali. Primo perché a causa dell'irregolarità periodica intrinseca della coppia dovuta al moto alternativo del pistone stesso, l'obiettivo di una regolazione del sistema molto raffinata e veloce, avrebbe potuto portare a variazioni dei parametri di controllo troppo repentine e causare di conseguenza fenomeni di instabilità o pompaggio. Secondo per motivi di semplicità di taratura e affidabilità in una prima fase di sperimentazione. Non essendo infatti disponibile un modello accurato della dinamica del motogeneratore è stata indispensabile la taratura manuale delle quattro costanti di controllo, di conseguenza l'utilizzo di troppi parametri da dover tarare e gestire avrebbe portato solamente inutili complicazioni.

La regolazione si basa, come detto nel paragrafo precedente, sulla velocità di rotazione del motore termico e sulla corrente del generatore. Tuttavia il primo parametro riveste una importanza ed una complessità di gestione maggiore. Infatti esso influenza la regolazione della valvola a farfalla, cioè il valore di coppia all'albero offerta dal gruppo termico, che deve essere sempre bilanciata dalla coppia resistente del generatore elettrico, per evitare variazioni eccessive del regime di rotazione o fuori giri, che possono portare al danneggiamento o alla rottura del gruppo motogeneratore nel suo complesso.

Bisogna tener presente che il legame tra coppia e apertura della farfalla in un motore a combustione non è di tipo lineare ed è inoltre fortemente variabile con la velocità di rotazione del motore, quindi il suo controllo risulta complesso. La funzione del controllo proporzionale è quello di produrre un incremento di coppia relativamente elevato e il più possibile vicino alla condizione di funzionamento richiesta, mentre lo scopo del controllo integrativo è quello di regolare in modo più fine la farfalla per stabilizzare il sistema.

Il controllo della coppia del generatore avviene in maniera meno raffinata del controllo del motore termico: non è altro che il rapporto fra potenza da generare e numero di giri al quale fornirla, e che lo scopo del controllo è quello di regolare questo valore con una rapidità controllata senza produrre eccessivi squilibri al motore termico. Questa minore "attenzione" va imputata ad una maggiore dinamica della risposta dei motori elettrici rispetto a quelli termici. I tempi caratteristici di risposta dei componenti elettrici sono molto inferiori di quelli propri della

combustione e di conseguenza tramite il controllo si cerca proprio di portarli allo stesso ordine di grandezza.

All'interno dei due controller sono state inserite delle condizioni di sicurezza, essenzialmente atte a scongiurare il sovraccarico del sistema. Una prima condizione consiste nel portare a zero i valori di corrente e di apertura della farfalla immediatamente, nel caso in cui la potenza richiesta risulti nulla, ossia quando i supercondensatori tendono a raggiungere la condizione di sovraccarico. Un'altra condizione è rappresentata dalla chiusura immediata della valvola a farfalla nel caso in cui il motore superi i 5000 giri/minuto, velocità limite per il corretto funzionamento del generatore elettrico.

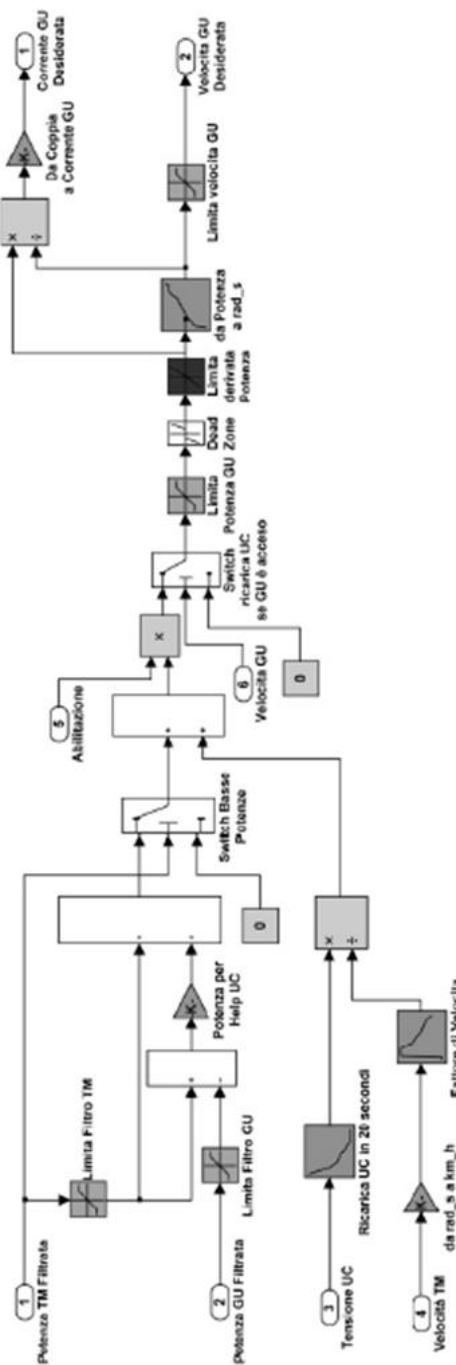


Figura 42 Schema a blocchi calcolo parametri del motogeneratore

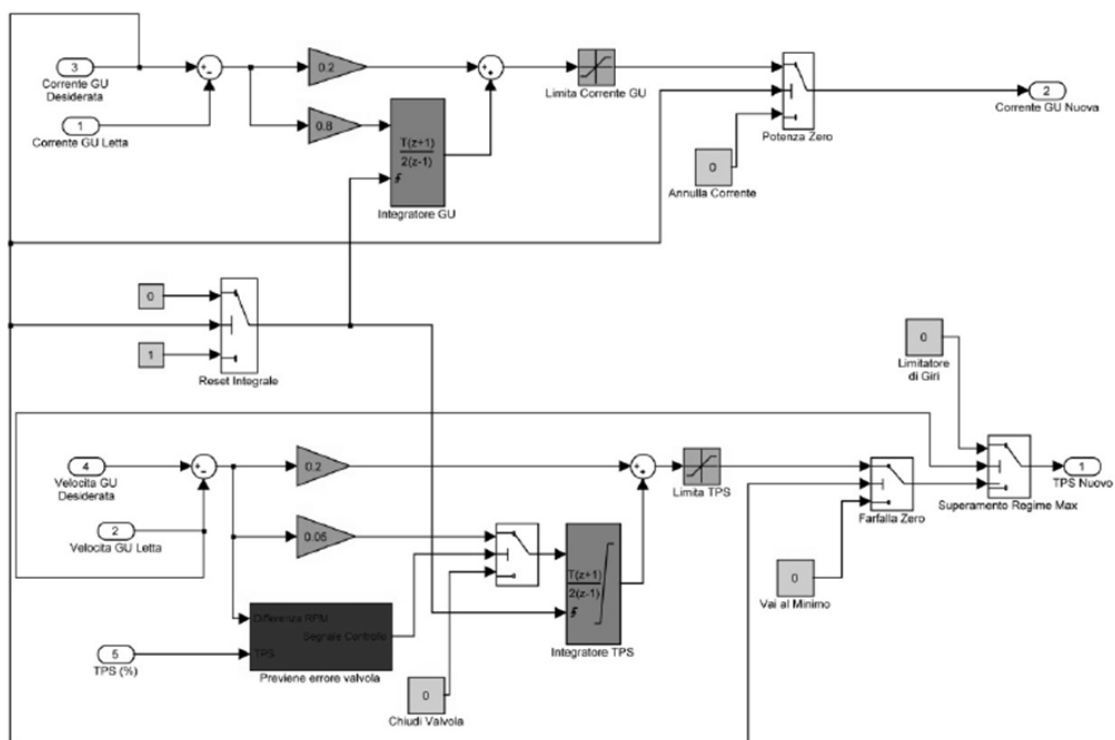


Figura 43 Schema a blocchi del controllo del motogeneratore

4.5 Definizione dei parametri di controllo: test e simulazioni numeriche

Il corretto funzionamento del sistema è un requisito indispensabile per permettere l'esercizio del veicolo nelle migliori condizioni di efficienza e di sicurezza. Il punto fondamentale affinché queste specifiche di funzionamento siano rispettate è la corretta gestione del gruppo motogeneratore, sia per quanto riguarda la scelta delle condizioni di ottimo funzionamento, cioè la scelta dei parametri di potenza, sia per quanto riguarda il suo funzionamento dal punto di vista meccanico, ovvero l'affidabilità del sistema di controllo automatico.

Il gruppo elettrogeno è l'unico elemento in grado di fornire potenza al sistema, senza il quale il veicolo non è in grado di operare, condizione che può pregiudicare la sicurezza degli occupanti. Per questo motivo la sua capacità di funzionamento deve essere sempre assicurata, e la sua gestione deve essere accurata per ridurre i consumi, le emissioni e migliorare il comfort degli occupanti anche in termini di rumorosità.

Durante la verifica del funzionamento del software di gestione si è reso necessario realizzare dei test di esame "passo passo", per accertare il corretto andamento delle routine realizzate e, soprattutto, la compatibilità della logica programmata con i sistemi hardware di cui è dotato il sistema.

Successivamente sono state avviate delle attività di tipo sperimentale per il veicolo su strada in modo da consentire di testare l'effettivo funzionamento del veicolo ed implementarne l'ottimizzazione, sia per la scelta dei parametri di controllo automatico del gruppo motogeneratore che degli altri sistemi.

4.5.1 Taratura del controllo in retroazione del gruppo motogeneratore

Non essendo disponibile un modello matematico che simulasse il comportamento del sistema motore termico accoppiato al generatore elettrico ed al suo inverter utilizzati nel nostro progetto, la taratura delle costanti di controllo è stata effettuata in maniera sperimentale. Partendo da semplici considerazioni sull'influenza che i parametri di controllo quali apertura della farfalla e corrente del generatore, hanno sulla dinamica del sistema stesso.

Essendo, infatti, il sistema dipendente soprattutto dal motore termico che, per come è stato concepito, permette velocità di rotazione molto più elevate di quelle del generatore, nelle prime prove è stato necessario mettersi in condizioni di sicurezza, affinché la dinamica del motore termico si mantenesse sempre più lenta di quella del generatore, per evitare che le variazioni di apertura della farfalla potessero produrre uno squilibrio di coppia troppo elevato e quindi incrementi di velocità eccessive fino a regimi non supportabili dal generatore che potessero provocarne dei guasti.

Se si fa riferimento alle grandezze controllate, velocità di rotazione del motore termico (il cui valore è indicato in rad/s) e corrente di riferimento del generatore (indicato in Ampere), si capisce immediatamente che hanno circa lo stesso ordine di grandezza, di conseguenza, per quanto riguarda i coefficienti di proporzionalità dei due controlli, si è iniziato ponendo il coefficiente di proporzionalità, K_p , della farfalla pari a 0.03 e quello del generatore a 0.05, mentre quelli integrativi, K_i pari a zero. In questo modo, ad una variazione di 100 rad/s (ossia circa 1000 giri/min) desiderati per il motore termico corrispondeva un'apertura della farfalla pari al 3%, condizione che come partenza sicuramente è prudente e conservativa.

Nei test successivi, oltre ad incrementare i valori dei coefficienti proporzionali, per migliorare il tempo di risposta del sistema, sono stati introdotti i coefficienti integrativi che hanno il compito di affinare il comportamento del sistema, in particolare in quelle situazioni in cui la variazione di potenza deve essere realizzata principalmente come variazione di coppia al generatore invece che come variazione di velocità di rotazione, condizione che rende praticamente nullo l'apporto del controllo proporzionale.

Di seguito vengono riportati alcuni dei test effettuati durante la taratura del sistema. I test in questione sono identificati con un numero progressivo ed attraverso lo studio e l'osservazione degli stessi è possibile valutare l'evoluzione della risposta del sistema al variare delle costanti di controllo.

Test n°7

I coefficienti di questo test sono stati impostati ai seguenti valori:

- $K_{p, TPS} = 0.03$
- $K_{i, TPS} = 0.008$
- $K_{p, GEN} = 0.05$
- $K_{i, GEN} = 0.5$

Dove il pedice TPS indica la valvola a farfalla e GEN il generatore elettrico. Dall'osservazione delle figure e dai dati ricavati si può notare come la dinamica del generatore sia più veloce di quella del motore termico. La corrente del generatore impiega circa quattro secondi per passare da un riferimento nullo ad uno pari a 16 A, mentre il motore termico impiega oltre dieci secondi per passare dal regime minimo a 3000 RPM. Senza considerare la forte dispersione dei dati acquisiti causati dal caratteristico andamento altalenante della coppia del motore termico monocilindrico che i sensori registrano avendo un tempo di acquisizione di 5

ms, che tuttavia influenza tutto il sistema e che non può essere attenuata, si può notare come il controllo della corrente del generatore sia molto preciso, fenomeno che ci si aspettava vista la notevole facilità con cui si può gestire un controllo in corrente. Si può inoltre notare come gli andamenti di potenza e velocità siano invece molto irregolari, in particolar modo quello della velocità del motore termico. Questo fenomeno è pienamente giustificato dal fatto che la coppia del motore termico, per bassi valori di parzializzazione, che in questa prova sono inferiori al 30%, è molto variabile con l'apertura della farfalla e che quindi la sua continua regolazione produce accentuati sbalzi di velocità che si trasmettono ovviamente sul valore della potenza fornita. Essendo infatti la coppia resistente praticamente costante, l'unico parametro che influenza la potenza è la velocità del generatore appunto.

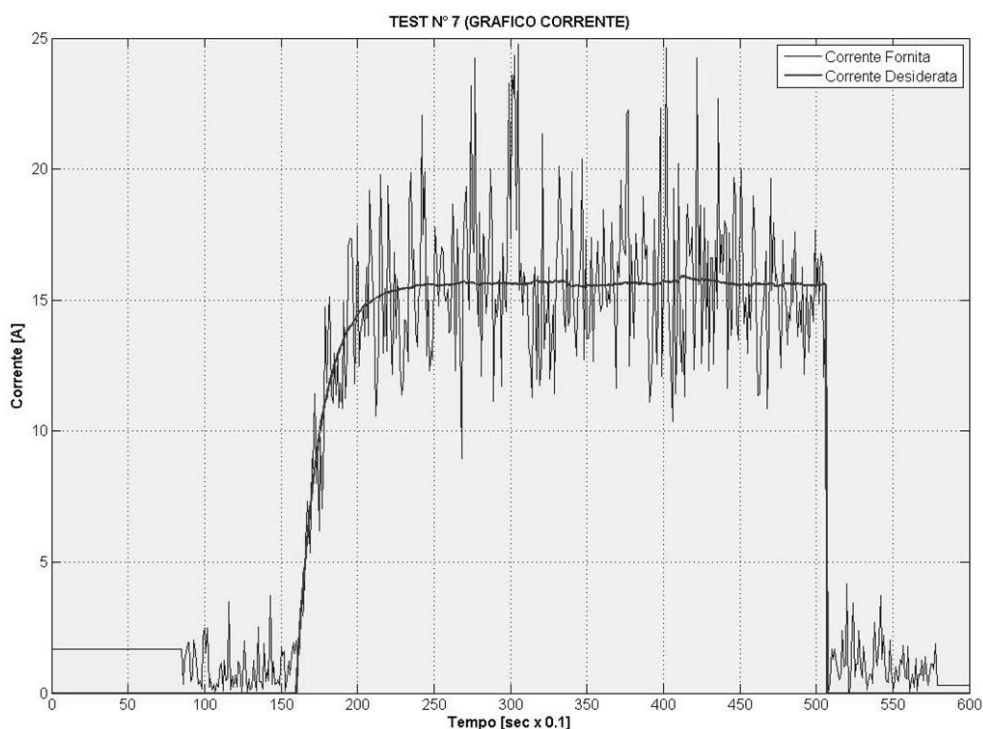


Figura 44 Corrente del generatore elettrico

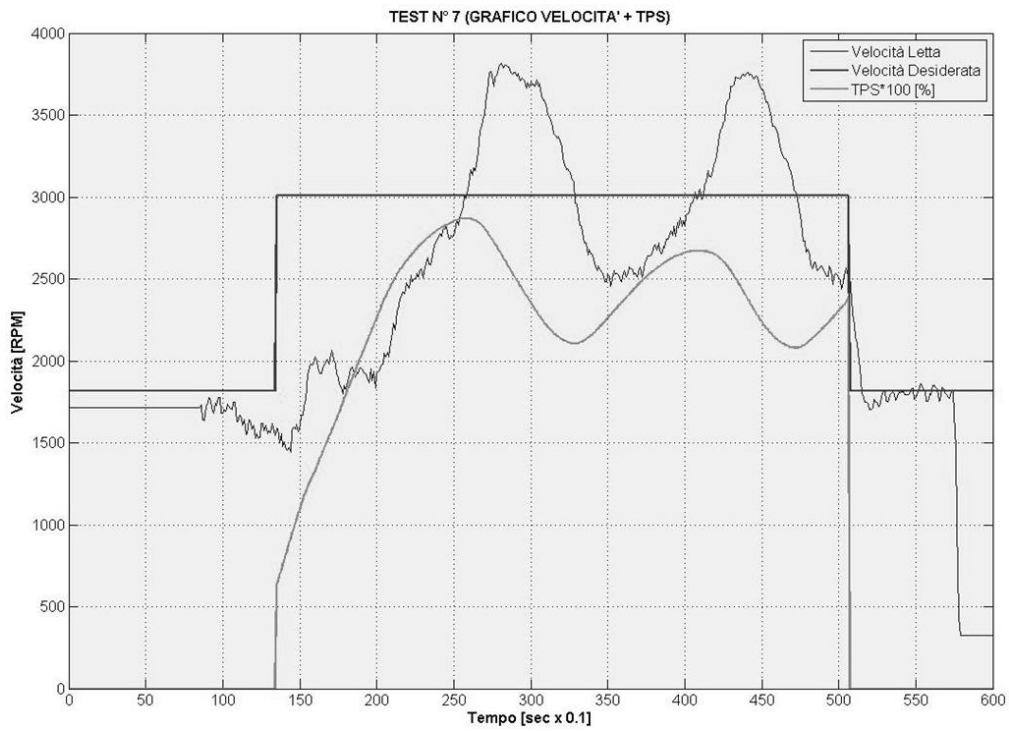


Figura 45 Velocità di rotazione del motogeneratore

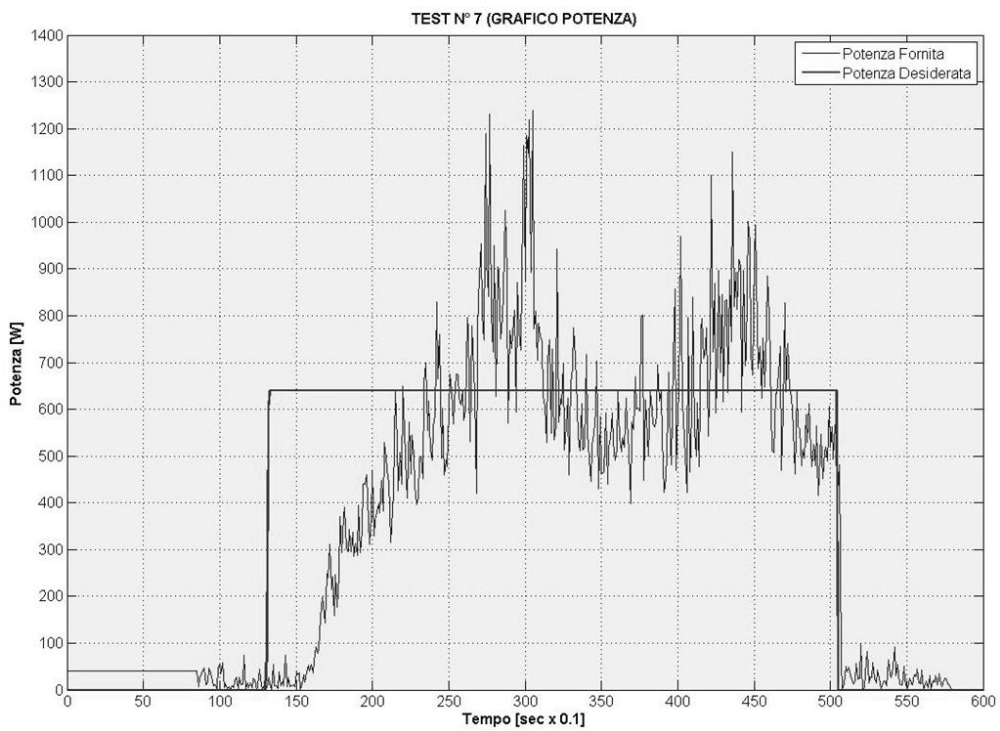


Figura 46 Potenza erogata dal motogeneratore

Test n°14

- $K_{p, TPS} = 0.04$
- $K_{i, TPS} = 0.05$
- $K_{p, GEN} = 0.05$
- $K_{i, GEN} = 0.5$

Da questo test si può notare come sia stato migliorato il tempo di risposta sia del generatore che del motore termico. Ancora una volta vediamo come la corrente segua molto bene il riferimento, con una dispersione che rientra nel range ± 5 Ampere, mentre si hanno ancora problemi per quanto riguarda l'inseguimento del riferimento di velocità. E' ben visibile il comportamento molto fluttuante della coppia del motore termico per parzializzazioni inferiori al 30%, accentuate da un controllo integrativo troppo marcato, oscillazioni che vanno via via diminuendo fino a diventare praticamente nulle già attorno al 35% di parzializzazione, dove si può notare il comportamento stabile del generatore. Per quanto riguarda la potenza fornita possiamo notare un netto miglioramento ed un funzionamento corretto che segue molto bene la richiesta almeno per quanto riguarda il suo valor medio.

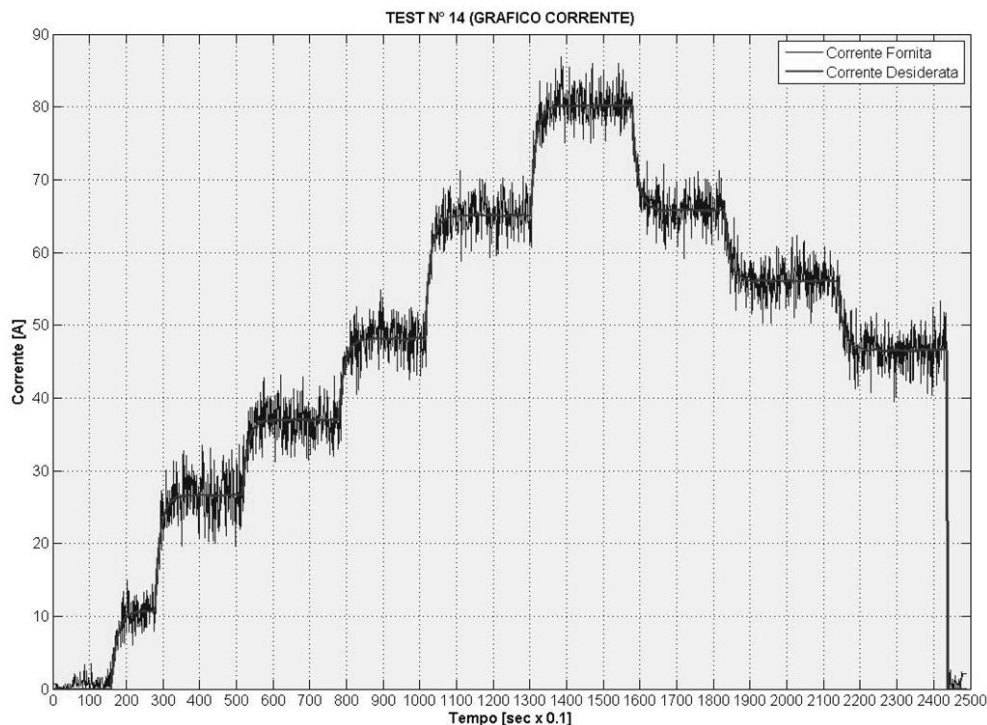


Figura 47 Corrente del generatore

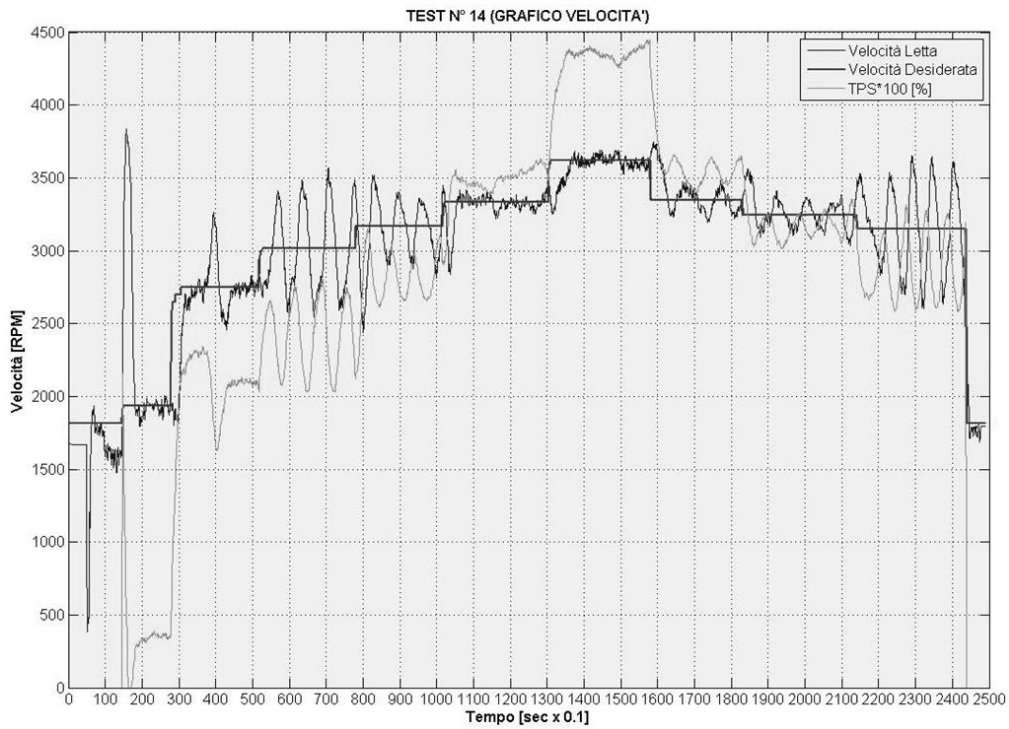


Figura 48 Velocità di rotazione del motogeneratore

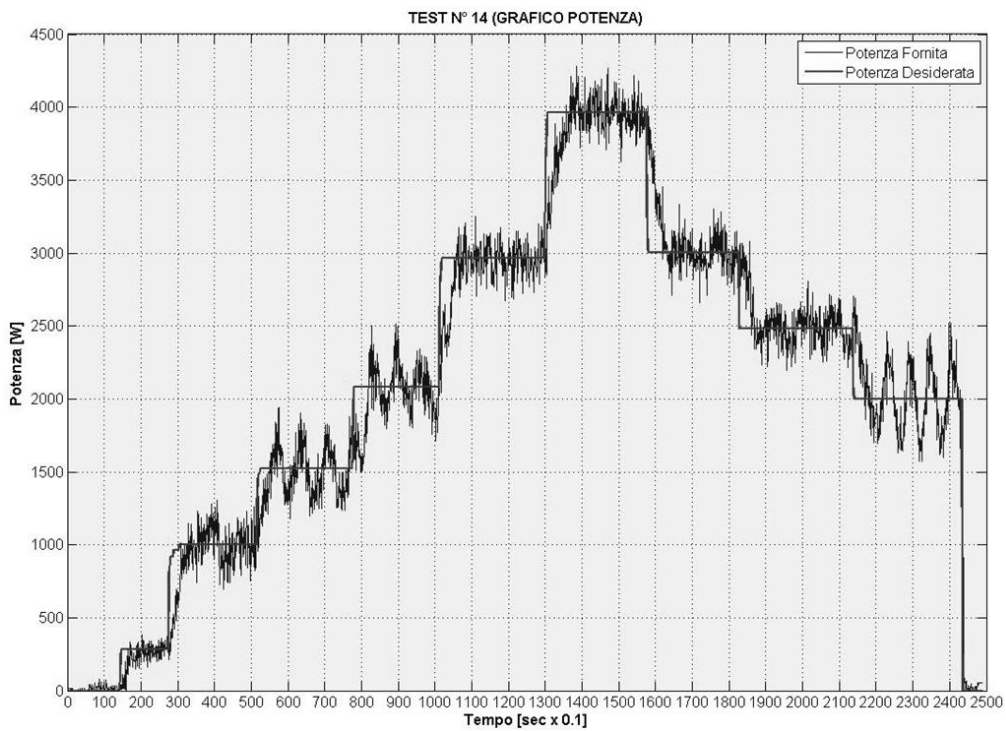


Figura 49 Potenza erogata dal motogeneratore

Test n°21

- $K_{p, TPS} = 0.03$
- $K_{i, TPS} = 0.05$
- $K_{p, GEN} = 0.05$
- $K_{i, GEN} = 0.5$

Da questo test finale della fase numerica possono essere ricavati i parametri di funzionamento del gruppo motogeneratore. Il controllo della corrente è ottimo, mentre quello della velocità di rotazione del motore termico non è ancora perfetto. L'errore osservato durante le fasi transitorie si attesta intorno ai 300 giri per minuto, valore in realtà abbastanza elevato, che tuttavia può considerarsi accettabile per il momento. In effetti che nel corso dei test si è scelto di privilegiare il conseguimento della potenza desiderata a scapito del numero di giri ottimo, essendo la potenza il parametro di riferimento più importante. Questa scelta è inoltre rafforzata dal fatto al momento della prova ancora non era stato effettuato il test dei consumi, quindi si è ritenuto poco importante soffermarsi eccessivamente sull'esatto conseguimento della velocità. La potenza fornita rientra nelle specifiche richieste, infatti è possibile individuare un tempo caratteristico di regolazione molto vicino ai tre secondi che sono stati imposti da progetto.

E' da notare inoltre che la capacità di raggiungere la potenza richiesta migliora con la percentuale di apertura della farfalla, che rappresenta una condizione vantaggiosa nel caso di grandi potenze, cioè quando i condensatori sono in uno stato di carica non ottimale.

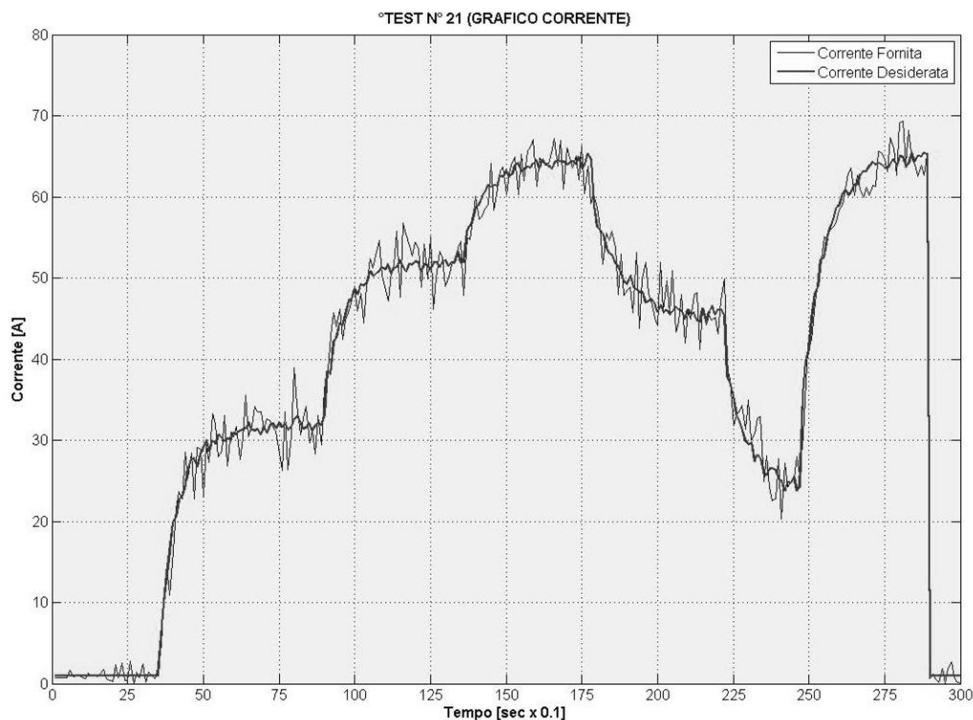


Figura 50 Corrente erogata dal generatore

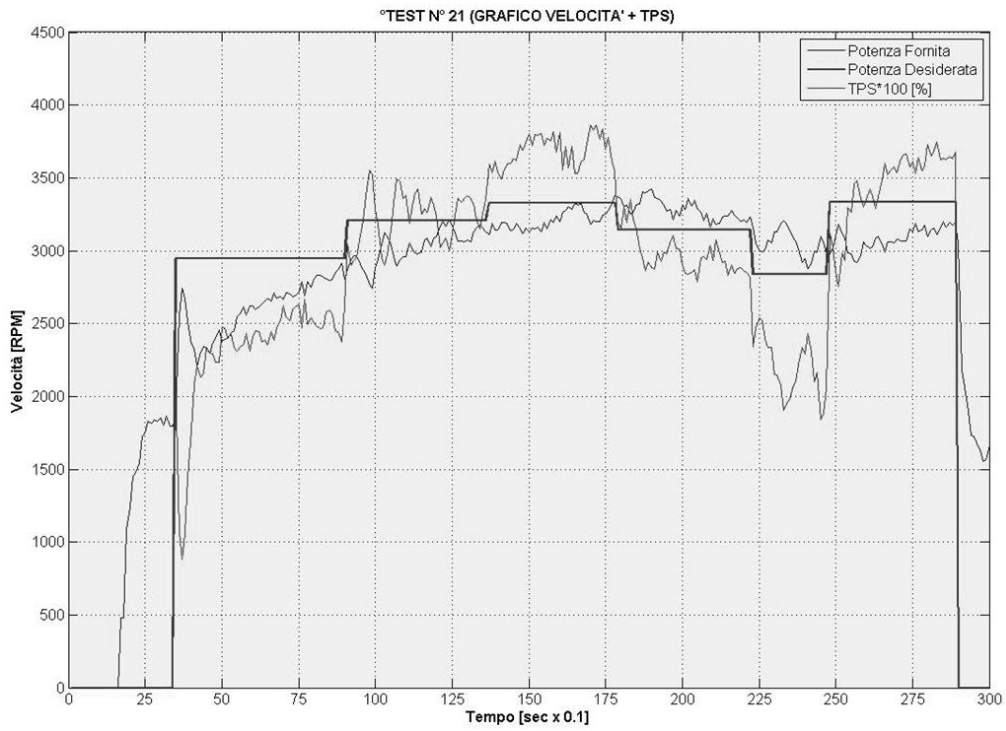


Figura 51 Velocità di rotazione del motogeneratore

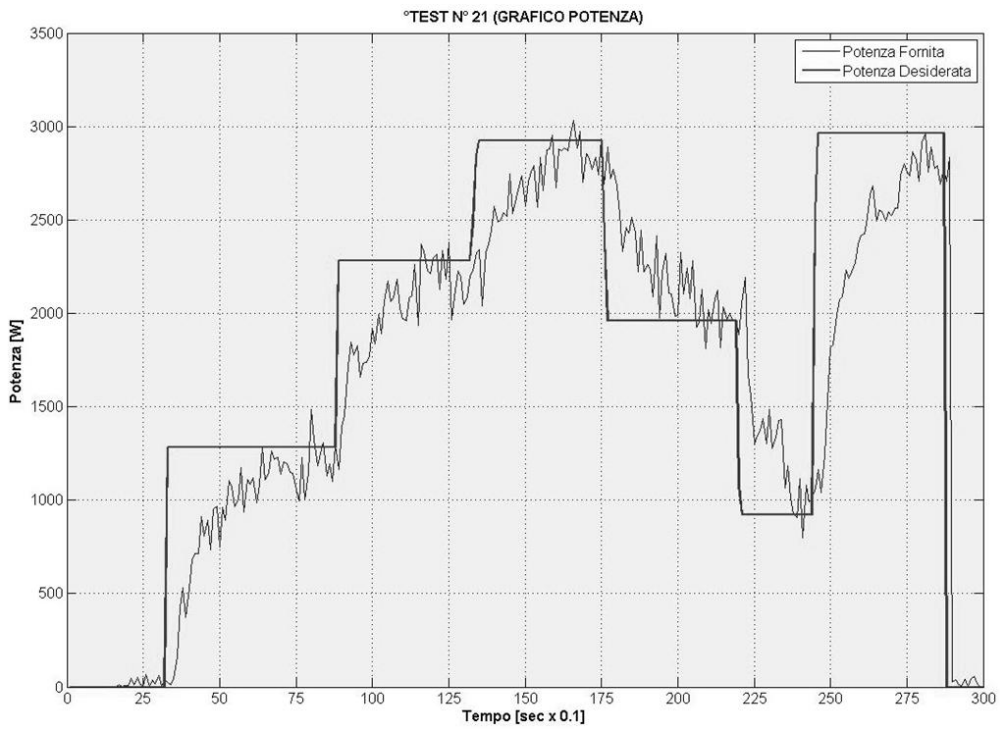


Figura 52 Potenza fornita dal motogeneratore

4.6 Simulazioni numeriche per la taratura della risposta del motogeneratore

Durante il periodo di sviluppo del veicolo si è reso necessario realizzare un programma che simulasse il funzionamento dei componenti del veicolo dal punto di vista dei flussi energetici, in modo da prevedere le potenze di carica e scarica dei supercondensatori in funzione delle diverse modalità di apporto energetico da parte del generatore e quindi realizzare una taratura teorica del suo filtro di risposta.

Per effettuare questa simulazione è stato realizzato un software contenente la stessa logica di gestione implementata nella centralina del veicolo, privata delle parti relative alla frenata rigenerativa e freno motore, che, come si è visto, non influenzano la logica di gestione della potenza, ma sono state concepite come flussi energetici ausiliari. È stato anche eliminato il controllo in retroazione del motogeneratore, essendo impossibile simularne la dinamica, è stato invece introdotto un "rate limiter" per simulare il ritardo del generatore nel fornire la potenza richiesta.

Scopo delle simulazioni numeriche è stato individuare una taratura del tempo di risposta del motogeneratore che fosse la più lenta possibile, ossia che sfruttasse nel modo più ampio tutta l'energia contenuta nei supercondensatori, senza farli scendere sotto la tensione minima ammissibile. E' da notare che questa simulazione è di tipo conservativo poiché nelle normali condizioni di marcia del veicolo, l'effetto dell'apporto energetico ausiliario della frenata ha una influenza più o meno rilevante, e che di conseguenza favorisce la gestione energetica del gruppo elettrogeno, mentre la specifica del nostro caso era quella di realizzare una taratura che prescindesse proprio dalla rigenerazione.

Il software è stato poi modificato con l'aggiunta di un adattamento del filtro in funzione dello stato di carica degli accumulatori, che aumenta o diminuisce l'apporto energetico da parte del generatore al variare della potenze in gioco. Si è notato infatti che il funzionamento del filtro poteva creare problemi nella gestione della potenza, in quanto un eccessivo ritardo del generatore poteva provocare situazioni di carica o di scarica troppo elevate dei condensatori. Per questo motivo, nel caso di tensioni degli accumulatori troppo basse, si chiede un incremento di potenza da parte del generatore rispetto a quella calcolata dal filtro semplice, viceversa, in caso di tensioni alte, si chiede minore potenza. Le simulazioni numeriche sono state effettuate sul ciclo standard UDC, sul ciclo NEDC adattato alla velocità massima del veicolo, e su un ciclo "pseudoreale".

E' stato infatti realizzato un ciclo di guida della durata di 535 secondi, campionando i valori di potenza assorbita dal motore di trazione durante un test del veicolo realizzato su strada e con due passeggeri a bordo. Le potenze in gioco variano da 0 a 7 kW mentre la velocità non supera i 30 km/h. Il ciclo è caratterizzato da continue accelerazioni e frenate, proprie di un ciclo di guida urbano.

Ciclo UDC

Dalla simulazione del ciclo urbano UDC, in figura 53 e 54 sono rappresentati i quattro cicli urbani elementari, si può individuare un certo ritardo del generatore nelle fornire potenza nelle fasi di ripartenza del veicolo, questa condizione provoca una scarica elevata dei condensatori, i quali forniscono gran parte della potenza richiesta. La potenza del generatore cresce quindi lentamente fino a raggiungere i valori massimi di potenza desiderata. Si nota inoltre come la potenza fornita dal generatore sia praticamente identica per tutti i cicli elementari, essendo quella richiesta dal motore di trazione la stessa a meno delle fluttuazioni del segnale di

corrente. Si possono notare valori leggermente differenti dei picchi di potenza del generatore dovuti proprio al segnale molto variabile della potenza richiesta dal motore di trazione.

Solamente all'inizio della simulazione si ha una differenza della potenza prodotta dal motogeneratore che riporta la carica dei condensatori da quella iniziale di 45 V a quella desiderata di 50 V. I vari moduli urbani elementari, ad eccezione del primo, iniziano con una tensione del sistema di accumulo pari a quella massima desiderata, per questo motivo i supercondensatori vengono sfruttati al massimo delle loro capacità, durante ogni fase di accelerazione. Nelle accelerazioni più marcate si produce una scarica elevata dei supercondensatori, la cui tensione non scende comunque mai sotto i 39 V, condizione che lascia un buon margine di sicurezza in caso di un ulteriore ed improvviso incremento della richiesta di potenza da parte del guidatore.

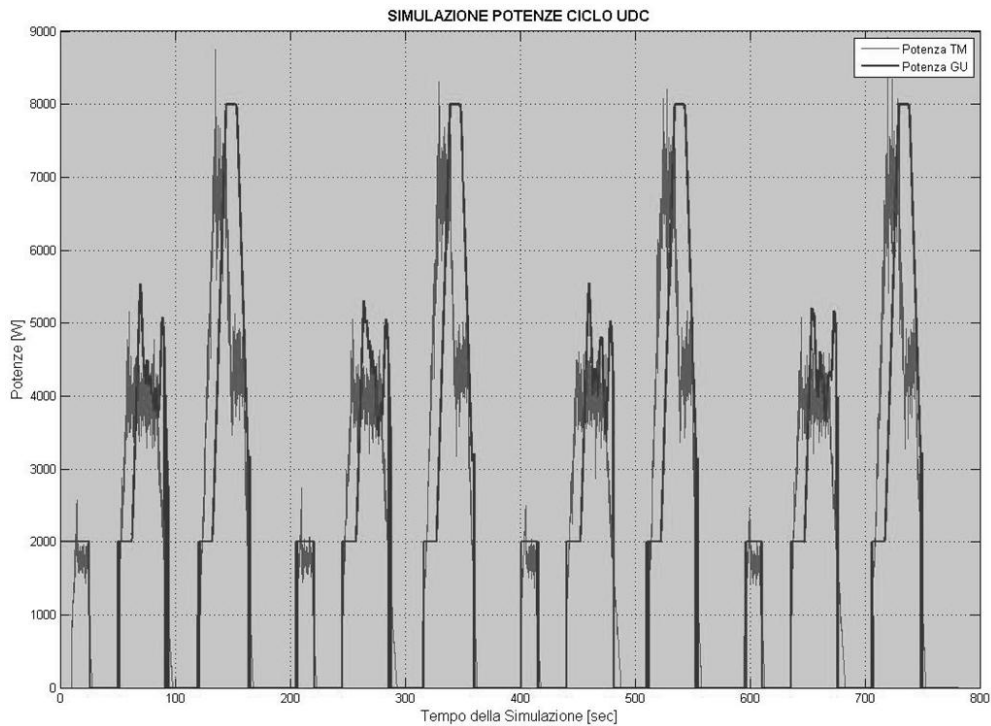


Figura 53 Potenza erogata nel ciclo UDC

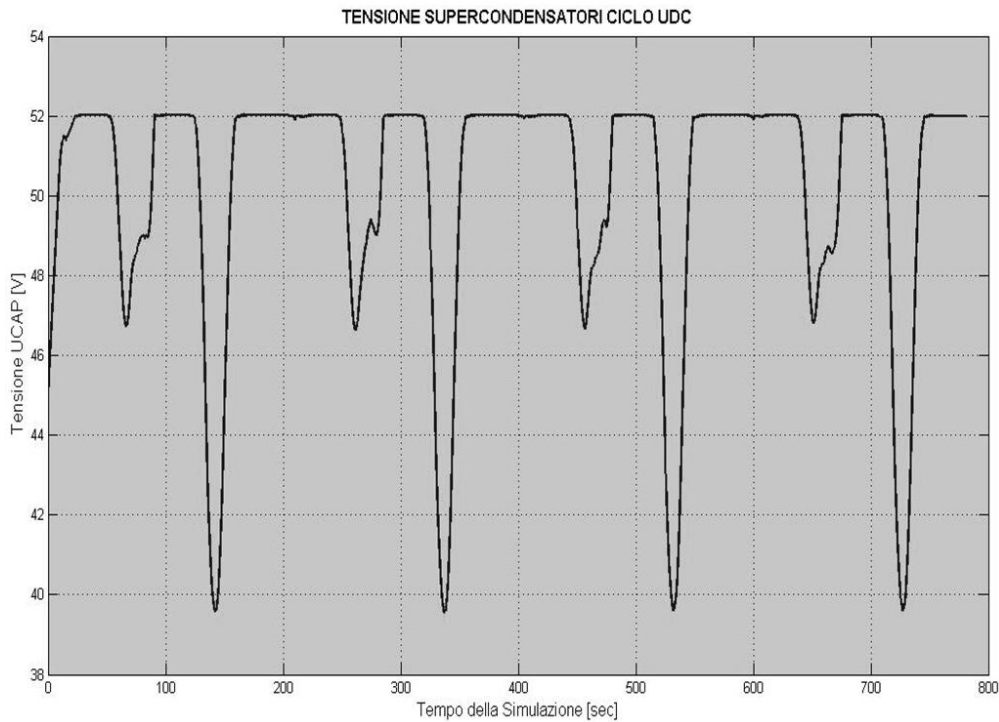


Figura 54 Tensione dei supercapacitori nel ciclo UDC

Ciclo NEDC

Osservando le figure 55 e 56 si può vedere come il sistema si comporti allo stesso modo durante i quattro cicli urbani elementari, essendo le tensioni di funzionamento dei supercondensatori le stesse all'inizio di ognuno dei moduli suddetti. L'unica differenza sostanziale si ha all'inizio della simulazione. La tensione dei condensatori quando viene fatto partire il ciclo di guida è stata fissata a 45 V, inferiore a quella ottimale (50 V), per questo motivo il generatore ricarica immediatamente i supercondensatori per riportarli allo stato di carica desiderato da progetto. Altre differenze meno importanti si possono individuare tra le quattro fasi di accelerazione minore, nelle quali i valori massimi di potenza fornita dal motogeneratore sono leggermente differenti essendo anche diverse le potenze assorbite dal motore di trazione.

Nella parte finale della simulazione, che riproduce il comportamento extraurbano del veicolo, si vede come il generatore segua molto fedelmente il valor medio della potenza richiesta, mantenendo lo stato di carica degli accumulatori praticamente costante. Infatti, poiché il modulo extraurbano è caratterizzato da velocità elevate, che sono le massime raggiungibili del veicolo, la logica di gestione adottata riduce automaticamente la potenza di ricarica di circa il 40% per permettere alla frenata rigenerativa di accumulare il maggiore quantitativo di energia possibile.

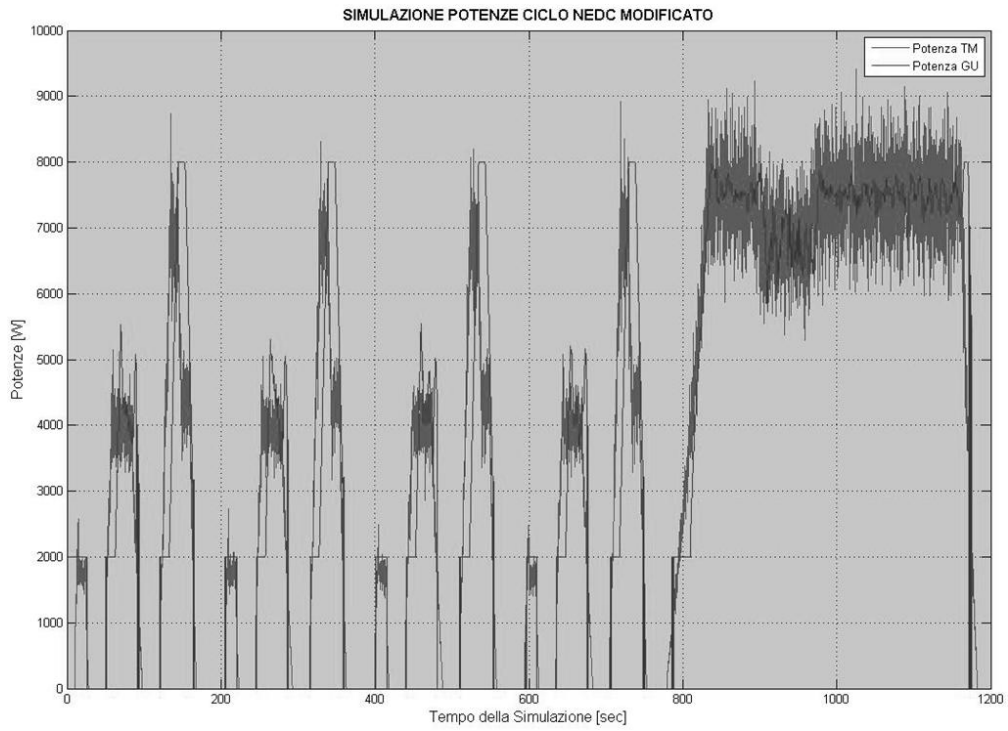


Figura 55 Potenza erogata nel ciclo NEDC

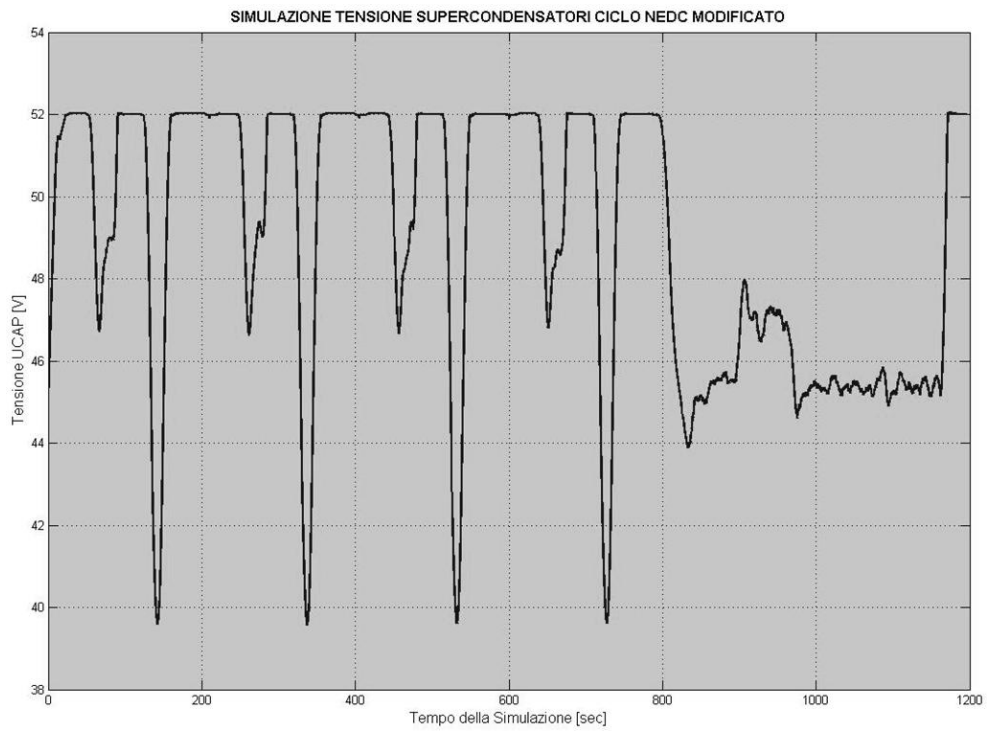


Figura 56 Tensione dei supercapacitori nel ciclo NEDC

Ciclo pseudoreale

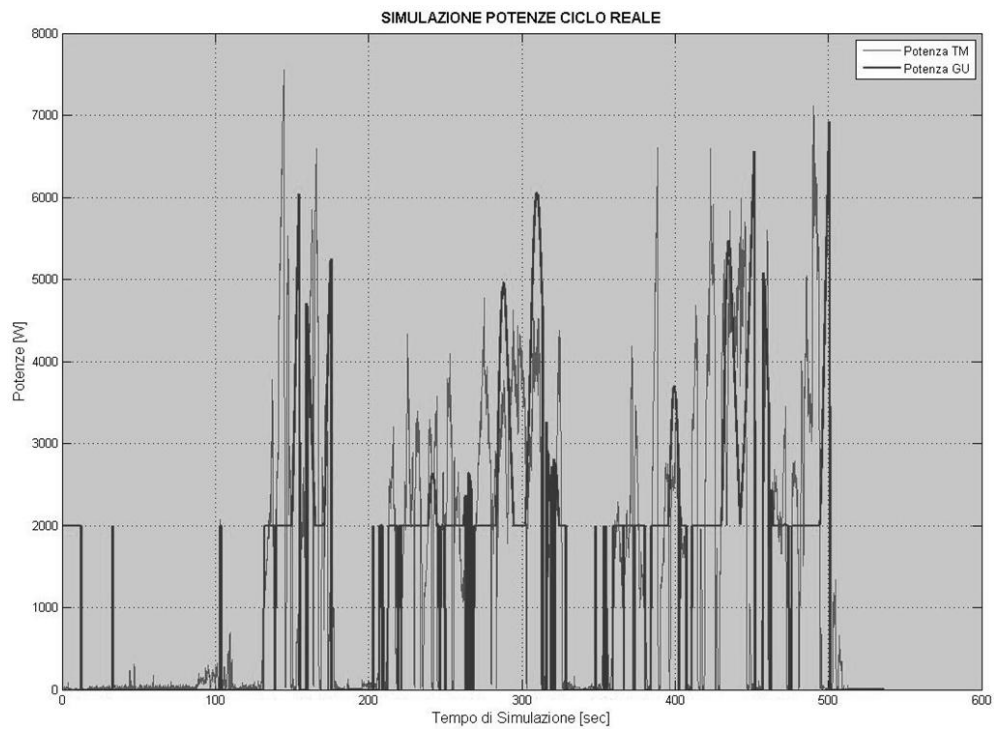


Figura 57 Potenza erogata nel ciclo pseudoreale

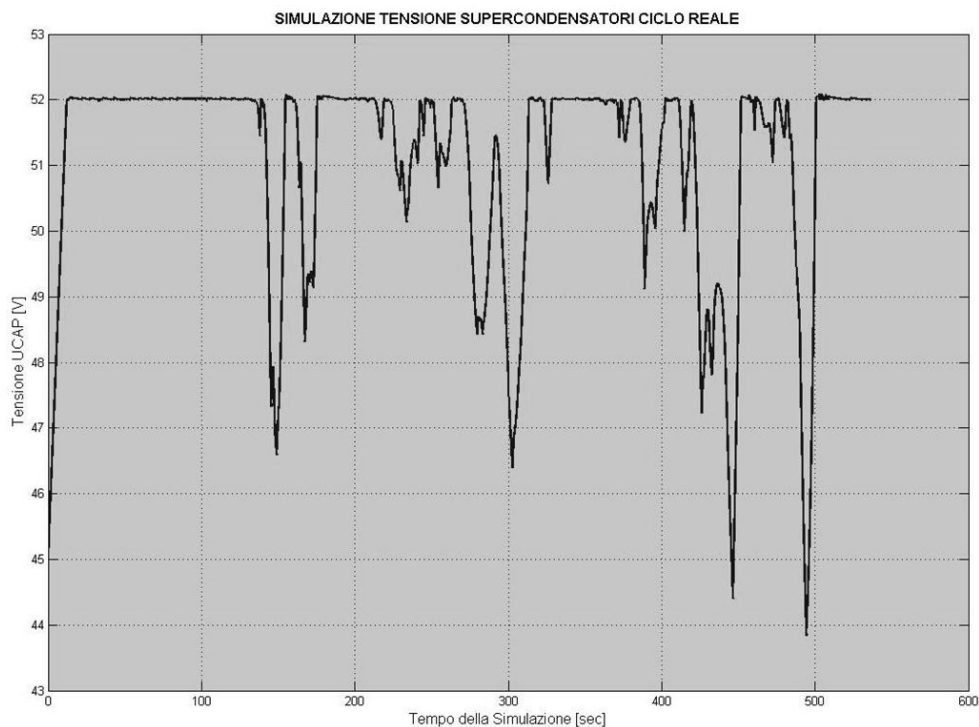


Figura 58 Tensione dei supercapacitori nel ciclo pseudoreale

La simulazione su ciclo Reale, figure 57 e 5,8 è stata realizzata applicando la logica di gestione del veicolo sui valori campionati di velocità e potenza del motore di trazione durante una prova di guida su strada che simula un ipotetico utilizzo urbano del veicolo con due persone a bordo.

Il ciclo è caratterizzato da numerose e repentine accelerazioni e frenate, nonché lunghi periodi di sosta. Le potenze in gioco sono molto variabili, ma sono state mantenute entro i 7 kW, ossia entro quella fascia di potenze che il generatore è in grado di erogare, per non produrre sovraccarico ne del motore di trazione ne del generatore stesso.

La potenza richiesta non presenta alcun tipo di regolarità o andamento ciclico, al contrario di quello che accadeva durante le simulazioni precedenti, tuttavia si può notare come il sistema si comporti in modo adeguato, sfruttando in quantità maggiore i condensatori durante le accelerazioni più forti e ricaricandoli durante le fasi di rallentamento. La tensione del sistema di accumulo varia in quantità minore che nei cicli precedenti perché le accelerazioni sono di breve durata (non più di 5 secondi) e perché la potenza media richiesta è bassa (inferiore a 3 kW).

È sa sottolineare come la velocità di marcia influisca sulla fase ricarica dei condensatori. Essendo la velocità molto variabile, ma soprattutto resta inferiore a 30 km/h, ciò implica potenze di ricarica del sistema di accumulo notevolmente alte, superiori a quelle dei cicli simulati visti precedentemente, perché si è in condizioni limite per sfruttare la frenata rigenerativa, che in molti istanti della simulazione sarebbe risultata impossibile, quindi inibita dal software.

4.7 Test sperimentali su strada

I test su strada sono in corso da circa un anno. Sono state effettuate sia prove nelle strade interne del centro di ricerca di Enea Casaccia presso Bracciano, sia in diversi circuiti di altri centri di ricerca quali il POMOS di Cisterna di Latina.

Gli obiettivi principali del progetto sono quelli di testare la fattibilità di realizzare un veicolo ibrido serie con sistema di stoccaggio dell'energia con supercapacitori e sviluppare un'adatta logica di gestione dei flussi energetici.

I primi test sperimentali sono stati spesi per completare la taratura dei sistemi di gestione dei vari componenti, in particolar modo per fissare i tempi di risposta dei filtri del gruppo motogeneratore allo scopo di rendere la guida sicura, affidabile ed efficiente al tempo stesso. Per una corretta valutazione del sistema di controllo sviluppato, in questa fase è stato trascurato il contributo della frenata rigenerativa, che, come detto in precedenza, è una fonte ausiliaria di energia e quindi non influenza la logica di gestione del sistema.

Anche in questo caso sono state eseguite numerose prove sperimentali di cui due sono riportate di seguito.

In figura 61 è riportato l'andamento di un test della durata di 250 s, caratterizzato da tre accelerazioni principali ed un'alta velocità media. La tensione dei supercapacitori è pari a 52 V. Questo è il valore ottimale scelto tenendo conto che si trova a metà tra il valore massimo e minimo della tensione dei supercapacitori. Questa scelta è stata fatta per garantire equità tra le possibili condizioni di marcia del veicolo, senza privilegiare, in questa fase, ne la fase di cessione di energia che quella di recupero. Il ritardo del filtro di segnale è posto a 5 s.

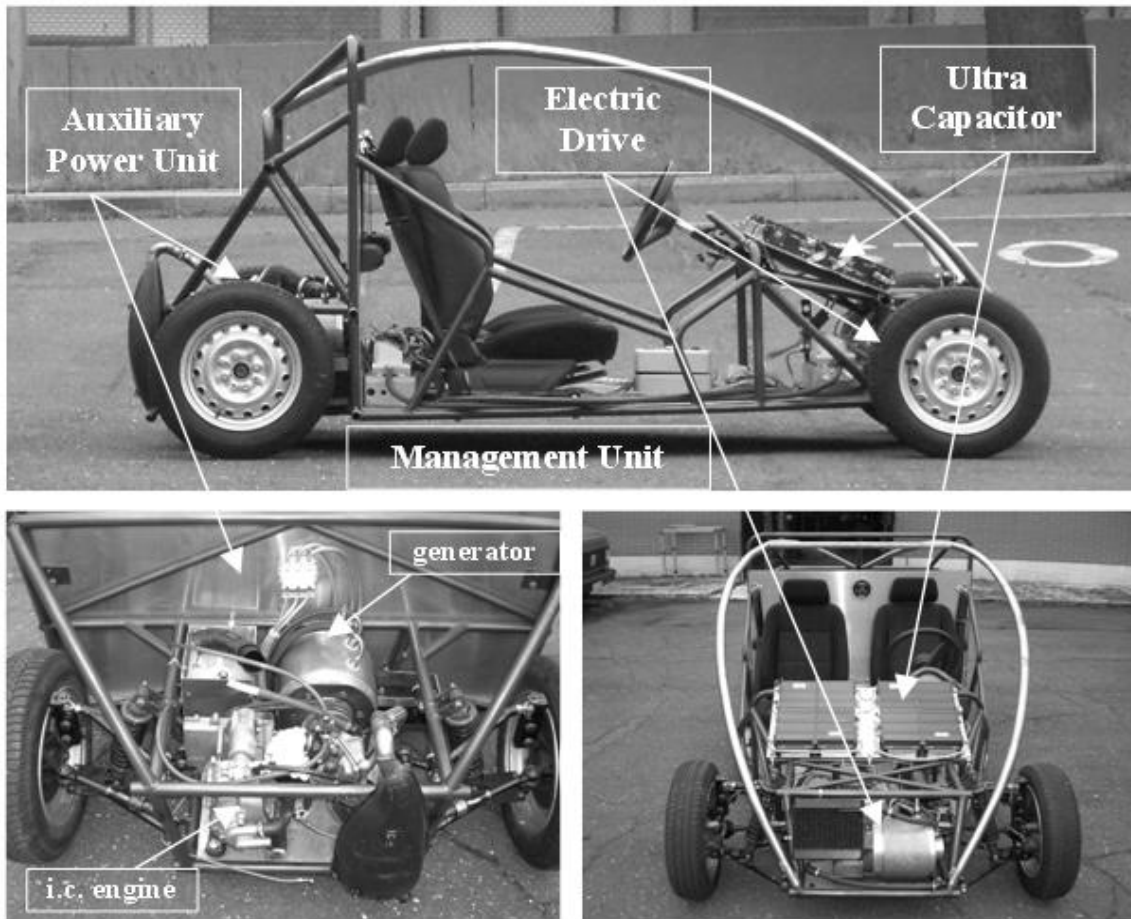


Figura 59 Fotografie del veicolo senza carrozzeria



Figura 60 Foto del veicolo Urb-e carrozzato

Come si può facilmente osservare, la dinamica del motogeneratore è troppo lenta, pertanto al sistema di accumulo non viene fornita abbastanza energia, così i supercapacitori si scaricano rapidamente, con conseguenti problemi di stabilità e gestione energetica. Nel primo significativo gradiente di potenza, intorno a 90 s, vi è un picco di richiesta da parte del motore di trazione e la tensione scende velocemente al di sotto dei 38 V. Per motivi di sicurezza dei sistemi elettronici, quando la tensione dei supercapacitori è inferiore a questa soglia, il sistema di gestione limita l'erogazione della potenza del motore di trazione, si veda la figura 61 tra gli istanti 115 s e 120 s e ancora tra 175 s e 190 s. In tali periodi l'energia prodotta dal motogeneratore viene utilizzata interamente per riportare la tensione del sistema di accumulo oltre 40 V. Questo sistema di interruzione di potenza viene attivato per garantire che i componenti elettrici restino in funzione. In particolare, sia il DSP che l'inverter necessitano di una tensione superiore ai 36 V per funzionare correttamente senza subire danni, quindi il sistema di gestione deve garantire che questi componenti siano accesi per avviare di nuovo le condizioni di guida normali, non appena la tensione del sistema di accumulo viene ristabilita.

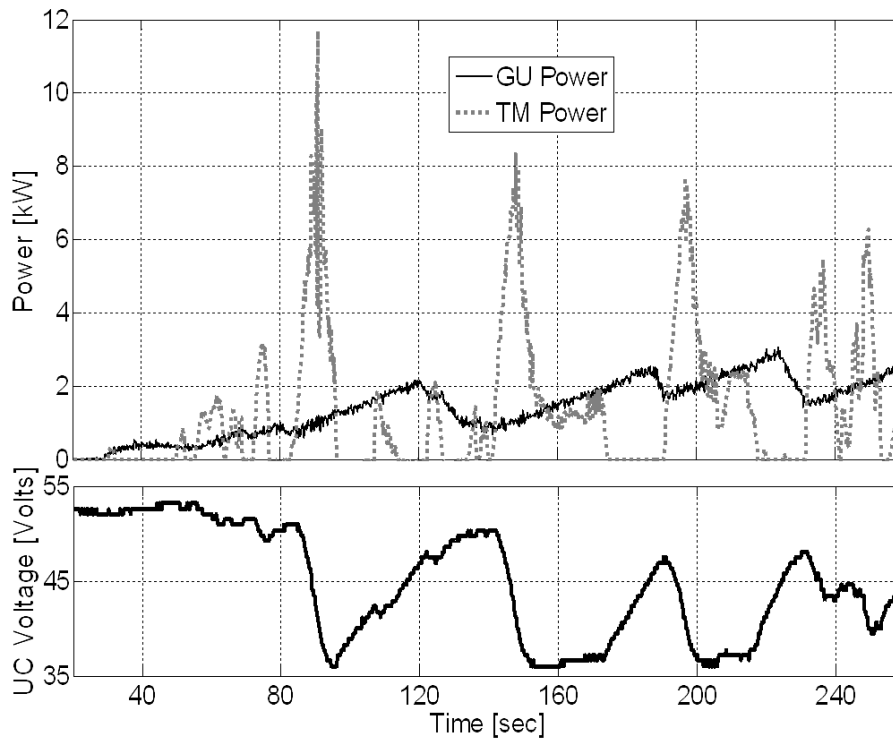


Figura 61 Test 6 per la taratura del filtro di potenza

Appare chiaro quanto sia importante un tale sistema di controllo, tuttavia è inaccettabile ed estremamente pericoloso che durante le fasi di guida normale il sistema di gestione interrompa l'erogazione di potenza per la trazione, dando luogo ad una situazione in cui il veicolo risulta ingovernabile.

Nella successiva figura 62 è riportato invece un test successivo della durata di 170 s. in questo caso il percorso è caratterizzato da condizioni variabili di guida e da una bassa velocità media. La tensione iniziale dei supercapacitori è ancora 52 V, ma il ritardo del filtro è stato ridotto a 1,5 s. Con questo set di parametri la richiesta di potenza del motore di trazione è sempre soddisfatta e la tensione del sistema di accumulo non scende mai al di sotto di 40 V. In questo modo non ha luogo alcuna interruzione dell'erogazione di potenza e quindi vengono evitate possibili situazioni di pericolo o inibizione del controllo del mezzo.

È da sottolineare come quando la richiesta di potenza è sufficientemente bassa, è possibile mantenere la tensione del sistema di accumulo a 52 V ed abbassare la potenza di ricarica del motogeneratore. Si osservi la figura 62 dall'istante 130 s fino alla fine del test.

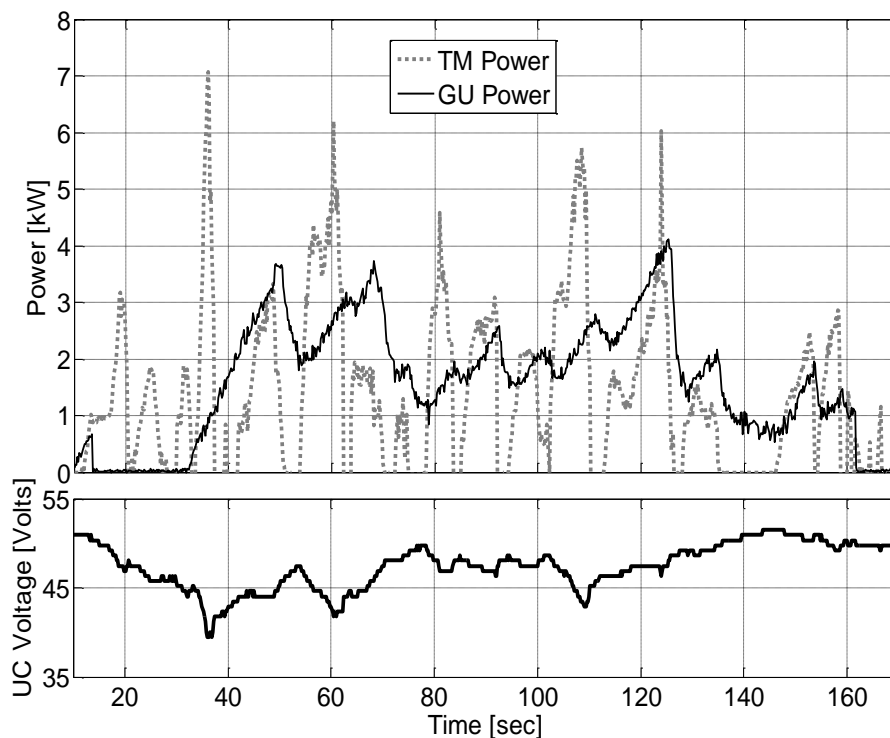


Figura 62 Test 9 per la taratura del filtro di potenza

Il miglioramento nella strategia di controllo può essere apprezzato confrontando diversi punti nei due test riportati. In figura 61, all'istante 190 s vi è una richiesta di potenza pari a circa 7 kW. La tensione corrente dei supercapacitori è di 47 V e la potenza fornita dal motogeneratore è di 2 kW. Dopo 10 s, la tensione è scesa sotto 38 V, l'erogazione della potenza viene interrotta e di conseguenza la potenza del motore di trazione interrotta. Invece, in figura 62 all'istante 100 s, la tensione è pari a 46 V, il motogeneratore eroga 2 kW e la potenza richiesta è di circa 6 kW. La richiesta di potenza dura, come prima, circa 10 s, ma in questo caso la tensione del supercapacitore raggiunge 44 V, con una caduta di soli 2 V. Il sistema è quindi in grado di soddisfare le successive richieste di potenza per la trazione ed inoltre lo stato di carico del sistema di accumulo aumenta in ragione dell'incremento di potenza del gruppo motogeneratore.

Capitolo 5

Come indicato nel paragrafo 1.2.1, quello dell'efficienza energetica è, stando alle proiezioni e statistiche internazionali, il nodo gordiano per la risoluzione dei problemi economico-ambientali. Infatti, almeno dal punto di vista quantitativo, essa rappresenta il contributo più rilevante nella lotta alla riduzione dei consumi energetici con quasi 50% del totale.

È chiaro che con efficienza energetica si intendono sia una pressoché infinita possibilità di interventi pratici ed amministrativi (illuminazione, contratti energetici, manutenzione, ecc.) quanto diversi ambiti possibili di intervento, che vanno dal residenziale, agli edifici pubblici fino ad arrivare all'industria. È proprio riguardo a quest'ultimo, che si è sviluppata parte della mia attività di ricerca degli ultimi tre anni.

Il concetto di "Energy Management", ormai di dominio pubblico e utilizzato da tutti quanti, anche dai non addetti ai lavori, è nato e si è sviluppato negli ultimi decenni nel settore industriale. Letteralmente può essere tradotto con "gestione" o "amministrazione" dell'energia. Tuttavia il significato intrinseco del concetto di Energy management è molto ampio, proprio perché sviluppatosi in ambito industriale che per sua natura è molto vario, presenta diverse problematiche e molti approcci risolutivi.

Proverò prima ad analizzare in generale questo concetto e illustrerò il contributo da me sviluppato in tal senso.

5.1 Energy Management

Il concetto di Energy Management inizia a "farsi strada" all'interno della gestione delle aziende, nel settore industriale, dopo la "crisi petrolifera" del 1973, attraverso un processo graduale, che si è evoluto nel corso degli anni. L'importanza raggiunta da questo genere di attività è stata ampliata, soprattutto negli ultimi anni, da un crescente interesse da parte del "contesto sociale" (cittadini, associazioni ecc.), che hanno acquisito una maggiore consapevolezza dei problemi ambientali (di cui si parla quotidianamente su giornali, televisioni ecc.), correlati spesso ad un errato utilizzo dell'energia.

Gli obiettivi alla base di una efficiente gestione energetica, sono diversi, e per essere perseguiti necessitano di una combinazione di abilità sia tecniche che manageriali: per questo il livello di preparazione di tecnici e dirigenti a capo di questi programmi deve essere elevato e le loro competenze dovrebbero svilupparsi in maniera "trasversale".

Questo, fondamentalmente, perché i problemi posti dall'Energy Management necessitano di una risoluzione "trasversale" che possa contare su un approccio multisettoriale ed organico all'interno dell'azienda, comprendente molti ambiti, spesso completamente diversi tra loro (consulenze tecniche, controlli gestionali ecc.).

Le definizioni che possono essere adottate per l'Energy Management sono molteplici, più o meno specifiche o appropriate, ma una delle più sintetiche e generalmente condivise è la seguente [23]:

"Giudizioso ed efficiente utilizzo dell'energia al fine di massimizzare i profitti (o minimizzare i costi) e migliorare la posizione competitiva (dell'azienda in questione)".

In questa definizione risulta evidente il duplice obiettivo che si pone l'Energy Management: la riduzione dei costi (o massimizzazione dei profitti) ed il miglioramento della competitività dell'azienda.

Mentre per il primo obiettivo la spiegazione è abbastanza chiara e scontata, ponendo in evidenza il ruolo fondamentale che giocano i costi energetici nel bilancio di un'azienda, il secondo va interpretato facendo riferimento ad un contesto molto più ampio, in cui vengono considerati diversi fattori, che sono determinanti per un'azienda che aspiri ad una gestione più flessibile dei consumi energetici, e sempre meno dipendente dai possibili cambiamenti degli scenari. Proprio per questo uno degli elementi principali di un programma di Energy Management è la flessibilità, intesa come capacità di adattarsi rapidamente e senza causare grosse perdite economiche, ai cambiamenti relativi a situazioni "esterne" all'azienda, per risultare sempre competitiva ed all'avanguardia [24].

Oltre a questi due obiettivi "primari", possono essere elencati una serie di altri "sub-obiettivi", anch'essi molto importanti, che si cerca di raggiungere con una buona gestione energetica:

- migliorare l'efficienza energetica (Energy Efficiency) e ridurre i consumi
- attivare dei canali di comunicazione sulle questioni riguardanti l'energia
- sviluppare un efficiente sistema di monitoraggio, di reporting e di gestione dell'energia
- cercare, attraverso la ricerca e lo sviluppo, nuove metodologie che migliorino le rese (il "ritorno") degli investimenti "energetici"
- sviluppare un interesse da parte di tutti i dipendenti dell'azienda nel programma di Energy Management
- diminuire l'impatto che può generare sul rendimento dell'azienda qualsiasi tipo di riduzione/interruzione del rifornimento energetico.

Inoltre l'introduzione di un buon sistema di gestione energetica in un'azienda garantisce anche un valido aiuto per la risoluzione di problemi che negli ultimi anni sono diventati particolarmente "sentiti", sia dalle autorità governative che dalla popolazione (grazie soprattutto all'interesse suscitato da giornali, televisioni ecc.), quali le questioni riguardanti la salvaguardia dell'ambiente.

L'Energy Management, infatti, ci fornisce un grande aiuto per il miglioramento della qualità ambientale, aspetto fondamentale sia per il raggiungimento di un continuo progresso in termini di "qualità della vita", sia per far fronte agli standard ambientali che diventano sempre più stringenti, soprattutto in relazione alle emissioni di CO₂ e di zolfo (responsabile delle piogge acide). A titolo esemplificativo, si pensi alla riduzione nella generazione di anidride carbonica che si otterrebbe diminuendo il consumo di combustibile (solido, liquido o gas) in uno stabilimento [25].

Infine, si deve considerare anche l'importanza a livello di "competitività rispetto al mercato industriale" che può essere raggiunta con un buon sistema di gestione energetica, per esempio riducendo i costi di produzione o i servizi, diminuendo l'intensità energetica industriale ecc.: il risparmio che può essere ottenuto mediamente è riportato di seguito:

- attività di basso costo per 1-2 anni dal 5 al 15%
- sforzi significativi di moderato costo, per 3-5 anni dal 15 al 30%
- soluzioni ingegneristiche, con costi elevati, lungo periodo dal 30 al 50%

Questi importanti risultati possono essere raggiunti mediante un efficace programma di gestione energetica, che si basi su principi chiari come [26]:

- riuscire ad ottenere tutta l'energia necessaria al minor prezzo possibile
- gestire gli usi di energia ai più alti livelli di efficienza realizzabili

- riutilizzare e riciclare l'energia con un metodo "a cascata" (per esempio recuperando calore scaricato)
- utilizzare le tecnologie più appropriate
- ridurre/eliminare le perdite energetiche

5.1.1 Evoluzione dell'Energy management nelle aziende

Benché il concetto di "Energy Management" venga associato spesso a quello di "conservazione energetica", occorre sapere che essi sono ben distinti: nonostante abbiano entrambi lo stesso fine, (quello della riduzione dei costi energetici di un'azienda) i "mezzi" non risultano essere gli stessi.

Infatti, mentre i programmi di conservazione energetica focalizzano la propria attenzione su "singole attività" che vengono implementate in determinati momenti per ridurre i consumi, quelli di Energy Management si concentrano sull'intero processo di utilizzo dell'energia ed i risultati vengono raggiunti mediante attività che si sviluppano nel tempo e che sono inserite in contesti più ampi ed articolati.

In un certo senso, le attività di energy conservation possono essere considerate una sorta di "azioni precorritrici" rispetto all'impostazione di un programma di energy management, anche per quanto riguarda la sua graduale "introduzione" ed "impostazione" nelle aziende, che si è modificata nel corso degli anni [27].

Nonostante alcuni stabilimenti industriali avessero iniziato ad introdurre le tecniche di gestione energetica già negli anni precedenti al 1973, possiamo dire che in generale i programmi di Energy Management erano completamente sconosciuti prima di quel momento. Questo principalmente perché i costi energetici risultavano decisamente bassi ed inoltre era diffusa la credenza che le risorse primarie di energia fossero illimitate. In aggiunta, si pensava che il risparmio energetico fosse indice di riduzione degli standard di vita, calo della produttività e degli output delle organizzazioni: il lato sotto il quale veniva visto era, quindi, sostanzialmente negativo e privo di conseguenti benefici.

Le cose cambiarono il 19 Ottobre del 1973, quando i membri arabi dell'OPEC (Organizzazione dei Paesi esportatori di petrolio) annunciarono un taglio del 25% nella produzione di greggio e ne vietarono l'esportazione verso gli Stati Uniti ed i Paesi Bassi: l'embargo fu una ritorsione per il supporto e gli aiuti militari dati ad Israele da questi Paesi durante la Guerra in Medio Oriente.

L'impatto nell'economia mondiale fu devastante e il risultato fu quello di una generale recessione. I manager industriali, dovendosi raffrontare direttamente con l'impennata dei costi ed il rischio della chiusura delle aziende, risposero a questa situazione implementando alcune misure di "energy conservation".

Fase 1: "Quick Fixes"

Le prime misure che vennero adottate furono quelle di rapido sviluppo, denominate appunto "quick fixes", che richiedevano piccole pianificazioni o investimenti contenuti per essere implementate. Gli esempi maggiori di interventi di questo tipo furono l'abbassamento della temperatura dei termostati nelle stagioni "fredde" (in cui si richiedeva riscaldamento) ed il conseguente innalzamento quando era invece necessario l'utilizzo di un sistema di condizionamento, oppure l'impiego di un timer per controllare l'accensione del sistema di illuminazione.

Questa tipologia di interventi riuscì a generare risparmi sostanziosi in ambito energetico e gettò le basi per lo sviluppo di ulteriori misure di conservazione dell'energia.

Fase 2: "Energy Projects"

Una volta pianificato e realizzato un ampio range di "quick fixes", ci si rese conto che per raggiungere ulteriori ed efficaci risultati in questo campo, sarebbero state necessarie attività di gestione energetiche con alla base un investimento temporale ed economico sicuramente più sostanzioso: l'interesse si spostò quindi su veri e propri progetti energetici, gli "Energy Projects".

Per questo venne introdotto un metodo per il calcolo del tempo di ritorno di un investimento, quello del "simple payback". Il tempo di ritorno di un progetto energetico, espresso in mesi o anni, viene calcolato dividendo il costo stimato per l'investimento con la stima del risparmio economico annuale che verrà generato da esso:

$$SIMPLE.PAYBACK = \frac{\text{CostoInvestimento}}{\text{RisparmioAnnuale}}$$

Fase 3: Piano di gestione energetica completa

Le operazioni di risparmio energetico descritte sopra aiutarono molto le industrie a non interrompere le attività durante i periodi di "penuria energetica" e di vertiginosa impennata dei prezzi. Comunque, nonostante tutto, i prezzi continuarono a salire e le aziende cercarono di combattere questo fenomeno introducendo un programma più esteso e completo, che si occupasse più che della riduzione degli usi, della gestione totale dell'energia nello stabilimento.

Questo genere di programma prevedeva l'introduzione e la nomina di una persona che avesse il solo compito di gestire questi aspetti, l'Energy Manager, e, conseguentemente, uno staff su cui quest'ultimo potesse fare affidamento. Vennero ripresi progetti presentati precedentemente (sia "quick fixes" che "energy projects") e sviluppati in maniera più ampia, venne sviluppato un sistema di monitoraggio e fu scoperta la manutenzione preventiva come efficace forma di risparmio, in quanto capace di assicurare il funzionamento dei vari macchinari sempre in condizioni ottimali.

Fase 4: Calo di interesse

Negli anni '80 ci fu un'inversione degli interessi che si stavano sviluppando nel decennio precedente. I prezzi dell'energia in un primo momento si stabilizzarono e successivamente iniziarono a diminuire: i giornali parlarono di "Fine della crisi". In questo contesto, l'Energy Management venne abbandonato e si pensò di aver risolto definitivamente il problema energetico.

Questa situazione proseguì anche negli anni '90 e, quindi, continuò a diffondersi l'idea che gli sforzi economici ed organizzativi, fatti per ottenere un risparmio ed una migliore gestione dell'energia, fossero ormai inutili: le risorse e l'attenzione delle varie aziende, da quel momento, vennero perciò concentrate in altri campi. Anche quando alcuni eventi drammatici, come la "Guerra del Golfo" o il duro inverno del 1995, innescarono temporanei aumenti dei prezzi, si pensò che potessero essere delle "anomalie" temporanee, tranquillamente ignorabili.

Fase 5: Ritorno al punto di partenza

La situazione di questi due decenni è cambiata, fortunatamente in questi anni, grazie al crescente interesse suscitato da alcuni fattori, che hanno di nuovo portato in primo piano la necessità di un sistema efficiente di gestione energetica. Benché le forniture energetiche fossero ancora abbondanti, ci si iniziò a chiedere per quanto tempo ancora si sarebbe potuto continuare a produrre a questi livelli, e soprattutto con questi prezzi. Due furono, in particolare, i fattori che scatenarono queste preoccupazioni:

- la crescente importanza che stavano assumendo le importazioni di petrolio nell'economia di diversi Paesi
- la diminuzione delle riserve energetiche mondiali.

Ora, però, molte sono le difficoltà dal punto di vista organizzativo soprattutto perché l' "abbandono" dello studio di soluzioni per una migliore gestione energetica ha causato un "vuoto", una "mancanza" di personale tecnico preparato ad affrontare e risolvere per questi problemi. Oggi le aziende riconoscono nuovamente l'importanza, il valore ed il bisogno di un programma completo di Energy Management, ma, se aspirano ad una gestione che sia di successo, devono guardare al futuro, cercando al contempo di capire quello che ha funzionato (e non) nel passato e perché. Gli Energy Manager attuali non possono permettersi di fare di nuovo l'errore di "buttare soldi" su questo problema. I programmi devono essere chiari ed efficaci, come gli scopi ed i risultati che si vogliono raggiungere: per questo servono studi approfonditi, persone informate e specializzate ed un programma che sia completo e dettagliato.

5.2 Quadro concettuale

Gli elementi fondamentali per la buona riuscita di un programma di Energy Management sono quattro:

- supporto dai vertici dell'azienda (Top Management)
- impostazione di un efficace piano strategico
- sistema di monitoraggio appropriato
- supporto di personale con adeguate capacità tecniche

Tutti e quattro gli elementi sopra citati devono essere presenti in un'azienda che decida di intraprendere questa via con successo.

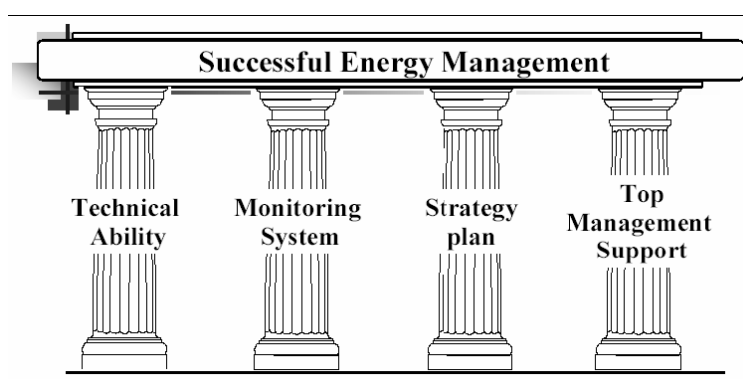


Figura 63 "Pilastrini" dell'energy management

Per quanto riguarda l'impostazione generale di un piano di gestione energetica, esso parte dal commissionamento di un incarico ("commitment"), che può venire dall'interno dell'azienda o su "proposta personale", i.e. dall'esterno. Successivamente devono essere valutate le "performance" che possono essere raggiunte e poi definiti gli obiettivi. Soltanto dopo aver fatto ciò, si potrà pensare all'impostazione di un piano d'azione che dovrà poi essere implementato: i progressi riscontrati dovranno essere valutati ed, eventualmente "ri-valutati" (nel senso che si potrebbero riscontrare performance diverse da quelle previste, che potrebbero condurre poi ad una formulazione diversa dei risultati ottenibili), e infine riconosciuti i risultati. Questo processo concettuale genera un ciclo virtuoso, osservabile in figura 64, nell'ottica di un continuo miglioramento della gestione energetica aziendale, cioè di un continuo "creare" ed "implementare" piani d'azione [28].

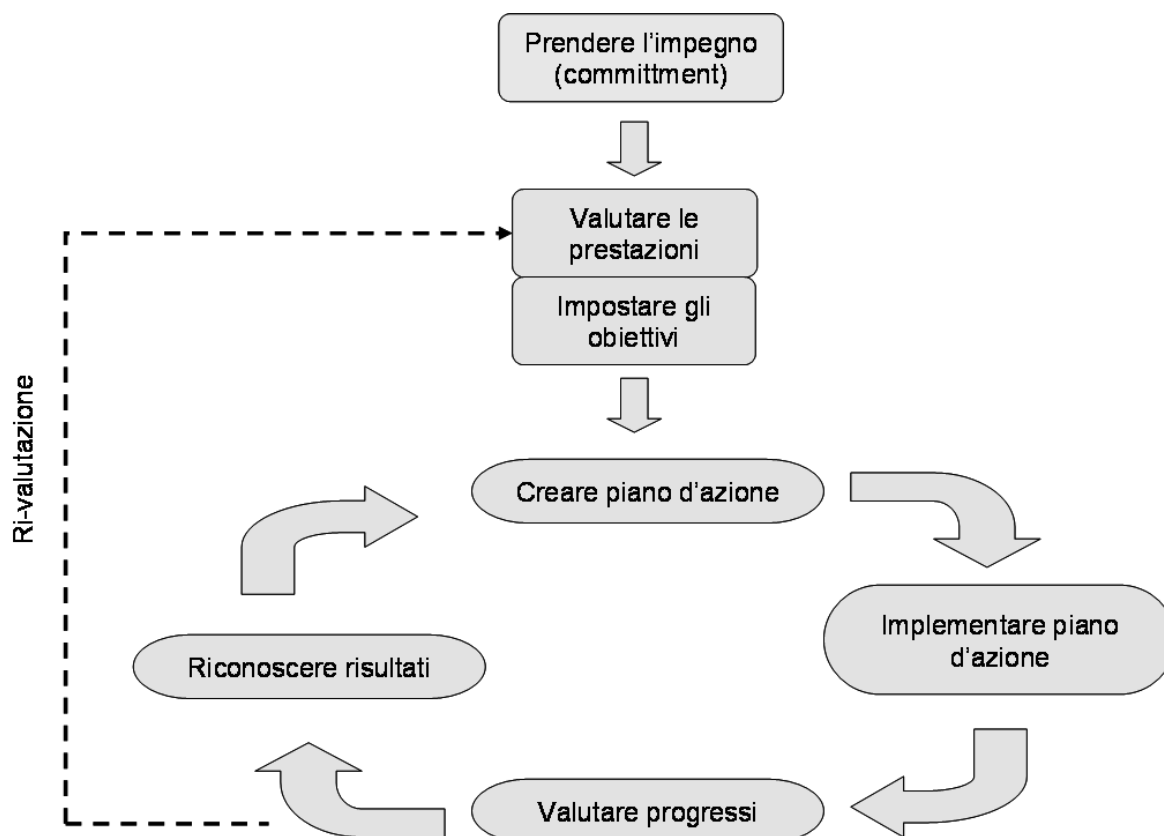


Figura 64 – Schema concettuale Gestione Energetica

5.3 La metodologia sviluppata: un approccio integrato

La crescente domanda di energia unita alla preoccupazione per la protezione ambientale richiede oltre allo sforzo politico, quello congiunto di ricercatori ed industria per fronteggiare significativamente quella che si configura ormai come emergenza. Infatti la regolamentazione legislativa non è più sufficiente a porre rimedio ai continui aumenti dei costi, dell'inquinamento e dell'effetto serra se non in termini di riduzione del consumo energetico. Alle leggi, pertanto, devono necessariamente fare eco una diffusione della conoscenza sui sistemi energetici, sulle possibilità di risparmio e sulla razionalizzazione dell'uso dell'energia stessa [29]. Ciò appare vero in particolar modo per quegli attori che rappresentano i principali utilizzatori di energia,

i.e. l'industria, i quali devono capire che l'energia non è un costo operativo fisso e che il risparmio energetico è in realtà uno dei più significativi mezzi in grado di ridurre i costi oltre che preservare l'ambiente. Esempio principe in questo contesto è il Giappone. Nel mondo industrializzato esso rappresenta infatti, la realtà più efficiente, basti pensare che ha accresciuto la propria produzione del 40% utilizzando la stessa energia nel 2001 così come nel 1973 [30].

Il risparmio energetico può essere raggiunto attraverso differenti metodi sia sul lato utilizzazione che sul lato produzione [31]. Tuttavia, questo obiettivo è veramente complicato da raggiungere dal momento che molti sono i fattori che influenzano la conversione, l'uso e la produzione di energia. Per di più questi fattori sono strettamente interconnessi, il che complica ulteriormente le cose: il singolo contributo al risparmio energetico di un intervento non può essere semplicemente sommato a causa della sovrapposizione degli effetti. Inoltre è bene sottolineare che il risparmio energetico è energia "non consumata" quindi non direttamente misurabile [32].

È proprio in questo contesto che parte del mio lavoro di tesi di dottorato si pone. Il gruppo di ricerca rappresentato dalle cattedre di Macchine e Impianti Industriali dell'Università di Roma "Tor Vergata", ha sviluppato una metodologia per la razionalizzazione della progettazione e della gestione dell'energia per sistemi energetici complessi.

Caratteristica principale della metodologia proposta è di intendere il complesso delle azioni riguardanti l'energia in maniera "integrata". In altre parole, il nostro scopo è stato quello di realizzare uno strumento che avesse uno sguardo a 360° su tutte le problematiche di natura energetica (gestionali, tecniche, amministrative ed operative) che esistono in uno stabilimento industriale piuttosto che in un edificio commerciale di grandi dimensioni.

La metodologia proposta può essere suddivisa nelle cinque seguenti macroaree:

- analisi, monitoraggio e controllo dei dati
- tariffe energetiche
- sviluppo di modelli previsionali
- budgeting
- ottimizzazione dell'autoproduzione

Nello specifico di questo lavoro di ricerca il mio contributo è stato dedicato principalmente all'ottimizzazione dell'autoproduzione attraverso lo sviluppo di un modello rappresentativo della centrale energetica e delle sue componenti. Tale modello è stato in seguito implementato in un codice informatico che permettesse di simulare le realtà da studiare e valutare i risultati ottenuti. Per questo motivo, nel prosieguo della tesi affronterò in maniera specifica solamente questo argomento, illustrando rapidamente le altre quattro macroaree.

Analisi, monitoraggio e controllo dei dati

Questa parte ha l'obiettivo di valutare quale sia la situazione di partenza della realtà in studio e definire in maniera chiara le priorità di intervento delle diverse macroaree di azione (tariffazione, sistema di autoproduzione, previsione consumi e controllo del budget). Gli interventi proposti saranno concentrati laddove è, non solo più conveniente in termini immediati di risparmio economico/energetico, ma anche e soprattutto tenendo in considerazione l'efficienza e la funzionalità delle azioni che devono essere intraprese per avviare un processo di miglioramento continuo dello stato in essere dell'azienda.

Tale fase viene effettuata basandosi sia su:

- dati storici già presenti in azienda
- informazioni aggiuntive circa il funzionamento dell'impianto
- modalità di gestione dei consumi energetici attraverso interviste

è chiaro come i risultati ottenibili dipendano in maniera significativa dalla numerosità e dalla correttezza dei dati disponibili e dalla collaborazione degli addetti aziendali.

Attraverso l'analisi e la creazione di un database dei dati acquisiti è possibile definire la costruzione di un albero dei contatori nelle aree fisiche che maggiormente richiedono controllo perché particolarmente energivore ovvero perché delicate da un punto di vista funzionale/strutturale. Infatti, la possibilità, grazie ai dati acquisiti, di sviluppare modelli matematici previsionali di comportamento consente il controllo e la gestione delle situazioni che vengono a crearsi durante la normale attività. Inoltre, i modelli di comportamento consentono altresì la pianificazione e verifica in opera delle fasi successive di intervento.

Sviluppo di modelli previsionali

Naturale conseguenza della fase precedente e condizione necessaria per poter elaborare quelle successive, la realizzazione di modelli statistici consente la previsione dei profili di domanda e consumo di energia. Per lo sviluppo dei modelli di previsione, siamo ricorsi alla regressione lineare multipla, consolidata tecnica mutuata dalla teoria dell'analisi statistica [33]. In particolare, si tratta di un metodo per descrivere il comportamento di una variabile dipendente, Y , funzione di più variabili indipendenti, X_i . Formula rappresentativa può essere quella seguente:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (5.1)$$

Indicando con Y il consumo di energia, è possibile attraverso la conoscenza delle variabili chiave, X_i , denominate "energy driver" definire i coefficienti β_i che rappresentano il modo in cui la variazione di ciascun energy driver influenza la variazione del consumo. Per intenderci, maggiore è il valore assoluto di β_i , maggiore è l'influenza che un cambiamento di valore di X_i ha sulla variabile Y .

Possibili energy driver sono: produzione, turni lavorati, temperatura esterna, occupazione degli ambienti e tutti quei fattori che in un contesto lavorativo possono dar luogo ad una variazione di consumo energetico. È bene sottolineare che possono essere sviluppati modelli previsionali sia dell'intero sistema che per particolari aree circoscritte, a condizione che siano disponibili i dati di consumo e degli energy driver, cioè si abbiano a disposizione sistemi di misura e di controllo delle operazioni.

Da un punto di vista pratico l'elaborazione dei modelli di previsione affidabili richiede:

- Individuazione degli energy driver in grado di influenzare i consumi del contatore in esame
- Determinazione della scala temporale di analisi (mese, settimana, giorno, ecc.)
- Raccolta di dati (storici o meno) sui valori di consumo registrati e dei rispettivi valori degli energy driver che li hanno determinati (ad es. volumi, ore lavorate, ecc.)
- Validazione del modello con test statistici

Tariffe energetiche

In seguito alla liberalizzazione dei mercati dell'energia il quadro della fornitura di energia elettrica e gas è diventato un argomento notevolmente complesso per le aziende, sia in termini di contrattazione che di comprensione. La presenza infatti di molteplici attori nel mercato e la conseguente varietà di offerte (fisse, indicizzate, a più fasce, ecc.), soprattutto in materia di energia elettrica, rende l'operazione di difficile gestione. D'altra parte questa situazione consente di ottenere dei significativi vantaggi, laddove ci sia conoscenza delle proprie esigenze e modalità operative.

Attraverso lo sviluppo dei modelli previsionali di domanda energetica è possibile operare tutti i confronti del caso allo scopo di individuare l'offerta migliore in base al reale profilo di consumo energetico dell'azienda. Il confronto tra le varie offerte avviene sulla base del costo medio per singola offerta di fornitura di energia.

Dal momento che stiamo parlando di previsioni statistiche, ci muoviamo in un contesto passibile di modifiche anche sensibili, è chiaro quanto sia di importanza fondamentale poter variare i parametri delle simulazioni che effettuiamo. Le ipotesi che necessariamente devono essere fatte riguardo ai vari parametri della simulazione stessa possono avere un impatto più o meno significativo sulla stessa ed è bene capire quanto tali variazioni siano significative. È fondamentale pertanto valutare la robustezza della proiezione in funzione delle ipotesi fatte:

- Previsione degli indici dei panieri di riferimento per la formulazione del prezzo di vendita
- Ripartizione dei carichi nelle diverse fasce
- Valori assunti dagli energy driver

In tal senso la metodologia prevede la possibilità di fare delle analisi di sensibilità, cioè variare percentualmente i parametri di simulazione verificando l'impatto che tali variazioni hanno sul costo medio dell'energia.

Budgeting

Fase fondamentale per una corretta allocazione delle risorse economiche, l'Energy Budgeting consiste nella pianificazione e nel controllo delle spese stimate per far fronte ai consumi energetici dello stabilimento, in particolare di quelle relative all'utilizzo di energia elettrica: generalmente questa analisi si basa sugli studi effettuati per l'elaborazione di modelli per la previsione dei consumi, per l'individuazione di energy drivers e per la stima e la previsione di costi elettrici.

La metodologia di budgeting proposta prevede la differenziazione in 2 fasi distinte: quella di "budgeting" vero e proprio e quella di controllo. Nella prima fase, devono essere valutati i consumi ed i costi sulla base dei risultati ottenuti dai modelli previsionali di consumo, e della migliore opzione tariffaria. In riferimento a queste considerazioni, il "costo budget" (BC), può essere calcolato come segue:

$$CB(t, \alpha, \beta, \dots) = f_{opt}(t) \cdot C(\alpha, \beta, \dots) \quad (5.2)$$

Dove la funzione f rappresenta la "tariffa ottimale" per l'azienda, mentre C i consumi energetici (identificati da una quota fissa, E_0 , e da una variabile, dipendente dagli energy drivers).

Per la fase di controllo sono stati definiti degli indicatori che consentono non solo di valutare il rispetto o meno del budget previsionale, ma soprattutto di andare ad individuare le cause che possono aver causato tale scostamento. Tali indicatori sono:

- di consumo specifico
- di gestione
 - prezzo unitario dell'energia
 - volumi prodotti
 - mix dei prodotti
 - orari di produzione

in seguito allo studio di questi fattori è possibile aggiornare il budget in due modi:

- considerando il modello di previsione iniziale avendo eliminato le cause di inefficienza
- ricostruendo il modello di previsione dei consumi sulla base delle nuove performance

Capitolo 6

Le macroaree illustrate nel capitolo precedente sono accomunate da un profilo di intervento di taglio amministrativo-gestionale: budgeting, tariffe energetiche e monitoraggio. D'altra parte, la metodologia ha l'obiettivo di sviluppare un discorso a "tutto tondo" che interessi l'argomento "energia". In tal senso, la sezione "ottimizzazione dell'autoproduzione" è stata sviluppata proprio per fornire un supporto tecnico-pratico a quelle realtà più complesse, dove l'energia non solo viene acquistata dall'esterno, ma viene anche autoprodotta "in situ".

In effetti, in seguito alla liberalizzazione dei mercati dell'energia, è diventato possibile vendere parte dell'energia autoprodotta a terzi (in realtà cedendola alla rete nazionale). Da un lato ciò è positivo, in quanto l'azienda non è costretta a considerare l'energia semplicemente un costo da sostenere ma anche una risorsa da sfruttare. Ma dall'altro una conveniente gestione delle proprie risorse è tutt'altro che di semplice realizzazione richiedendo diverse abilità. Si tratta, infatti, di coniugare le competenze tecniche di conoscenza degli apparati costituenti gli impianti, con quelle economico-amministrative legate ai costi dell'energia elettrica, dei combustibili e delle manutenzioni.

Questa sezione della metodologia è proprio stata pensata e sviluppata come supporto al gestore e al progettista di impianti di produzione dell'energia per consentire un'accurata simulazione delle reali condizioni di funzionamento sia delle singole macchine costituenti l'impianto (delle loro prestazioni, dei consumi e dei costi) che delle dinamiche di consumo/costo dell'impianto nel suo complesso in modo tale da poter valutare su basi solide ed evidenti quali scelte compiere per conseguire i risultati di "migliore gestione" possibile.

Allo sviluppo della metodologia, quindi del modello matematico realizzato per la rappresentazione delle componenti il sistema, ha fatto seguito l'implementazione di un codice di calcolo. In effetti, è facile immaginare quanto possa essere complicato gestire tutte le variabili in gioco per la descrizione di sistemi complessi come quelli di cui ci stiamo occupando, oltre poi alla necessità di rendere fruibili non solo i risultati quantitativi di un simile lavoro ma anche e soprattutto i risultati qualitativi non solo dell'insieme ma anche dello specifico. Pertanto ci è parso opportuno sviluppare un codice di calcolo che desse la possibilità:

- di simulare tutti gli aspetti necessari alla definizione e descrizione del sistema e delle sue componenti
- di valutare in maniera chiara e semplice i risultati della simulazione delle operazioni del sistema

6.1 Modellazione di sistemi di autoproduzione di energia

La rappresentazione del sistema di autoproduzione è stata ottenuta attraverso lo sviluppo di un modello matematico [34] che è in grado di emulare i bilanci di massa ed energia esistenti tra la centrale di potenza e l'edificio che essa soddisfa. Il modello consente l'accoppiamento della domanda di energia dello stabilimento (energia elettrica, acqua calda, refrigerazione, ecc) attraverso l'analisi delle prestazioni caratteristiche del sistema nel suo complesso, considerando le specifiche peculiarità dei principali sottosistemi, le loro necessità operative e la fattibilità economica delle azioni da eseguire.

In linea di principio, abbiamo da una parte una realtà che consuma energia ed è quindi univocamente determinata una volta definita la tipologia di consumi e la loro distribuzione temporale e spaziale. Dall'altra ci sono invece le varie macchine costituenti l'impianto che si occupano della produzione e trasformazione dell'energia che devono garantire il soddisfacimento delle richieste energetiche necessarie al normale funzionamento della realtà in studio.

Con tali premesse, la nostra attenzione non si è concentrata sulla rappresentazione fedele dei processi chimico-fisici esistenti nei processi suddetti, come ad esempio la combustione, ma piuttosto abbiamo puntato ad una semplificazione dei componenti del sistema. Le macchine sono modellate come delle "black box" caratterizzate da un ingresso ed una o più uscite e le loro modalità operative sono note una volta definita la funzione di trasferimento (i. e. il rendimento) che lega l'input all'output. Mentre l'edificio è definito una volta individuati gli ingressi al sistema, che altro non sono che i fabbisogni energetici.

La soluzione di ciascun sottosistema e quindi del sistema intero è ottenuta attraverso equazioni di conservazione di massa ed energia ricorrendo ad un approccio quasi-statico, cioè le variabili sono considerate costanti tra due step temporali [35].

Sebbene in teoria possano essere rappresentate tutte le tipologie di macchine, al momento il modello è in grado di riprodurre le seguenti macchine:

- Motori a combustione interna
- Impianti turbogas
- Caldaie per la produzione di vapore ed acqua calda
- Macchine frigorifere elettriche
- Macchine frigorifere ad assorbimento
- Pannelli fotovoltaici
- Collettori solari termici

Effetto della scala temporale

Prima di proseguire nella descrizione del modello è bene sottolineare l'importanza della scelta scala temporale. Sebbene ogni intervallo temporale potrebbe essere in principio utilizzato per il modello numerico sviluppato, il minimo possibile è definito univocamente dall'intervallo tra i dati specifici disponibili dei carichi energetici.

I fabbisogni energetici altro non sono che l'integrale nel tempo della potenza fornita dalla centrale energetica. Idealmente, per rappresentare la curva istantanea di utilizzazione energetica avremmo bisogno di un infinito numero di dati. In Pratica, i dati disponibili in azienda, molto spesso, sono ben lontani dall'esserlo. Inoltre, va aggiunto che una tale precisione potrebbe essere anche inutile se non controproducente, in virtù dell'approssimazione usata nel metodo e dell'incertezza insita nella previsione stessa dei carichi.

Realizzare l'ottimizzazione della gestione di un sistema energetica richiede una scelta corretta dell'intervallo temporale di simulazione, che deve essere un giusto compromesso tra vari effetti. Ad esempio, uno step molto corto garantisce accuratezza e precisione, ma la gestione risultante delle macchine sarebbe di difficile applicabilità, sia da un punto di vista delle specifiche dei componenti, sia in termini di controllo delle stesse. D'altra parte un intervallo

molto lungo non renderebbe conto delle reali dinamiche caratterizzanti il sistema, comportando un appiattimento dei profili dei fabbisogni energetici non più rappresentativi della realtà in studio.

Passo ora a descrivere in maniera specifica le varie parti del modello sviluppato.

6.1.1 I fabbisogni energetici

Possiamo individuare 4 tipologie diverse di fabbisogni energetici principali:

- Energia elettrica (EE)
- Acqua calda (AC)
- Vapore (V)
- Freddo (F)

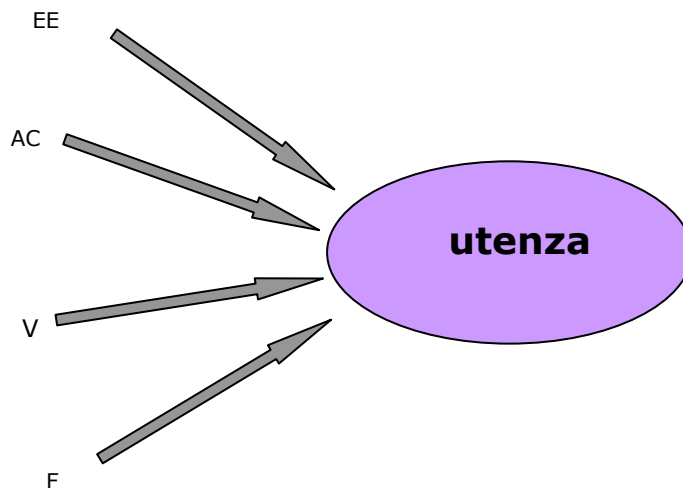


Figura 65 Rappresentazione schematica dei fabbisogni energetici

È stato usato il termine principale poiché, come è ovvio, è possibile avere pressoché infiniti valori delle temperature di acqua calda, vapore e freddo, di conseguenza infiniti fabbisogni energetici diversi.

È chiaro che non verrà mai a verificarsi una situazione del genere nella realtà, tuttavia è verosimile che ci siano 2 o 3 temperature diverse per queste grandezze (ad esempio acqua calda sanitaria e acqua calda per riscaldamento invernale), quindi il numero di utenze verrebbe a crescere.

In casi simili è possibile seguire 2 strade:

- sommare i contributi del fabbisogno energetico ed individuare un valore medio complessivo
- considerare distinte le utenze e analizzare la realtà con un numero maggiore di incognite

Il modello proposto non limita le possibilità di investigazione a priori, cioè la scelta del metodo da seguire è lasciata a chi intende eseguire uno studio. Va sottolineato, tuttavia, che non

esiste una regola aurea da seguire, ma che di volta in volta è bene valutare la convenienza del metodo da seguire caso per caso.

6.1.2 Motori a combustione interna per cogenerazione

Sebbene siano macchine di complesso funzionamento, seguendo il principio di semplicità che ha ispirato il modello sviluppato, i motori a combustione interna possono essere considerati come dei sistemi di conversione dell'energia chimica posseduta nel combustibile in energia elettrica, energia termica (acqua calda e/o vapore) ed eventualmente in energia di raffreddamento (trigenerazione).

Schema concettuale della modellazione è riportato sotto.

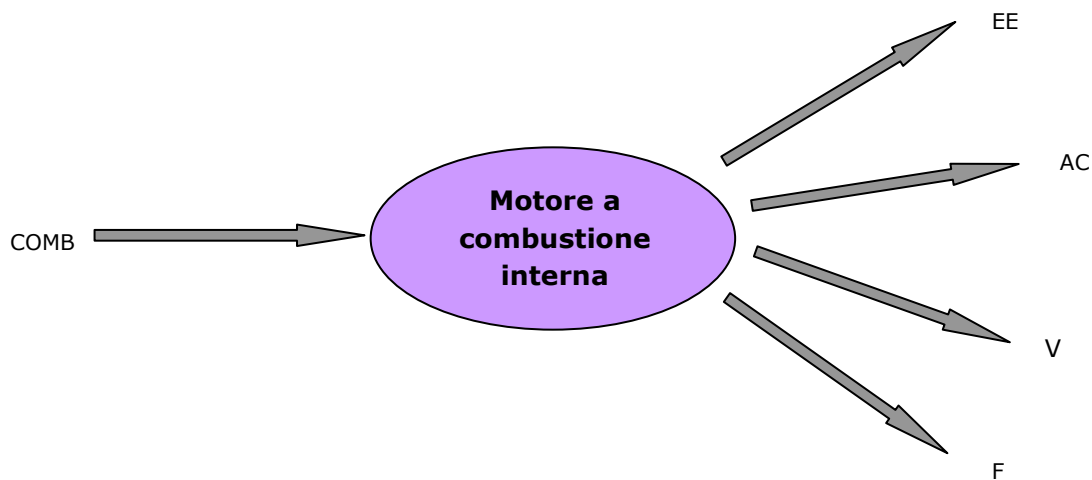


Figura 66 Rappresentazione schematica di un motore a combustione interna cogenerativo

Da un punto di vista della modellazione matematica l'energia chimica del combustibile è esprimibile come:

$$E_{comb} = \dot{m}_c \cdot H_i \quad (6.1)$$

dove

\dot{m}_c = portata massica di combustibile

H_i = potere calorifico inferiore del combustibile

Le potenze fornite da un motore a combustione interna sono dunque rappresentabili, seguendo la formalità appena utilizzata:

$$P_{el} = \dot{m}_c \cdot H_i \cdot \eta_{el} \quad (6.2)$$

$$\dot{Q}_{ac} = \dot{m}_c \cdot H_i \cdot \eta_{ac} \quad (6.3)$$

$$\dot{Q}_v = \dot{m}_c \cdot H_i \cdot \eta_v \quad (6.4)$$

$$\dot{Q}_f = \dot{m}_c \cdot H_i \cdot \eta_f \quad (6.5)$$

Ovviamente i vari rendimenti sono dipendenti dal carico, per cui il valore di ognuno di essi in generale è non costante. La rappresentazione di queste grandezze nel modello avviene attraverso la costruzione di una curva interpolata su dei valori noti degli stessi. In questo modo si ottengono curve diverse, ognuna delle quali esprime il rendimento di una macchina in funzione del carico della stessa. Nel paragrafo 6. Verrà affrontato in maniera specifica questo argomento.

6.1.3 Impianti turbogas

Sebbene costruttivamente molto diversi da un motore a combustione interna, la modellazione scelta nella metodologia che sto proponendo, non presenta alcuna differenza tra queste due tecnologie. Ciò conferma quanto sia potente ed efficace il modello seguito per la rappresentazione delle macchine componenti una centrale di produzione di energia. Infatti, come nel caso di motori a combustione interna, un gruppo turbogas consuma l'energia chimica presente in un combustibile ed è in grado di produrre energia elettrica, energia termica ed energia per raffreddamento. Di conseguenza le equazioni rappresentative in questo caso sono le 6.2, 6.3, 6.4 e 6.5 viste nel paragrafo precedente. Chiaramente anche lo schema è identico a quello di figura 66.

6.1.4 Caldaie e generatori di vapore

Il modello è sempre lo stesso, solamente che in questo caso non vi è produzione di energia elettrica né di freddo ($\eta_{el} = \eta_f = 0$).



Figura 67 Rappresentazione schematica di caldaia e/o generatore di vapore

In caso di tali macchine è possibile avere:

- produzione di sola acqua calda
- produzione di solo vapore
- produzione combinata di acqua calda e vapore

Nella fattispecie di ciascun caso verranno definiti in maniera opportuna i rendimenti di trasformazione dell'energia del combustibile. Le equazioni rappresentative di questi sottosistemi sono la 6.4 e la 6.5.

6.1.5 Macchine frigorifere

La metodologia prevede due tipologie di macchine frigorifere che per le modalità di conversione dell'energia necessitano un modello diverso l'un dall'altro:

- macchine frigorifere elettriche o meccaniche
- macchine frigorifere ad assorbimento

Macchine frigorifere elettriche o meccaniche

A differenza delle macchine fin qui descritte, esse possono produrre solamente un output, i. e. energia termica di raffreddamento. Di conseguenza, in linea con il principio di semplicità ed efficacia di modellazione, è stato scelto di utilizzare lo stesso modello delle macchine di cogenerazione, tenendo in considerazione che l'input in questo caso è rappresentato non più da combustibile (la sua energia chimica), bensì da energia elettrica e ponendo a zero i rendimenti per la produzione di acqua calda e vapore. Tenendo conto di queste modifiche, il modello rappresentativo per le macchine a cogenerazione in questo caso specifico diviene quello di figura 68.

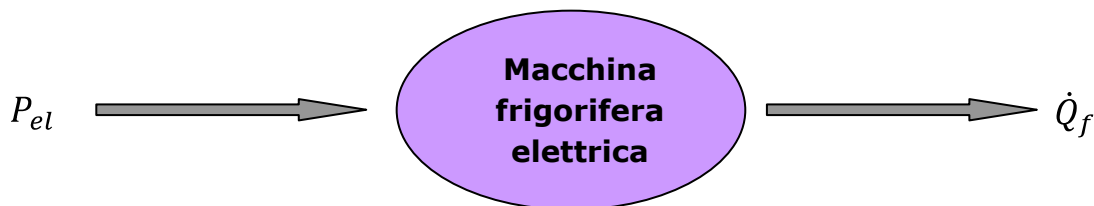


Figura 68 Rappresentazione schematica di macchine frigorifera elettrica

Macchine frigorifere ad assorbimento

Di relativamente recente sviluppo, questa tipologia di macchine utilizza un principio totalmente diverso dalle tradizionali macchine frigorifere per produrre il freddo. Sebbene, infatti, necessitino di un piccolo consumo di energia elettrica (principalmente per gli organi ausiliari), la fonte di energia principale per raffreddare il liquido frigorifero è rappresentato dal calore.

Teoricamente sarebbe possibile ottenere questo "recupero" di calore da qualsiasi tipo di macchina, ma nella realtà ciò è tutt'altro che di facile realizzazione. Sono stati pertanto previsti dei coefficienti di utilizzazione per le macchine che producono calore (anche se di scarto come per motori a combustione interna e impianti turbogas), per rendere il modello ancora più versatile ed adattabile a qualsivoglia sistema energetico.

Una volta determinato il calore in eccesso \dot{Q}^+ prodotto dalla centrale energetica e reso disponibile alle macchine frigorifere ad assorbimento, è possibile definire la potenza termica prodotta come:

$$\dot{Q}_{ass} = \dot{Q}^+ \cdot \eta_{ass} \quad (6.6)$$

Indicando con \dot{Q}_{ass} la potenza termica prodotta dalle macchine frigorifere ad assorbimento di calore.

6.1.6 Pannelli fotovoltaici

Per i pannelli fotovoltaici il "combustibile" è rappresentato dall'energia solare e l'equazione che regola la trasformazione della stessa in energia elettrica nel modello è:

$$K = A \cdot E_s \cdot \eta_{el} \quad (6.7)$$

Indicando con:

- K la potenza elettrica prodotta dai pannelli fotovoltaici
- A la superficie totale occupata dalle superfici
- E_s l'intensità della radiazione solare potenza (teoricamente producibile dal pannello per unità di superficie)
- η_{el} efficienza globale del pannello

La formula appena descritta è piuttosto semplice, ma la determinazione dei termini che vi compaiono è tutt'altro che facile. Basti pensare, infatti, che il rendimento η_{el} dipende strettamente dai seguenti fattori:

- proprietà del materiale
- configurazione della cella
- caratteristiche della giunzione
- distribuzione spettrale delle radiazioni
- area utile della superficie esposta della cella
- rivestimento antiriflesso
- struttura superficiale della cella
- fattori dell'ambiente circostante
- perdite dovute alla resistenza interna della cella
- auto-oscuramento
- degradazione delle prestazioni della cella
- carico non ottimizzato

È pertanto impensabile poter definire con precisione il valore dell'efficienza del pannello. Come se ciò non bastasse, anche l'intensità della radiazione solare E_s è una variabile imprevedibile, dipendendo dalle condizioni atmosferiche contingenti. Ma poiché la letteratura è ricca di tali studi, si è potuto ovviare a questi problemi seguendo le indicazioni contenute in essa. Nel modello si è quindi assunto di

- considerare un rendimento medio (fornito dal produttore) dei pannelli fotovoltaici
- reperire i dati di intensità della radiazione incidente dalle numerose tabelle di dati presenti in letteratura

6.1.7 Collettori solari termici

L'energia solare rappresenta, come per i pannelli fotovoltaici, il "combustibile" per i collettori, però in questo caso non c'è trasformazione di energia da un tipo ad un altro, bensì trasferimento di calore all'acqua. L'equazione utilizzata nel modello è formalmente la stessa della precedente :

$$K = A \cdot E_s \cdot \eta_{coll} \quad (6.8)$$

Per la variabile E_s valgono le stesse considerazioni fatte nel paragrafo precedente. Lo stesso discorso non vale invece per il rendimento del collettore η_{coll} . Il rendimento di un collettore, infatti, dipende da:

- caratteristiche fisiche del collettore
- temperatura di esercizio (temperatura del fluido termovettore)
- fattori meteorologici (temperatura ambientale ed energia solare incidente)

Tale dipendenza è rappresentata nel modello con una retta interpolata dopo aver definito due punti di funzionamento notevoli che sono i punti di intersezione di tale retta con gli assi coordinati del grafico da essa creato (con efficienza e carico come parametro).

6.2 Equazioni di bilancio

Il modello, a partire dalle equazioni delle potenze delle varie macchine, si propone di soddisfare i bilanci energetici del sistema, assicurando che tutti i fabbisogni energetici siano soddisfatti per ciascun intervallo temporale.

Tale condizione, come vedremo più avanti, è un'equazione di vincolo nel sistema di ottimizzazione scelto. È utile, a questo scopo, calcolare il bilancio per ogni vettore energetico come la sommatoria di tutte le potenze in gioco dove le utenze, rappresentando un consumatore anziché un produttore, sono rappresentate da una potenza negativa.

6.2.1 Bilancio elettrico

Partecipano al bilancio energetico di questo tipo tutte le entità che producono o consumano energia elettrica, quindi i motori a cogenerazione, i pannelli fotovoltaici, le utenze e le macchine frigorifere elettriche (che in termini di energia elettrica sono assimilabili a delle utenze):

$$Bil_{El} = \sum P_{max_i} \cdot CC_i \cdot \eta_{el_i} + K - EE \quad (6.9)$$

Con il termine CC_i si intende il coefficiente di carico di ciascuna macchina, cioè il valore percentuale rispetto alla potenza massima erogabile da essa, P_{max_i} . A titolo esemplificativo, se una macchina funziona al 50%, il valore di CC_i è pari a 0,5.

6.2.2 Bilanci termici

I bilanci termici si calcolano analogamente al bilancio elettrico ma il loro rispetto rappresenta un vincolo più stringente. Infatti, mentre è possibile acquistare o vendere energia elettrica dall'esterno, l'energia termica, al contrario, deve essere interamente autoprodotta (in Italia la distribuzione di calore è praticamente assente). Si riportano di seguito i bilanci termici di acqua calda e di vapore:

$$Bil_{T_{ac}} = \sum P_{max_i} \cdot CC_i \cdot \eta_{ac_i} + K_{ac} - AC \quad (6.10)$$

$$Bil_{T_v} = \sum P_{max_i} \cdot CC_i \cdot \eta_{v_i} + V \quad (6.11)$$

Per quanto riguarda il bilancio del freddo otteniamo la seguente relazione:

$$Bil_{T_f} = \sum P_{max_i} \cdot CC_i \cdot \eta_{f_i} - F + \sum \dot{Q}_{ass_j} \quad (6.12)$$

Le macchine ad assorbimento vengono trattate in modo separato, ma nel presente caso è necessario inserirle in una seconda sommatoria.

Il calcolo del calore prodotto dalle macchine frigorifere ad assorbimento non è banale in quanto, prima di eseguire tale operazione, dobbiamo sapere la quota parte di calore prodotto in eccesso e quindi riutilizzabile con la configurazione corrente.

A tale scopo introduciamo dei coefficienti per ciascuna macchina (ad esclusione delle macchine ad assorbimento): per la macchina i -esima definiamo un coefficiente che indica la possibilità per quella macchina di cedere il calore in eccesso in un determinato vettore energetico alle macchine ad assorbimento. Per quanto riguarda il vapore per esempio, si introduce il coefficiente C_{v_i} . Tale coefficiente sarà uguale a uno se la macchina i sarà in grado di cedere energia sotto forma di vapore alle macchine ad assorbimento, zero nel caso contrario.

Stesso discorso per l'acqua calda, introducendo il coefficiente C_{ac_i} .

Introduciamo altri due coefficienti, stavolta riferiti alle macchine frigorifere ad assorbimento, con la stessa funzione di quelli precedenti ma stavolta riferiti alla possibilità per le macchine ad assorbimento di assorbire calore da un vettore energetico piuttosto che un altro. Per quanto riguarda il vapore, se le macchine frigorifere ad assorbimento sono in grado di assorbire tale vettore energetico per produrre freddo, allora si pone $C_{v_{ass}} = 1$, in caso contrario $C_{v_{ass}} = 0$.

Lo stesso ragionamento vale per il coefficiente dell'acqua calda $C_{ac_{ass}}$.

E' quindi possibile, in sintesi, creare per ogni macchina un coefficiente $C_{x_i}^+$ tale che:

$$C_{v_i}^+ = C_{v_i} \cdot C_{v_{ass}} \quad (6.13)$$

$$C_{ac_i}^+ = C_{ac_i} \cdot C_{ac_{ass}} \quad (6.14)$$

Possiamo così finalmente definire il calore in eccesso utilizzabile dalle macchine per ogni vettore energetico:

$$Bil_{T_{ac}}^* = \sum P_{max_i} \cdot CC_i \cdot C_{ac_i}^+ \cdot \eta_{ac_i} + K_{ac} - AC \quad (6.15)$$

$$Bil_{T_v}^* = \sum P_{max_i} \cdot CC_i \cdot C_{v_i}^+ \cdot \eta_{v_i} - V \quad (6.16)$$

A questo punto siamo in grado di stabilire il calore in eccesso complessivamente utilizzabile dalle macchine frigorifere ad assorbimento:

$$\dot{Q}^* = BilT_{ac}^* + BilT_v^* \quad (6.17)$$

Questa equazione è valida solo se i bilanci termici di acqua calda e vapore sono positivi: in caso contrario il calore in eccesso sarebbe negativo, cioè si sottrarrebbe calore alle macchine frigorifere ad assorbimento, che non è possibile.

6.2.3 Analisi dei costi e dei consumi

Le grandezze descritte finora non danno la possibilità al gestore e/o al progettista di confrontare, dal punto di vista energetico/economico, diverse soluzioni d'impianti energetici. Proprio a questo scopo nel modello sono presenti variabili riferite ai costi e ai consumi delle fonti energetiche. In particolare è necessario introdurre delle voci di costo delle fonti energetiche primarie (combustibili ed energia elettrica) che rappresentano un parametro fondamentale per l'ottimizzazione del funzionamento del sistema stesso.

Il costo totale della gestione energetica dell'azienda è dato dalla formula

$$PT = PE - CC \quad (6.18)$$

Indicando con *PE* il profitto (che può essere positivo o negativo) che si può ottenere vendendo l'energia elettrica in eccesso (o comprando l'energia elettrica in difetto) al gestore e *CC* il costo dei combustibili, tenendo conto che esso consta di due contributi distinti.

6.3 Realizzazione del codice di calcolo

Il motore principale del codice di calcolo (software) sviluppato è stato realizzato in ambiente Matlab, mentre l'inserimento dati di input per la caratterizzazione delle macchine e dei fabbisogni energetici, così come l'esportazione e la visualizzazione dei dati di output della simulazione sono fruibili in Excel. Questa scelta è dovuta ad una maggiore semplicità utilizzo e modifica dei dati.

Il codice è stato pensato e sviluppato in maniera modulare, in modo tale da renderne l'utilizzo il più semplice possibile e versatile per qualsivoglia esigenza di simulazione e rappresentazione. Molto semplicemente è possibile descrivere l'architettura di alto livello del software con lo schema a blocchi presente in figura 69.

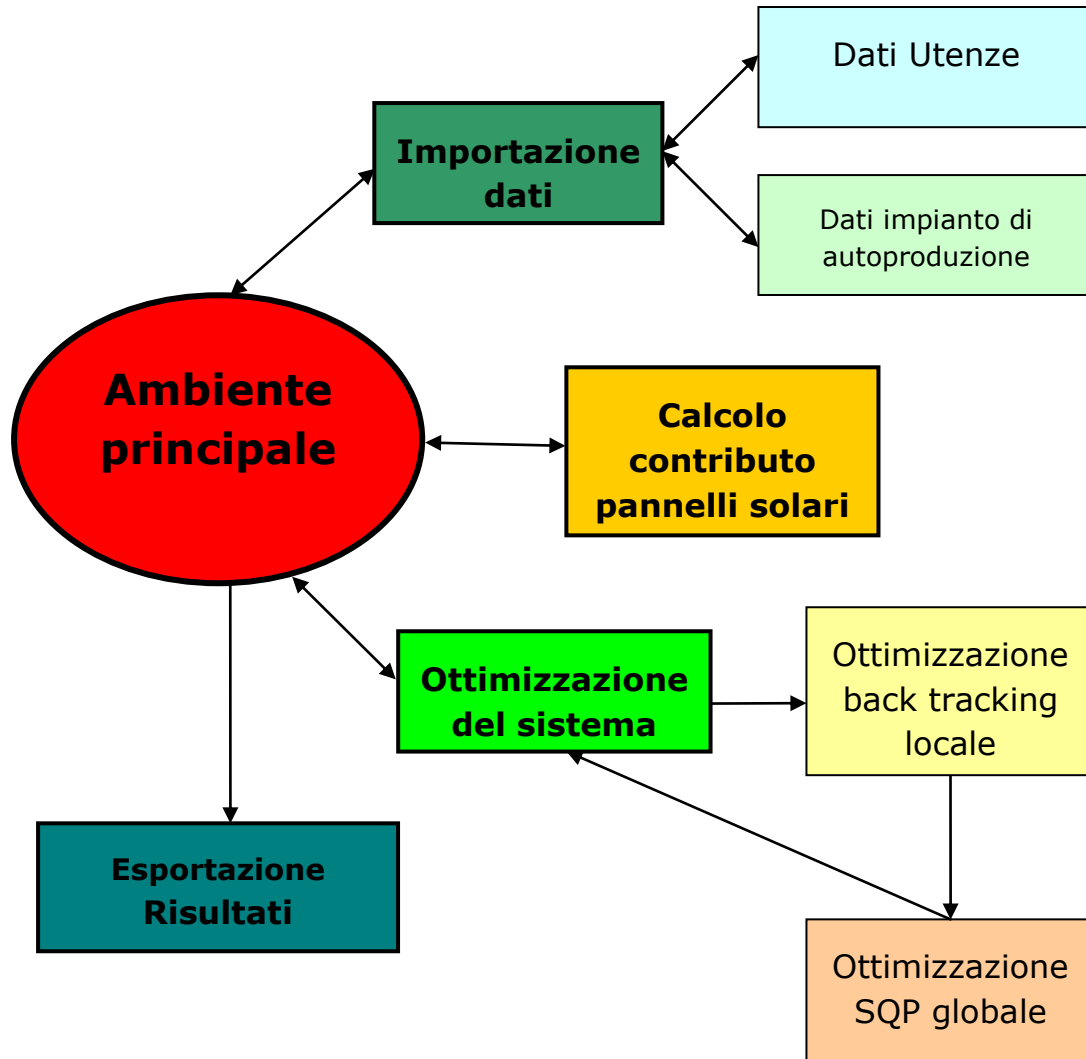


Figura 69 Schema a blocchi del codice di calcolo

I passi che in maniera sequenziale sono svolti dal codice di calcolo e dall'utente sono:

- Inserimento e lettura dei dati dei fabbisogni energetici
- Definizione delle caratteristiche delle componenti dell'impianto
- Descrizione dei flussi energetici tra i sottosistemi
- Definizione dei coefficienti di carico secondo il principio di ottimizzazione di gestione desiderato
- Simulazione del motore del codice di calcolo
- Esportazione dei risultati della simulazione su fogli Excel

Attualmente sono previsti tre criteri di ottimizzazione secondo cui è possibile definire le operazioni, i.e. coefficienti di carico, delle macchine dell'impianto. Tali criteri sono:

- Massimizzazione del profitto
- Minimizzazione della spesa
- Minimizzazione delle emissioni inquinanti

Le simulazione degli scenari avvengono su base temporale definita dall'utente nel momento che inserisce i dati dei fabbisogni energetici. L'intervallo temporale massimo in cui l'utente può scegliere di suddividere il periodo di simulazione è di 24 ore. Ma si possono eseguire simulazioni suddividendo ulteriormente il giorno in più parti, facendo ovviamente cura alle considerazioni fatte sulla rilevanza della scelta dell'intervallo di simulazione fatte nel paragrafo 6.1.

Quindi, prima di passare alla descrizione nel prossimo capitolo dell'algoritmo di ottimizzazione utilizzato, riassumiamo in breve ciò che è possibile fare con questo codice di calcolo:

- ottimizzazione del controllo degli apparati presenti nella centrale energetica di una struttura esistente
- simulazione di diversi scenari per determinare la configurazione più idonea degli apparati in vista di un ammodernamento della centrale
- progettazione della centrale energetica di nuove strutture
- confronto di diversi criteri di ottimizzazione

Capitolo 7

Da un punto di vista matematico con il termine ottimizzazione si indica il processo di ricerca del minimo di una funzione:

$$\min f(x) \quad (7.1)$$

Nella maggior parte dei casi minimizzare comporta la necessità di rispettare dei vincoli ben precisi. Di conseguenza il problema che si cerca di risolvere cambia formulazione e dalla 7.1 può essere scritto come segue:

$$\begin{cases} \min f(x) \\ g_i(x) \geq 0 \quad i = 1, \dots, n \\ h_j(x) = 0 \quad j = 1, \dots, m \end{cases} \quad (7.2)$$

In questo caso si parla di ottimizzazione vincolata in quanto il punto ricercato non deve solamente soddisfare la condizione di minimo della funzione $f(x)$, ma anche rispettare le condizioni di uguaglianza h_j e di disuguaglianza $g_i(x)$.

La funzione $f(x)$ viene indicata come funzione obiettivo mentre le altre prendono il nome di vincoli.

7.1 Ricerca operativa ed algoritmi di ottimizzazione

Risolvere un problema di minimizzazione vincolata come quello appena descritto significa trovare il punto (o i punti) tra quelli ammissibili (che cioè rispettano i vincoli) che renda minimo il valore della funzione obiettivo, cioè il fine secondo cui vogliamo si effettui la scelta.

Questo genere di problemi possono essere considerati una sottobranca di una disciplina relativamente recente che va sotto il nome di "Ricerca Operativa" meglio conosciuta come RO.

La RO fornisce strumenti matematici di supporto alle attività decisionali in cui occorre gestire e coordinare attività e risorse limitate al fine di massimizzare o minimizzare una funzione obiettivo.

La RO si occupa di formalizzare un problema in un modello matematico e calcolare una soluzione ottima, quando possibile, o approssimata (detta anche subottima) per esso.

Essa costituisce un approccio scientifico alla risoluzione di problemi complessi, si può ricondurre all'ambito della matematica applicata ma presenta forti caratteristiche interdisciplinari relative in prevalenza a matematica, informatica, economia e finanza, ingegneria ed altre. Inoltre la RO ha molte applicazioni commerciali soprattutto negli ambiti economico, infrastrutturale, logistico, militare, della progettazione di servizi e di sistemi di

trasporto e nelle tecnologie. Nel caso particolare di problemi di carattere economico, la funzione da massimizzare può coincidere con il massimo profitto ottenibile o con il minor costo da sostenere.

Essa riveste un ruolo importante nelle attività decisionali perché permette di operare le scelte migliori per raggiungere un determinato obiettivo rispettando vincoli che sono imposti dall'esterno e non sono sotto il controllo di chi deve compiere le decisioni.

Casi notevoli di ottimizzazione vincolata sono la programmazione lineare (Linear Programming, *LP*) e la programmazione quadratica (Quadratic Programming, *QP*)

Nel primo caso la funzione obiettivo e i vincoli sono lineari ed esprimibili come segue:

$$\begin{aligned} f(x) &= \vec{c}^T \vec{x} = \sum_i c_i x_i \\ \sum_i a_i x_i + b &\geq 0 \\ \sum_j d_j x_j + e &= 0 \end{aligned} \quad (7.3)$$

Nel secondo caso, la funzione obiettivo è espressa da una forma quadratica, mentre i vincoli rimangono lineari come nella formula 7.3:

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{1}{2} \vec{x}^T H \vec{x} + r^T x \\ \sum_i a_i x_i + b &\geq 0 \\ \sum_j d_j x_j + e &= 0 \end{aligned} \quad (7.4)$$

A onor del vero esistono vari altri tipi di algoritmi di ottimizzazione, alcuni basati su teorie con basi matematiche come la discesa del gradiente o il metodo dei moltiplicatori di Lagrange, alcuni su metodi statistici o casuali, altri su metodi euristici di analisi dei dati e ricerca dell'ottimizzazione basati sulla teoria della selezione naturale di Darwin (i famosi algoritmi genetici).

Di seguito verranno illustrati i due algoritmi usati nel modello, cioè l'ottimizzazione di tipo "backtracking" e l'ottimizzazione "SQP".

7.1.1 Metodo Backtracking

L'algoritmo di ottimizzazione di tipo "backtracking" (in italiano, ritorno all'indietro) è una tecnica per trovare soluzioni a problemi in cui devono essere soddisfatti dei vincoli. Con questa tecnica si considerano successivamente tutte le possibili soluzioni, scartando man mano le condizioni che non soddisfano i vincoli, come illustrato intuitivamente in figura 70. Quindi invece di escludere soluzioni a priori, viene calcolato il parametro da ottimizzare in tutte le configurazioni possibili e si sceglie la configurazione che massimizzi (o minimizzi) tale parametro.

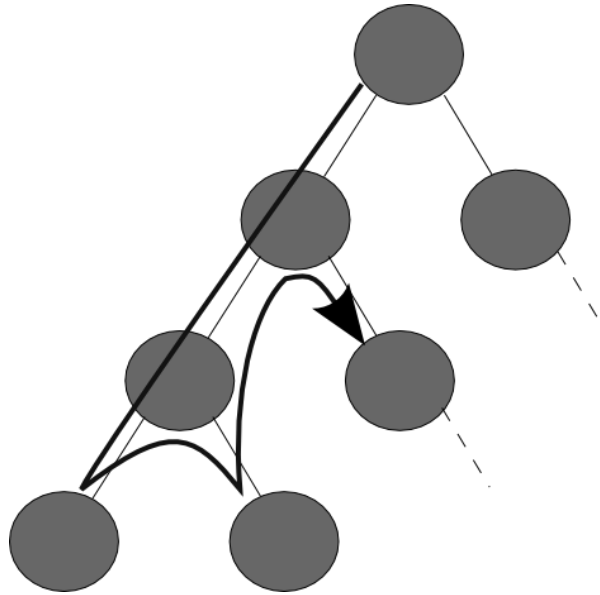


Figura 70 Illustrazione schematica dell'algoritmo backtracking

In linea di principio tale metodo è il più esatto, in quanto non prevede ipotesi restrittive. Teoricamente sarebbero confrontabili tutte le soluzioni possibili, tuttavia dal punto di vista computazionale bisogna tener conto del fatto che, nel nostro caso in studio, le possibili configurazioni di una macchina sono infinite (tutti i possibili numeri reali da 0 a 1 che rappresentano il coefficiente di carico). Per di più la presenza contemporanea di n macchine, come è da aspettarsi in un caso pratico, complica ulteriormente il sistema, in quanto le possibili combinazioni diventano ∞^n .

Diventa quindi necessario discretizzare la variabile coefficiente di carico CC , vista nel capitolo 6, per arrivare ad esplorare un numero finito di configurazioni. Si presentano allora due esigenze contrapposte:

- Raggiungimento di accettabili livelli di precisione nella valutazione del sistema in studio
- Velocizzazione dei tempi di calcolo

Per soddisfare la prima esigenza dovremmo aumentare il numero di discretizzazioni dei coefficienti di carico, viceversa per soddisfare la seconda.

Si ricorda che anche nel caso semplificato, cioè con un numero di intervalli discreti, le possibili configurazioni da confrontare dopo una scelta di m valori di discretizzazione per un sistema composto da n macchine, è m^n . I tempi di calcolo quindi crescono esponenzialmente con il numero di discretizzazioni scelte. Per mantenersi su tempi di calcolo accettabili occorre inevitabilmente mantenere limitato il numero dei valori di discretizzazione, giungendo a risultati a volte soddisfacenti ma non estremamente precisi.

7.1.2 Metodo Sequential Quadratic Programming (SQP)

Proponiamoci adesso di risolvere il problema di ottimizzazione non lineare nel caso generale, ossia senza alcuna ipotesi sulla natura dei vincoli e della funzione obiettivo, vogliamo cioè risolvere il sistema espresso dalla formula 7.4.

A tal fine utilizziamo lo sviluppo in serie di Taylor troncato al secondo ordine per la funzione obiettivo e al primo ordine per i vincoli. Si ottengono le seguenti approssimazioni:

$$\begin{aligned}
f(\vec{x}_{k+1}) &= f(\vec{x}_k) + \nabla f(\vec{x}_k)(\vec{x}_{k+1} - \vec{x}_k) + \frac{1}{2}(\vec{x}_{k+1} - \vec{x}_k)^T H(\vec{x}_{k+1} - \vec{x}_k) \\
g_i(\vec{x}_{k+1}) &= g_i(\vec{x}_k) + \nabla g_i(\vec{x}_k)(\vec{x}_{k+1} - \vec{x}_k) \\
h_j(\vec{x}_{k+1}) &= h_j(\vec{x}_k) + \nabla h_j(\vec{x}_k)(\vec{x}_{k+1} - \vec{x}_k)
\end{aligned}
\tag{7.5}$$

Indicando con:

- \vec{x}_k il punto di partenza al passo k attorno al quale si effettua lo sviluppo
- \vec{x}_{k+1} il punto di arrivo dopo l'ottimizzazione al passo k, che costituirà poi il punto di partenza al passo k+1
- ∇ operatore gradiente
- H la matrice hessiana (matrice quadrata $n \times n$ delle derivate parziali seconde della funzione f in n variabili) calcolata nel punto \vec{x}_k .

Osserviamo che se si utilizzano le approssimazioni trovate, il problema originario si trasforma in un problema di QP (Quadratic Programming).

Si procede allora nel seguente modo:

1. si sceglie \vec{x}_1 e si pone $\vec{x}_k = \vec{x}_1$
2. si risolve il problema QP trovando come soluzione \vec{x}_{k+1}
3. si pone $\vec{x}_k = \vec{x}_{k+1}$
4. se \vec{x}_k non soddisfa il criterio di arresto, si torna al passo 2 e si ripete il processo in maniera sequenziale

Questo algoritmo prende il nome di Sequential Quadratic Programming (SQP) perché prevede la soluzione iterativa di problemi di QP.

L'inconveniente più evidente del metodo SQP consiste nel fatto che i punti \vec{x}_k (e quindi la soluzione) non soddisfano i vincoli veri ma soltanto quelli approssimati al primo ordine. In tal caso lo scostamento dopo molte iterazioni successive può diventare non trascurabile. E' allora consigliabile ricalcolare ad ogni iterazione il sistema dei vincoli, per partire da un valore esatto nel punto \vec{x}_k .

Il metodo si arresta imponendo un valore di soglia al di sotto del quale si accetta il punto \vec{x}_k come soluzione del sistema. In effetti, se la differenza tra il punto di arrivo dell'iterazione $k + 1$ e il punto di partenza k è abbastanza piccola, tale approssimazione diventa accettabile. Deve cioè essere rispettata la seguente condizione:

$$|x_{k+1} - x_k| = |\Delta x| \leq \varepsilon \tag{7.6}$$

con ε costante definita dall'utente.

È bene osservare che valori di ε piccoli comporteranno grande precisione nella risoluzione del sistema, d'altra parte dal momento che ogni passo del metodo iterativo sarà piccolo, servirà un numero grande di iterazioni. Visto che si può stimare in prima approssimazione il tempo di calcolo come direttamente proporzionale al numero di iterazioni è necessario tener conto di questo quando si definisce il valore soglia di arresto.

Per ultimo è altresì utile ricordare che il sistema è facilmente risolvibile da un punto di vista matematico solo se il punto di partenza x_k soddisfa i vincoli. E' necessario quindi scegliere dei valori di ε sufficientemente piccoli per assicurarci di rimanere sempre nello spazio vettoriale dei

punti ammissibili e allo stesso tempo sufficientemente grandi per non avere dei tempi di calcolo troppo lunghi.

7.2 Formulazione del codice di calcolo

Il problema che in questa sede ci siamo proposti di risolvere è del tipo rappresentato dall'equazione 7.4. Come già detto, si tratta di un sistema quadratico, e come tale non può essere risolto con metodi lineari di risoluzione. Matlab possiede una funzione proprietaria, *quadprog*, che consente l'individuazione del minimo/massimo di tali sistemi. La funzione in questione realizza il suo obiettivo a partire dal gradiente della funzione e dalla sua hessiana. Ovviamente è possibile specificare le equazioni di vincolo che limitano lo spazio di ricerca delle soluzioni.

Secondo quanto visto nel paragrafo precedente, il nostro obiettivo è quello di sviluppare un sistema iterativo, in grado di avvicinarsi, sequenzialmente, sempre più alla soluzione esatta, fino ad un valore di soglia che noi riteniamo accettabile. Nello specifico ci siamo dovuti occupare della definizione di:

- funzione obiettivo
- vincoli di bilancio
- vincoli temporali

7.2.1 Funzione obiettivo

Questo rappresenta il passaggio più importante per un problema di ricerca operativa. Infatti una formulazione adeguata della funzione obiettivo, determina la possibilità o meno di trovare una soluzione al problema stesso (questo vale in particolare per sistemi non lineari).

La funzione scelta nella nostra trattazione il profitto totale. Stabilito quali sono i contributi di che entrano a far parte della funzione, ci basta calcolare il gradiente e l'hessiana. Ma andiamo con ordine.

Si può immaginare il profitto totale PT come la somma di due contributi: il profitto elettrico PE e i costi per i combustibili $E_{C_{TOT}}$:

$$PT = PE - E_{C_{TOT}} \quad (7.7)$$

Sia il costo del combustibile per ogni macchina rappresentato dalla variabile β_i :

$$\beta_i = E_{C_i} \frac{P_{max_i}}{H_{i_i}} \quad (7.8)$$

Indicando con

- E_{C_i} il costo per unità di massa del combustibile per la macchina i
- E_{C_i} la potenza chimica a disposizione grazie all'apporto del combustibile
- H_{i_i} potere calorifico inferiore del combustibile della macchina i

Definito il costo per il combustibile di ogni singola macchina, si può calcolare il costo totale dovuto al combustibile semplicemente sommando i singoli contributi:

$$E_{C_{TOT}} = \sum_i \beta_i C C_i \quad (7.9)$$

Tuttavia la sua definizione merita qualche specificazione in più, dato che il prezzo unitario corrisposto dal gestore della rete dell'energia elettrica cambia relativamente alla fonte primaria dalla quale l'energia è prodotta. Per essere più chiari: per incentivare l'autoproduzione di energia "pulita" la legislazione prevede dei contributi aggiuntivi per chi decide di investire in energia pulita e produrre energia rinnovabile (inserire bibliografia). Quindi, il prezzo di un kWh di energia elettrica prodotta da pannelli fotovoltaici è maggiore di quello prodotto da un impianto di cogenerazione, che a sua volta è superiore a quello prodotto con metodi convenzionali. Con ciò voglio dire che il parametro E che compare nella formula 7.10, va interpretato come variabile in relazione allo specifico valore che di volta in volta assume il bilancio elettrico (Bil_{el})

Definita la funzione obiettivo non resta che calcolare le derivate del primo e secondo ordine del profitto rispetto ai coefficienti di carico (parametro da ottimizzare):

$$\frac{dPT}{dCC_i} = E \cdot P_{MAX_i} \cdot \left(\eta_{el_i} + CC_i \frac{d\eta_{el_i}}{dCC_i} \right) \quad (7.11)$$

$$\frac{d^2PT}{dCC_j^2} = E \cdot P_{MAX_j} \cdot \left(2 \cdot \frac{d\eta_{el_i}}{dCC_i} + CC_i \frac{d^2\eta_{el_i}}{dCC_i^2} \right) \quad (7.12)$$

$$\frac{d}{dCC_k} \left(\frac{dPT}{dCC_j} \right) = 0 \quad (7.13)$$

In virtù della 7.13 la matrice hessiana della funzione profitto è dunque una matrice diagonale, fatto che semplifica notevolmente il costo computazionale del calcolo.

7.2.2 Vincoli di bilancio

Un tipico esempio di sistema da modellare e simulare presenta, come già accennato in precedenza, dei vincoli che limitano lo spazio di ricerca delle soluzioni di minimo/massimo. Nel nostro caso specifico i vincoli ci limitano nella scelta delle possibili combinazioni dei coefficienti di carico delle singole macchine (CC), consentendoci di scegliere solo in un sottoinsieme di tutte le possibili combinazioni, quelle ammissibili. In particolare, avremo:

I vincoli da imporre al sistema sono:

- $BilT_{ac} \geq 0$ (7.14)
- $BilT_v \geq 0$ (7.15)
- $BilT_f \geq 0$ (7.16)

Come già detto sopra, il rispetto del bilancio elettrico (autoprodurre tutte l'energia elettrica di cui si ha bisogno) non è necessario, poiché, a meno di eccezionali condizioni di esercizio (per motivi di isolamento o sicurezza), tutte le aziende o edifici sono dotati di allacciamento alla rete di distribuzione dell'energia elettrica.

Esplicitando le equazioni 7.14, 7.15, 7.16 si ottiene:

- **Bilancio dell'acqua calda**

$$\sum P_{max_i} \cdot CC_i \cdot \eta_{ac_i} + K_{ac} - AC \geq 0 \quad (7.17)$$

- **Bilancio del vapore**

$$\sum P_{max_i} \cdot CC_i \cdot \eta_{ac_i} + K_v - V \geq 0 \quad (7.18)$$

- **Bilancio del freddo**

$$\sum_i P_{max_i} \left[\eta_{f_i} + \eta_{f_{ass_i}} (C^+_{ac_i} \eta_{ac_i} + C^+_{v_i} \eta_{v_i}) \right] \cdot CC_i + \eta_{f_{ass_i}} \left(C_{ac_{ass}} K_{ac} - C_{ac_{ass}} UAC - C_{v_{ass}} UV - \sum_j \dot{Q}_{max_j} \right) + \dot{Q}_{f_{ass_j}} - F \geq 0 \quad (7.19)$$

Le prime due equazioni sono di facile comprensione, non altrettanto la relazione sul bilancio del freddo. Si riporta pertanto di seguito il procedimento seguito per arrivare all'equazione 7.19.

In generale al bilancio del freddo partecipano macchine frigorifere elettriche, eventuali macchine a trigenerazione (che producano quindi anche freddo), e macchine frigorifere ad assorbimento di calore. L'equazione del bilancio freddo quindi è la seguente (le macchine a cogenerazione sono assimilate con le macchine frigorifere elettriche):

$$BilT_f = \dot{Q}_{fe} + \dot{Q}_{f_{ass}} - F \geq 0 \quad (7.20)$$

Indicando con

- \dot{Q}_{fe} la potenza termica fredda prodotta da macchine frigorifere elettriche e a cogenerazione
- \dot{Q}_{fass} potenza termica fredda prodotta dalle macchine frigorifere ad assorbimento di calore

Si tratta di trovare un'equazione che riesca a rappresentare la potenza termica generata dalle macchine frigorifere ad assorbimento. Per far ciò è necessario conoscere il calore in eccesso \dot{Q}^+ (cioè prodotto dalle macchine ma non sfruttato dalle utenze):

$$\dot{Q}^+ = BilT_{ac} + BilT_v \quad (7.21)$$

Questa equazione è valida se

$$\begin{cases} BilT_{ac} \geq 0 \\ BilT_v \geq 0 \end{cases} \quad (7.22)$$

E' possibile ora, utilizzando i coefficienti delle formule 6.14 e 6.15, definire la potenza termica prodotta dalle macchine frigorifere ad assorbimento come:

$$\dot{Q}_{fass} = \dot{Q}^+ \eta_{fass} = (C_{ac_{ass}} BilT_{ac} + C_{v_{ass}} BilT_v) \eta_{fass} \quad (7.23)$$

Proseguendo nella sostituzione delle espressioni dei bilanci di acqua calda e vapore nell'equazione 7.23 e ponendo $C_{ac_i}^+ = C_{ac_i} C_{ac_{ass}}$, si trova infine:

$$\dot{Q}_{fass} = \left[\sum_i P_{max_i} (C_{ac_i}^+ \cdot \eta_{ac_i} + C_{v_i}^+ \cdot \eta_{v_i}) CC_i - C_{ac_{ass}} AC - C_{v_{ass}} V + C_{ac_{ass}} K_{ac} \right] \eta_{fass} \quad (7.24)$$

La formula 7.24 rappresenta la potenza termica prodotta dalle macchine frigorifere ad assorbimento nel caso della presenza di una sola macchina di tale genere. La teoria è facilmente estendibile al caso di più macchine ad assorbimento introducendo solo un paio di variabili in più e aggiungendo una nuova ipotesi.

Si ipotizza che una sola macchina frigorifera ad assorbimento funzioni in regime di parzializzazione, tutte le altre le assumiamo a pieno carico oppure spente.

L'ipotesi appena citata può essere scritta matematicamente come:

$$\dot{Q}^+ = \dot{Q}_{max_f} + \dot{Q}^* \quad (7.25)$$

Indicando con

- \dot{Q}^+ il calore in eccesso prodotto da caldaie e macchine a cogenerazione
- \dot{Q}_{max_f} il calore in eccesso assorbito dalle n macchine funzionanti a pieno carico
- \dot{Q}^* il calore in eccesso convertibile dalla macchina $n+1$ in regime di parzializzazione

Manipolando la 7.25 si trova:

$$\dot{Q}^* = \dot{Q}^+ - \sum_i \dot{Q}_{max_i} = (BilT_{ac} + BilT_v) - \sum_i \dot{Q}_{max_i} \quad (7.26)$$

Sapendo inoltre che:

$$\dot{Q}_{fass_j} = \dot{Q}^* \eta_{fass} \quad (7.27)$$

$$\dot{Q}_{fass_{tot}} = \sum_i \dot{Q}_{max_i} \eta_{fass_i} \quad (7.28)$$

$$\dot{Q}_{fe} = \sum_i P_{max_i} \eta_{f_i} CC_i \quad (7.29)$$

Si trova infine:

$$\dot{Q}_{fass} = \eta_{fass_j} \left[\sum_i P_{max_i} (C_{ac_i}^+ \eta_{ac_i} + C_{v_i}^+ \eta_{v_i}) CC_i \right] (C_{ac_{ass}} K_{ac} - C_{ac_{ass}} AC - C_{v_{ass}} V - \dot{Q}_{max}) \quad (7.28)$$

Indicando con

- η_{fass_j} il rendimento della macchina j -esima in regolazione (le altre si assumono o a pieno carico o spente)
- $\dot{Q}_{fass_{tot}}$ il calore prodotto dalle macchine a pieno carico
- \dot{Q}_{max} il calore assorbito dalle macchine frigorifere ad assorbimento a pieno carico

Si giunge infine tramite le relazioni appena trovate alla formula 7.19 per il bilancio della potenza termica fredda già scritto in precedenza.

7.2.3 Cambio di coordinate

Note le equazioni di vincolo occorre tener presente che nell'ottimizzazione sequenziale, le equazioni si esprimono in funzione dei gradienti dei coefficienti di carico (ΔCC) e non dei coefficienti di carico stessi (CC), ragion per cui è necessario un cambio di variabili.

E' possibile definire il coefficiente di carico al passo $k+1$ a partire da quello del passo k nel seguente modo:

$$CC_{k+1} = CC_k + \Delta CC \quad (7.29)$$

Indicando con

- CC_{k+1} il coefficiente di carico al passo $k+1$
- CC_k il coefficiente di carico al passo k
- ΔCC il gradiente del coefficiente di carico al passo k

Risolvendo la 7.29 rispetto al gradiente del coefficiente di carico si ottiene:

$$\Delta CC = CC_{k+1} - CC_k \quad (7.30)$$

Dopo il cambio di variabili le equazioni dei vincoli diventano:

- **Bilancio dell'acqua calda**

$$\sum P_{max_i} \cdot \Delta CC_i \cdot \eta_{ac_i} \geq AC - K_{ac} - \sum P_{max_i} \cdot CC_i^k \cdot \eta_{ac_i} \quad (7.31)$$

- **Bilancio del vapore**

$$\sum P_{max_i} \cdot \Delta CC_i \cdot \eta_{v_i} \geq V - \sum P_{max_i} \cdot CC_i^k \cdot \eta_{v_i} \quad (7.32)$$

- **Bilancio del freddo**

$$\sum_i P_{max_i} \left[\eta_{f_i} + \eta_{f_{ass_i}} (C_{ac_i}^+ \eta_{ac_i} + C_{v_i}^+ \eta_{v_i}) \right] \cdot \Delta CC_i \geq F - \dot{Q} - \eta_{f_{ass_i}} \left(C_{ac_{ass}} K_{ac} - C_{ac_{ass}} UAC - C_{v_{ass}} UV - \sum_j \dot{Q}_{max_j} \right) + \sum_i P_{max_i} \left[\eta_{f_i} + \eta_{f_{ass_i}} (C_{ac_i}^+ \eta_{ac_i} + C_{v_i}^+ \eta_{v_i}) \right] \cdot CC_i^k \quad (7.33)$$

7.3 Algoritmo usato nel modello

Da un punto di vista matematico il metodo di ottimizzazione SQP è molto affidabile solo se il punto di partenza è non molto distante dal punto di arrivo. Per capire meglio il problema si immagini di avere a che fare con una funzione obiettivo ad una sola variabile.

La funzione profitto potrebbe per esempio avere un andamento tipo quello in figura 71:

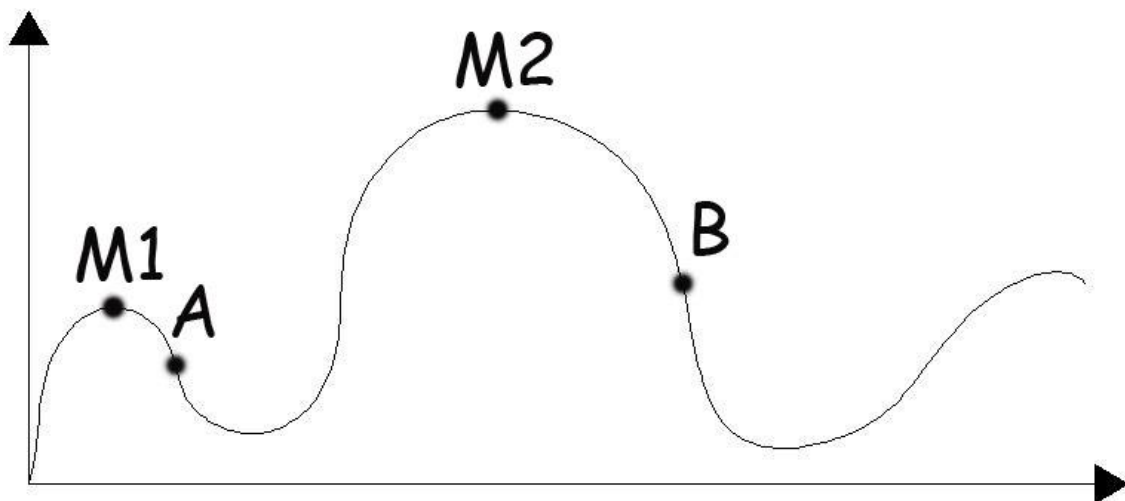


Figura 71 Esempio di funzione obiettivo ad una sola incognita

L'ottimizzazione quadratica sequenziale di una funzione si basa sullo studio delle derivate prime e seconde in un punto.

Se per esempio si vuole massimizzare la funzione in questione, il modello matematico cercherà di "scalare" il grafico partendo da un punto iniziale, scegliendo ogni volta incrementi dei coefficienti di carico nella direzione in cui la derivata della funzione obiettivo rispetto al coefficiente di carico sia positiva.

Questo algoritmo può portare a trovare non il massimo assoluto della funzione bensì un massimo relativo, infatti se si parte dal punto A si arriverà al punto M1, mentre se si parte dal punto B si arriverà al punto M2.

Il problema nasce dal fatto che la funzione obiettivo non è quadratica, anzi in realtà non è neanche derivabile in tutti i suoi punti. Quando si passa da una configurazione con bilancio elettrico negativo ad uno positivo, cambia il costo di acquisto/vendita dell'energia, quindi cambia bruscamente la pendenza della funzione. Ulteriori complicazioni si presentano nel caso di presenza di n macchine in quanto il grafico del profitto diventa di n dimensioni, per cui le possibili scelte sui coefficienti di carico aumentano. Aumenta altresì la complessità del grafico.

Tali complicazioni sono state risolte nell'implementazione del codice di calcolo scegliendo un punto di partenza (x_0) appropriato, possibilmente non lontano dal massimo globale. La scelta del punto di partenza nel modello è affidata al metodo backtracking.

L'algoritmo sviluppato quindi prevede una prima ottimizzazione di tipo backtracking che utilizza un numero limitato di discretizzazioni per determinare il punto x_0 , cioè il punto di partenza della fase di ottimizzazione SQP. Questa seconda ottimizzazione permetterà di trovare con ottima precisione la configurazione ottimale del sistema secondo il criterio di ottimizzazione scelto.

In sintesi dunque per ogni intervallo temporale vengono lanciate due ottimizzazioni distinte in sequenza. La prima (backtracking) permette di trovare un punto di partenza ammissibile non lontano dal massimo globale, consentendoci di giungere ad un buon punto di partenza per l'ottimizzazione seguente; la seconda (SQP) permette di individuare il punto ottimale con buona precisione e con incrementi nel tempo di calcolo limitati rispetto al caso di sola ottimizzazione backtracking.

Capitolo 8

Molte sono le potenziali applicazioni della metodologia sviluppata che vanno dalla progettazione ex novo di una centrale di produzione energetica in tutte le sue caratteristiche, alla simulazione di un sistema già esistente volta alla definizione ad esempio delle potenzialità di risparmio ovvero alla realizzazione di un preventivo di spesa. Tutte le possibilità passano attraverso l'applicazione delle equazioni elencate e descritte nei capitoli 6 e 7.

Per dare un'idea che possa far intendere in maniera quanto più concreta possibile l'utilità e applicabilità del metodo proposto, in questo ultimo capitolo viene mostrato un esempio pratico realizzato su di un caso di studio reale.

8.1 Ottimizzazione della centrale energetica di un ospedale

I dati utilizzati nel caso di studio in esame è quello di un grande ospedale di Perugia che li ha raccolti per valutare la possibilità di acquistare un motore a combustione interna cogenerativo per cedere al fornitore l'energia elettrica prodotta in surplus e anche per soddisfare una parte del carico termico di riscaldamento dalla struttura. La campagna di misurazione e reperimento dati ha permesso di disporre di valori mensili. Cioè si assume che all'interno di ciascun mese i consumi siano uguali per tutti i giorni.

In linea di principio ciò appare in contrasto con quanto affermato nei capitoli precedenti, in quanto si potrebbe perdere la possibilità di descrivere fedelmente la variazione dei fabbisogni energetici. D'altra parte, su base annuale, una predizione molto particolareggiata rischia di essere troppo restrittiva e di conseguenza non rappresentativa della realtà in studio conducendo a delle valutazioni errate.

In ogni caso nella fattispecie di questo caso in studio, il nostro interesse è quello di mostrare come funziona il codice di calcolo sviluppato e quali possano esserne le applicazioni.

In generale la simulazione che è presentata è stata realizzata su base annuale, l'anno di riferimento è il 2003 per quanto riguarda il reperimento dati e la situazione della centrale energetica, con la scelta di utilizzare un intervallo temporale di 12 ore. Quindi gli step di simulazione sono 730. La centrale energetica al momento dello studio era composta da due caldaie per la produzione di acqua calda sanitaria e acqua calda per riscaldamento e un generatore di vapore, e da due macchine frigorifere elettriche per il raffrescamento estivo (una di riserva, mai accesa).

8.2 Fabbisogni energetici

Nelle tabelle seguenti sono indicati i consumi energetici medi mensili dell'ospedale. Dobbiamo tener conto del fatto che, seppur vero che possiamo considerare costante all'interno di ogni mese i consumi con un'approssimazione accettabile, la variazione della domanda di energia tra giorno e notte è sostanzialmente diversa. Pertanto abbiamo deciso di differenziare i fabbisogni

energetici tra diurni e notturni. Di conseguenza anche la gestione delle macchine sarà dipendente da questa scelta.

8.2.1 Energia elettrica

Utenza elettrica media giorno (kW)		Utenza elettrica media notte (kW)	
<i>gennaio</i>	2'019.0	<i>gennaio</i>	529.0
<i>febbraio</i>	1'897.5	<i>febbraio</i>	488.5
<i>marzo</i>	1'965.0	<i>marzo</i>	511.0
<i>aprile</i>	1'828.5	<i>aprile</i>	465.5
<i>maggio</i>	1'837.5	<i>maggio</i>	516.5
<i>giugno</i>	1'600.0	<i>giugno</i>	741.6
<i>luglio</i>	1'790.2	<i>luglio</i>	787.8
<i>agosto</i>	1'976.4	<i>agosto</i>	867.6
<i>settembre</i>	1'956.0	<i>settembre</i>	628.0
<i>ottobre</i>	2'172.0	<i>ottobre</i>	628.0
<i>novembre</i>	2'211.0	<i>novembre</i>	593.0
<i>dicembre</i>	2'305.0	<i>dicembre</i>	624.5

Tabella 18 Fabbisogni di energia elettrica diurni e notturni

Come è ovvio aspettarsi la notte i fabbisogni di energia elettrica sono minori e non molto variabili nel corso dell'anno conseguenza del fatto che non ci sono attività particolari di cura e diagnosi. Invece per tenere in funzione la struttura durante il giorno è necessaria una maggiore quantità di energia elettrica che dovrà essere fornita dal motore cogenerativo o essere acquistata dalla rete elettrica. Anche durante il giorno la variabilità della richiesta di energia elettrica è piccola nell'arco di tutto l'anno, aspetto che non ci sorprende data la pressoché uniforme attività di una struttura ospedaliera che è aperta tutti i giorni dell'anno ed eroga gli stessi servizi.

8.2.2 Acqua calda

Si è scelto nel modello di semplificare le equazioni riducendo i fabbisogni di acqua calda e di acqua sanitaria ad un unico valore. Tale valore è semplicemente la somma dei contenuti energetici delle due diverse componenti.

Si fa riferimento di seguito ad una portata "equivalente" di acqua calda ad una temperatura di 80°C, che riassume sia le utenze per il riscaldamento che per l'acqua calda sanitaria. Si è assunta la temperatura dell'acqua nella rete idrica a 16°C.

Utenza acqua calda media giorno (kW)		Utenza acqua calda media notte (kW)	
<i>gennaio</i>	3'252.8	<i>gennaio</i>	3'252.8
<i>febbraio</i>	3'040.8	<i>febbraio</i>	3'040.8
<i>marzo</i>	2'086.7	<i>marzo</i>	2'086.7
<i>aprile</i>	1'779.7	<i>aprile</i>	1'779.7
<i>maggio</i>	1'077.9	<i>maggio</i>	1'077.9
<i>giugno</i>	629.7	<i>giugno</i>	629.7
<i>luglio</i>	637.5	<i>luglio</i>	637.5
<i>agosto</i>	637.5	<i>agosto</i>	637.5
<i>settembre</i>	629.7	<i>settembre</i>	629.7
<i>ottobre</i>	1'074.7	<i>ottobre</i>	1'074.7
<i>novembre</i>	2'086.7	<i>novembre</i>	2'086.7
<i>dicembre</i>	2'857.8	<i>dicembre</i>	2'857.8

Tabella 19 Fabbisogni di acqua calda diurni e notturni

Diversamente dai consumi di energia elettrica, possiamo notare come la richiesta di acqua calda sia molto variabile durante l'anno, in ragione chiaramente della variazione di acqua calda per riscaldamento invernale (in estate non è necessario riscaldare gli ambienti). Questo può costituire una complicazione nella scelta dell'impianto di autoproduzione di energia in quanto le macchine a cogenerazione sono in grado di produrre diverse specie di energia in proporzioni costanti, quindi sono sfruttabili tanto meglio quanto più rimangono costanti le proporzioni tra le varie tipologie di utenze.

8.2.3 Vapore

Così come per l'acqua calda, anche i consumi di vapore sono molto variabili, ma in questo caso la variabilità la osserviamo, come mostrato in tabella 20, tra il giorno e la notte. Infatti la ridotta attività lavorativa della struttura rende pressoché nullo il fabbisogno di vapore durante la notte.

Utenza vapore media giorno (kW)	
gennaio	395.2
febbraio	381.2
marzo	331.2
aprile	320.0
maggio	278.3
giugno	250.5
luglio	250.5
agosto	250.5
settembre	250.5
ottobre	278.3
novembre	331.2
dicembre	372.9

Utenza vapore media notte (kW)	
<i>gennaio</i>	217.1
<i>febbraio</i>	197.6
<i>marzo</i>	125.2
<i>aprile</i>	100.2
<i>maggio</i>	39.0
<i>giugno</i>	0.0
<i>luglio</i>	0.0
<i>agosto</i>	0.0
<i>settembre</i>	0.0
<i>ottobre</i>	39.0
<i>novembre</i>	125.2
<i>dicembre</i>	180.9

Tabella 20 Fabbisogni di vapore diurni e notturni

8.2.4 Acqua fredda

L'andamento della richiesta di acqua fredda è costante di giorno e di notte nei mesi invernali. Si osserva un notevole incremento del fabbisogno di tale vettore energetico nei mesi estivi dovuto all'incremento delle richieste di raffrescamento degli ambienti.

Utenza fredda media giorno	
<i>gennaio</i>	500.0
<i>febbraio</i>	500.0
<i>marzo</i>	500.0
<i>aprile</i>	500.0
<i>maggio</i>	1'238.0
<i>giugno</i>	2'140.0
<i>luglio</i>	2'475.0
<i>agosto</i>	2'475.0
<i>settembre</i>	1'738.0
<i>ottobre</i>	1'238.0
<i>novembre</i>	500.0
<i>dicembre</i>	500.0

Utenza fredda media notte	
<i>gennaio</i>	500.0
<i>febbraio</i>	500.0
<i>marzo</i>	500.0
<i>aprile</i>	500.0
<i>maggio</i>	500.0
<i>giugno</i>	500.0
<i>luglio</i>	753.0
<i>agosto</i>	753.0
<i>settembre</i>	500.0
<i>ottobre</i>	500.0
<i>novembre</i>	500.0
<i>dicembre</i>	500.0

Tabella 21 Fabbisogni di acqua fredda diurni e notturni

8.3 Macchine della centrale energetica

Come era solito qualche decennio fa, le esigenze energetiche di qualsivoglia struttura erano, nella stragrande maggioranza dei casi, limitate a coprire i fabbisogni di calore e raffrescamento in proprio, con caldaie, generatori di vapore e macchine frigorifere (ovviamente elettriche). Motivi tecnologici, la cogenerazione non aveva raggiunto i livelli di sviluppo attuali e le fonti alternative erano ancora agli albori almeno sul piano industriale, ed economici, il basso costo dell'energia elettrica, infatti non rendevano conveniente il ricorso a sistemi di produzione dell'energia diversificati. Ciò rendeva la progettazione di una centrale energetica, se vogliamo più semplice e lineare. Si trattava, di individuare un dimensionamento opportuno e progettare una rete di distribuzione il quanto più possibile bilanciata in relazione alle esigenze specifiche della struttura.

Attualmente le cose sono cambiate, sicuramente complicando notevolmente il compito del progettista, ma al contempo dando la possibilità di trovare molte più soluzioni e soprattutto di creare un sistema molto efficiente e conveniente.

Come anticipato, l'ospedale oggetto di studio non faceva eccezione. Vediamo ora in dettaglio quali sono le caratteristiche specifiche di ciascun sottosistema e come è stato riprodotto nel codice di calcolo per eseguire le simulazioni.

Il combustibile utilizzato per le macchine è il metano, avente le seguenti caratteristiche:

- potere calorifico inferiore $H_i = 47735 \frac{kJ}{kg}$
- costo per unità di massa $E = 0.545 \frac{€}{kg}$
- densità in condizioni normali $\rho = 0.72 \frac{kg}{m^3}$

8.3.1 Caldaie per la produzione di acqua calda

Nel modello sono presenti tre caldaie, una per la produzione di vapore e due per la produzione di acqua calda. La prima macchina è un generatore di vapore, in grado di produrre $0.2 \frac{kg}{s}$ alla pressione di 8 bar di vapore saturo a carico massimo. Il rendimento massimo è di circa il 90%

Coefficiente di carico	rendimento vapore
0.4	0.740
0.5	0.804
0.6	0.840
0.7	0.863
0.8	0.884
0.9	0.896
1	0.900

Tabella 22 Rendimento termico per la produzione di vapore in funzione del coefficiente di carico in diversi punti per la "caldaia 1"

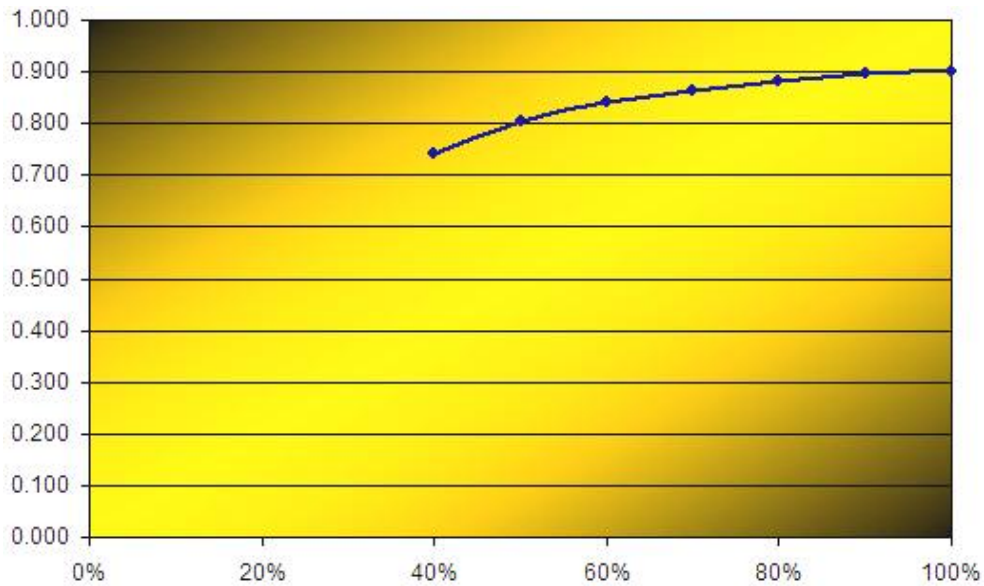


Figura 72 Andamento del rendimento termico per la produzione di vapore in funzione del carico

Le altre due caldaie sono in grado di produrre acqua calda con lo stesso rendimento in funzione del coefficiente di carico, ma potenze massime diverse:

Caldaia 2	Caldaia 3
4420 kW	960 kW

Tabella 23: Potenze massime erogabili dalle caldaie per l'acqua calda

Coefficiente di carico	rendimento acqua calda
0.3	0.700
0.4	0.870
0.5	0.896
0.6	0.905
0.7	0.918
0.8	0.930
0.9	0.941
1	0.950

Tabella 24: Rendimento termico per la produzione di acqua calda in funzione del coefficiente di carico in vari punti

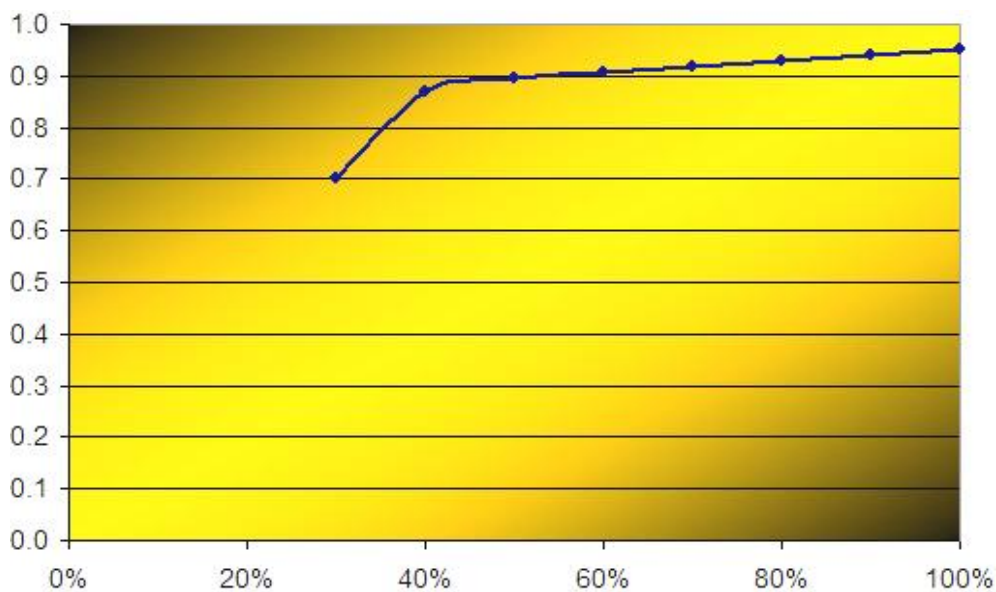


Figura 73: Andamento del rendimento termico per la produzione di acqua calda in funzione del carico

8.3.2 Macchine frigorifere elettriche

Delle due macchine frigorifere gemelle presenti in ospedale, una sola delle quali in funzione mentre l'altra è di sicurezza, hanno le caratteristiche riassunte in tabella

Coefficiente di carico	rendimento acqua fredda
0.6	2.64
0.8	3.15
1	3.45

Tabella 25 Rendimento frigorifero rispetto al coefficiente di carico in vari punti

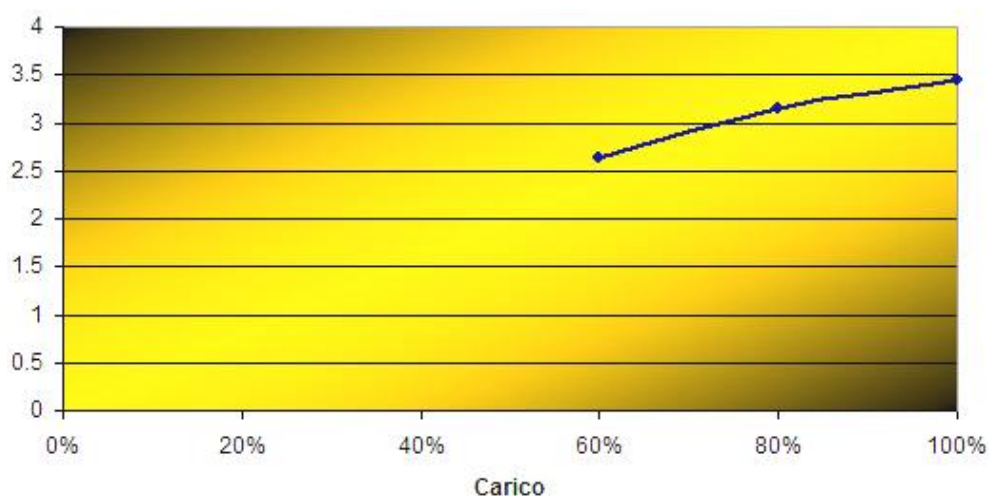


Figura 74 Andamento del rendimento frigorifero in funzione del carico

Allo scopo di mostrare le potenzialità del codice di calcolo a supporto della metodologia, descriviamo di seguito tre macchine per progettare un ammodernamento della centrale volto al contenimento dei costi di produzione di energia e ad una maggiore efficienza del sistema nel suo complesso.

Aggiungeremo nel modello:

- un motore a cogenerazione
- una macchina frigorifera ad assorbimento di calore

8.3.3 Motore a combustione interna

E' stata considerata la presenza di un motore a combustione interna cogenerativo in grado di produrre energia elettrica e termica. Tale motore presenta rendimenti per la produzione di energia elettrica variabili col carico. Sono stati invece assunti costanti i rendimenti per la produzione di acqua calda e di vapore (con buona approssimazione di fedeltà alla realtà). Si riportano i dati di targa:

- Rendimento produzione di vapore $\eta_v = 0,14$
- Rendimento produzione di acqua calda $\eta_{ac} = 0,32$
- Rendimento frigorifero $\eta_f = 0$

Coefficiente di carico	Rendimento elettrico
0.3	0.280
0.5	0.347
0.8	0.392
0.9	0.400
1	0.405

Tabella 26 Rendimento elettrico in funzione del coefficiente di carico in vari punti

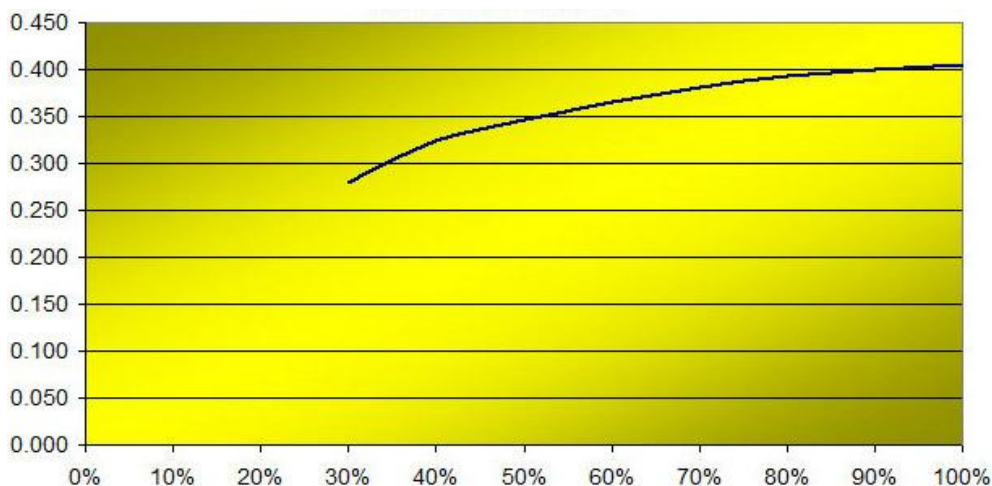


Figura 75 Andamento del rendimento elettrico in funzione del carico

8.3.4 Macchina frigorifera ad assorbimento di calore

La macchina frigorifera scelta può sfruttare calore da convertire in energia di raffrescamento fino ad un massimo di 550 kW solamente dal vapore.

Coefficiente di carico	Rendimento frigorifero
0.5	1.95
0.75	2.2
1	2.36

Tabella 27 Rendimento frigorifero in funzione del coefficiente di carico in vari punti

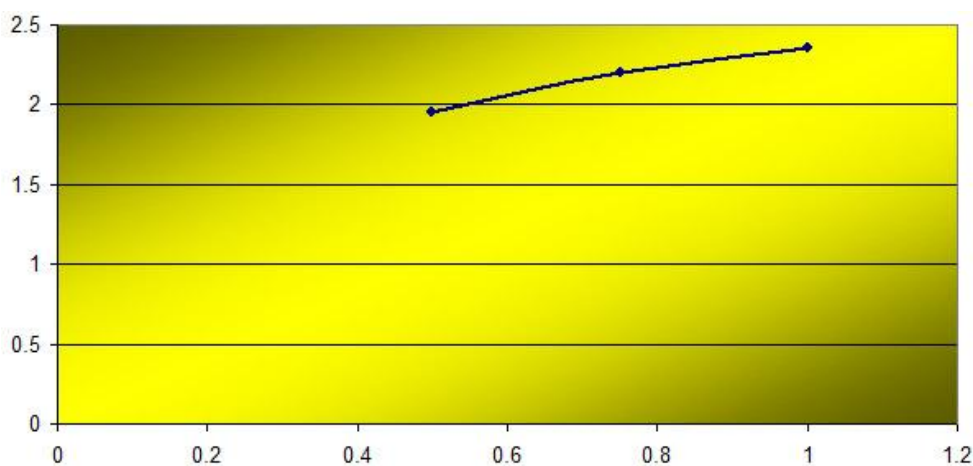


Figura 76 Andamento del rendimento frigorifero in funzione del carico

8.4 Simulazioni

E' stata eseguita la simulazione del funzionamento annuale dell'impianto in diverse configurazioni della centrale energetica, cioè composta di varie macchine. Verranno riportati i risultati per ogni tipo di configurazione studiata e verrà analizzato più in dettaglio il comportamento delle macchine nella configurazione che assicura la spesa annua di gestione della centrale energetica più contenuta.

8.4.1 Configurazione originale

La prima configurazione di impianto esaminata è quella effettivamente a disposizione della struttura ospedaliera. Le macchine che fanno parte dell'impianto "base" sono le tre caldaie (una per la produzione di vapore, due per la produzione di acqua calda) e le macchine frigorifere elettriche. Dal momento che la seconda macchina non entra mai in funzione, nei grafici non è stata mai inclusa. In tal modo, acquistando l'energia elettrica necessaria, è possibile soddisfare tutti i fabbisogni energetici della struttura ospedaliera. Impianti di questo tipo sono molto diffusi, ma presentano costi di gestione abbastanza elevati in quanto si deve ricorrere all'acquisto dell'energia elettrica.

Prima di mostrare i risultati dell'ottimizzazione completa (backtracking più SQP), si preferisce fare una breve digressione sui risultati del metodo backtracking.

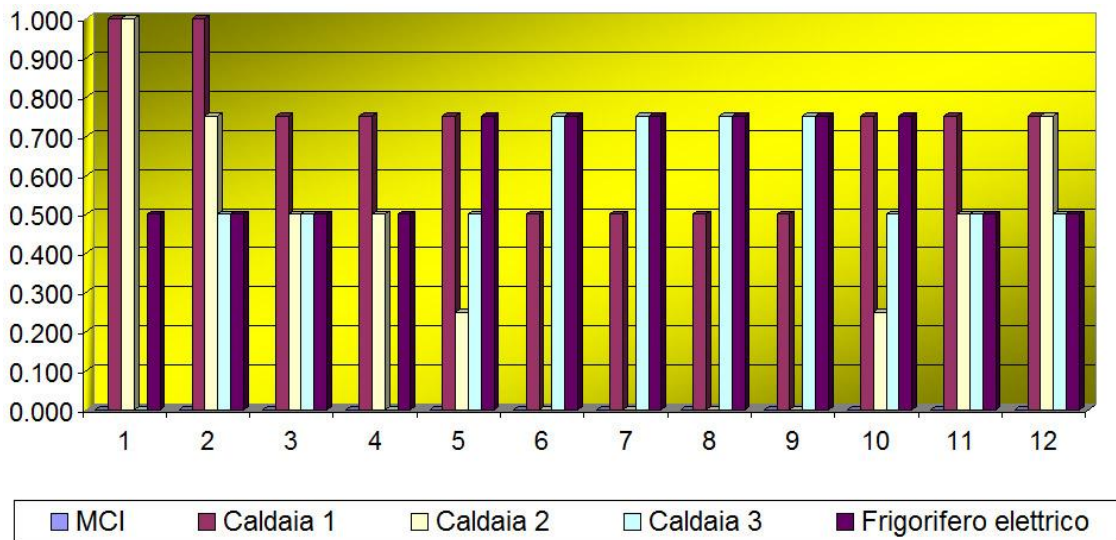


Figura 77 Coefficiente di carico medio mensile per ogni macchina (metodo "Backtracking")

Nel grafico di figura 77 è stato inserito anche il motore a combustione interna per mantenere una corrispondenza grafica con i casi che verranno analizzati in seguito. Tuttavia il suo coefficiente di carico è sempre uguale a zero perché non è compreso nella configurazione.

È bene specificare inoltre la nomenclatura utilizzata nei grafici:

- caldaia 1 = generatore di vapore
- caldaia 2 = caldaia per la produzione di acqua calda di taglia grande
- caldaia 3 = caldaia per la produzione di acqua calda di taglia piccola

D'ora in poi i nomi delle tre caldaie presenti rimarranno sempre gli stessi (le caldaie saranno presenti anche nelle prossime configurazioni).

Si noti che è presente una sola macchina dedicata alla produzione di vapore ed altrettanto per la produzione di acqua fredda; i coefficienti di carico delle macchine in questione sono quindi singolarmente vincolati a soddisfare l'utenza dedicata. La situazione è più complicata per la produzione di acqua calda in quanto in ogni periodo bisogna trovare il giusto mix dei coefficienti di carico della caldaia 2 e della caldaia 3. Nei mesi estivi, quando la richiesta di acqua calda è minore, il codice di calcolo indica che è più efficiente tenere accesa la caldaia più piccola per poterla utilizzare ad alti coefficienti di carico. Nei mesi invernali viene usata la caldaia di taglia grande, o entrambe se necessario.

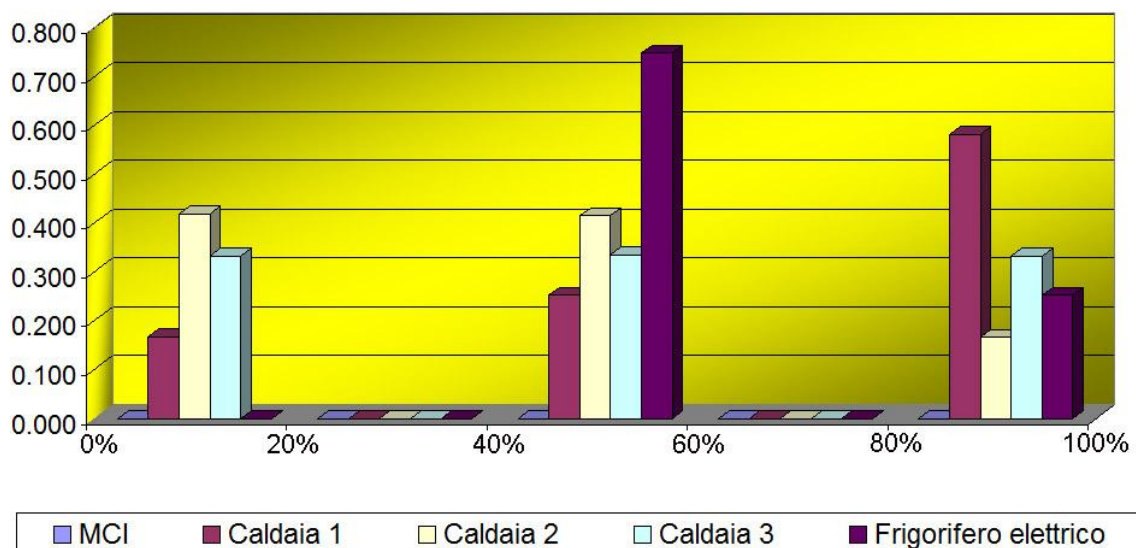


Figura 78 Fattori di utilizzo annui dei coefficienti di carico (metodo "Backtracking")

È importante osservare come siano distribuiti durante l'anno i coefficienti di carico per capire se il dimensionamento delle macchine è stato fatto in maniera corretta o meno. In figura 78 si osserva una distribuzione dei coefficienti di carico solo in alcuni intervalli. Questo fatto apparentemente bizzarro trova spiegazione nel fatto che nel metodo "Backtracking" sono stati definiti, in questo caso, solo 3 possibili coefficienti di carico per ogni macchina (0%, 50% e 100%), caso piuttosto azzardato, ma si tratta nella fattispecie di uno step intermedio della metodologia e questo giustifica la scelta fatta.

La spesa totale annua PT prevista per il funzionamento dell'impianto ottimizzato con questo metodo è stimata dal software ammontare a 2292100 €.

Il metodo SQP è molto più preciso del precedente e necessita di tempi di calcolo decisamente inferiori. Ci si aspetta una riduzione della spesa totale ed una maggior variabilità dei coefficienti di carico.

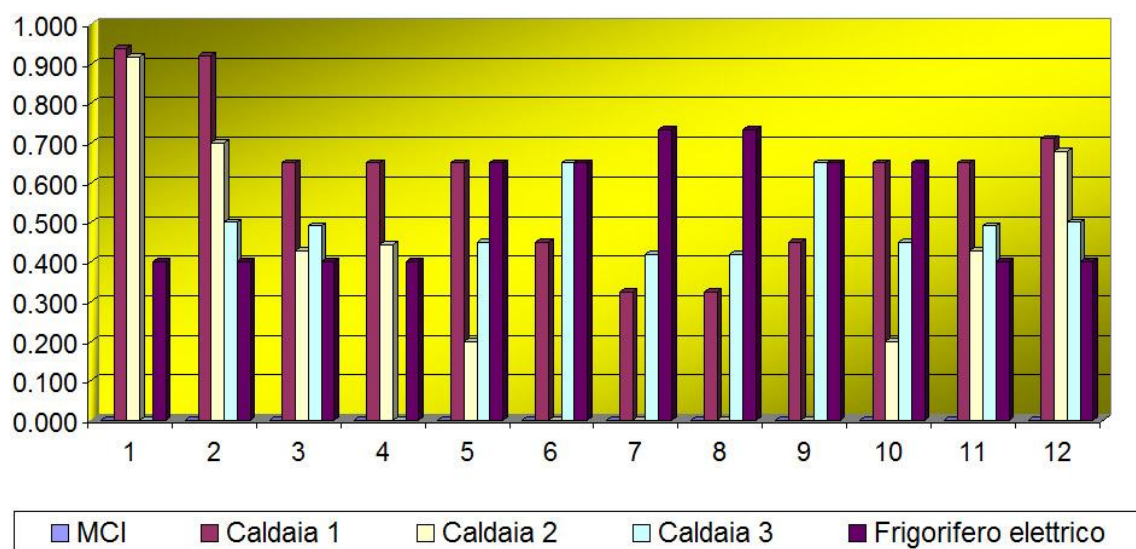


Figura 79 Coefficienti di carico medi mensili per ogni macchina (metodo "SQP")

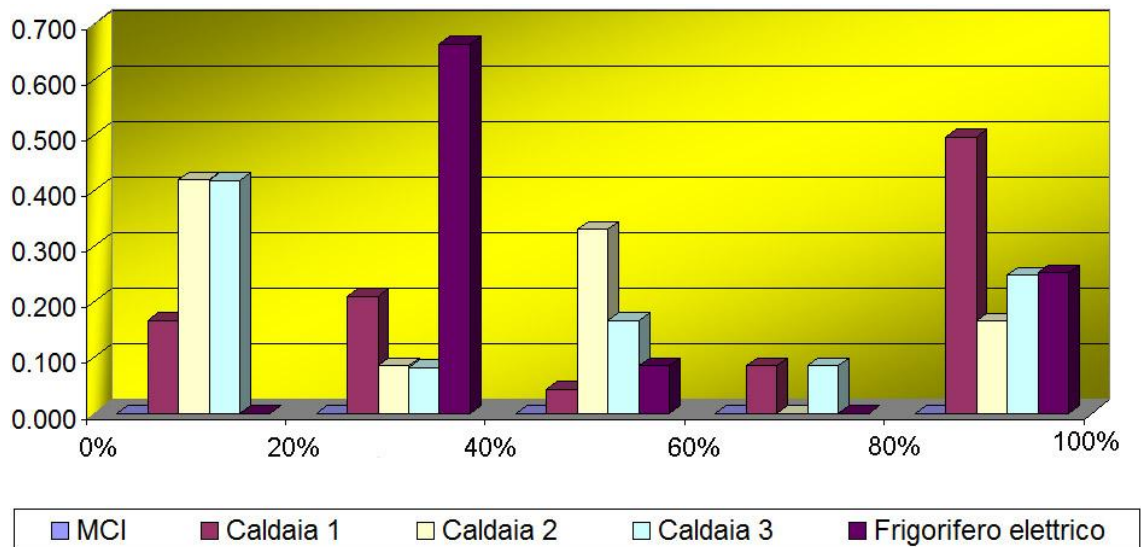


Figura 80 Fattori di utilizzo annuo dei coefficienti di carico (metodo "SQP")

Rispetto al primo metodo si nota effettivamente una più alta variabilità dei coefficienti di carico, che nel metodo SQP sono mediamente più bassi rispetto al Backtracking. Tale aspetto è dovuto al fatto che in un metodo approssimato come quest'ultimo, il soddisfacimento delle esigenze energetiche, essendo un vincolo di simulazione, è garantito da un'approssimazione per eccesso dei coefficienti di carico delle macchine del sistema. In conseguenza di ciò si riesce ad ottenere un risparmio nei costi di gestione, la spesa totale passando a 2129900 €. Con un risparmio netto dell'ordine del 7%.

Altro aspetto importante da considerare con il metodo integrale è il fatto che le macchine non sono sfruttate al meglio: ad esempio il frigorifero elettrico, per quasi il 70 % del tempo è utilizzato ad una potenza media compresa tra il 20 e il 40 % del suo carico nominale. Ciò comporta un utilizzo non ottimale della macchina, operando questa lontana dal suo punto di efficienza massima.

8.4.2 Configurazione di massima produzione di energia

In questa configurazione, rispetto alla precedente, viene aggiunto un motore a cogenerazione e un impianto frigorifero ad assorbimento di calore.

La spesa per le modifiche di impianto in questione non è indifferente, quindi è necessario, prima di affrontare un cambiamento di così grande entità della centrale energetica, stimare il risparmio annuo rispetto alla configurazione precedente, per poi valutare la fattibilità economica del nuovo impianto.

Si vuole verificare se facendo funzionare il motore a cogenerazione sempre a carico massimo si ottengono benefici sui costi legati alla vendita di energia elettrica in eccesso.

Come imposto al codice di calcolo, il motore funziona costantemente a pieno carico. Per effetto della cogenerazione e del recupero del calore da parte della macchina frigorifera ad assorbimento, si nota facilmente come le altre macchine (caldaia per la produzione di acqua calda e macchina frigorifera elettrica) siano meno utilizzate rispetto al caso precedente.

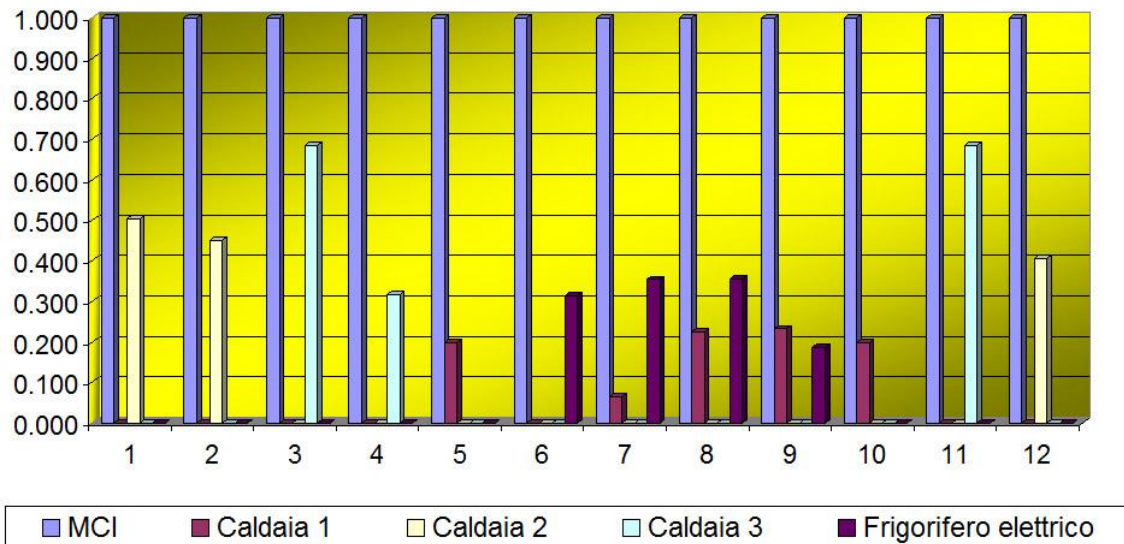


Figura 81 Coefficienti di carico medi mensili per ogni macchina (metodo "SQP")

In particolare si vede come sia sufficiente accendere una sola caldaia e solo in estate anche la macchina frigorifera elettrica.

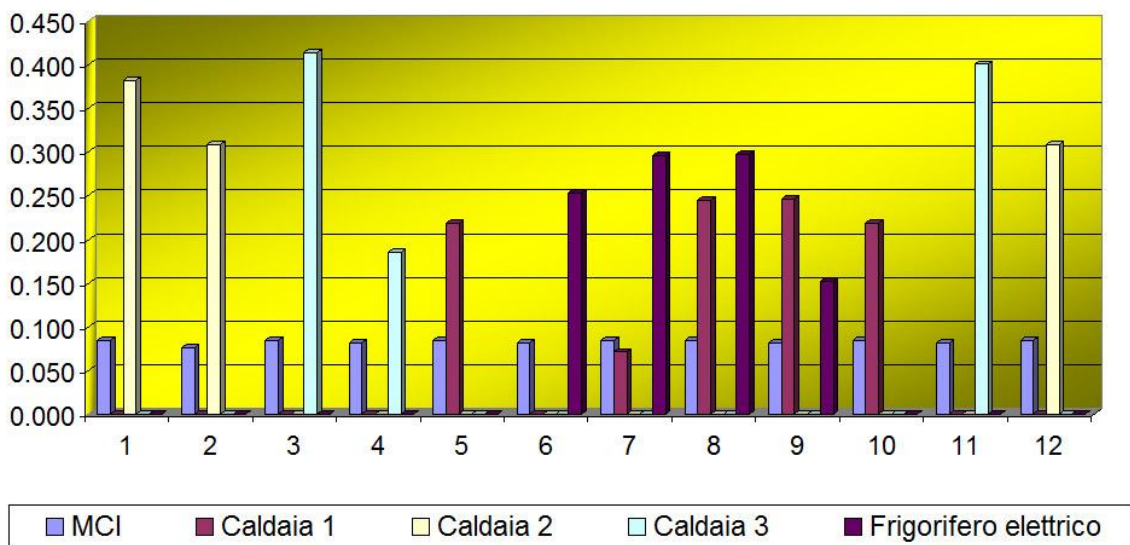


Figura 82 Coefficienti di carico mensili normalizzati (metodo SQP)

La figura 82 rappresenta una rielaborazione della figura 81: il coefficiente di carico di ciascuna macchina viene normalizzato in modo tale che il suo integrale calcolato su tutto l'anno sia pari a 1, cioè:

$$\int CC dt = 1 \quad (8.1)$$

In realtà la funzione coefficiente di carico non è una funzione continua, ma costante in ogni intervallo temporale, per cui la (8.1) diventa:

$$\sum_i CC = 1 \quad (8.2)$$

La rielaborazione del grafico dei coefficienti di carico ci permette di apprezzare le variazioni del carico durante l'anno. Ne esce un quadro completo conoscendo anche il fattore di utilizzo di ogni macchina. Risulta chiaro come il motore a cogenerazione da solo sia quasi sufficiente a soddisfare gran parte dei fabbisogni della struttura, infatti di rado le altre macchine funzionano con carichi superiori al 20%.

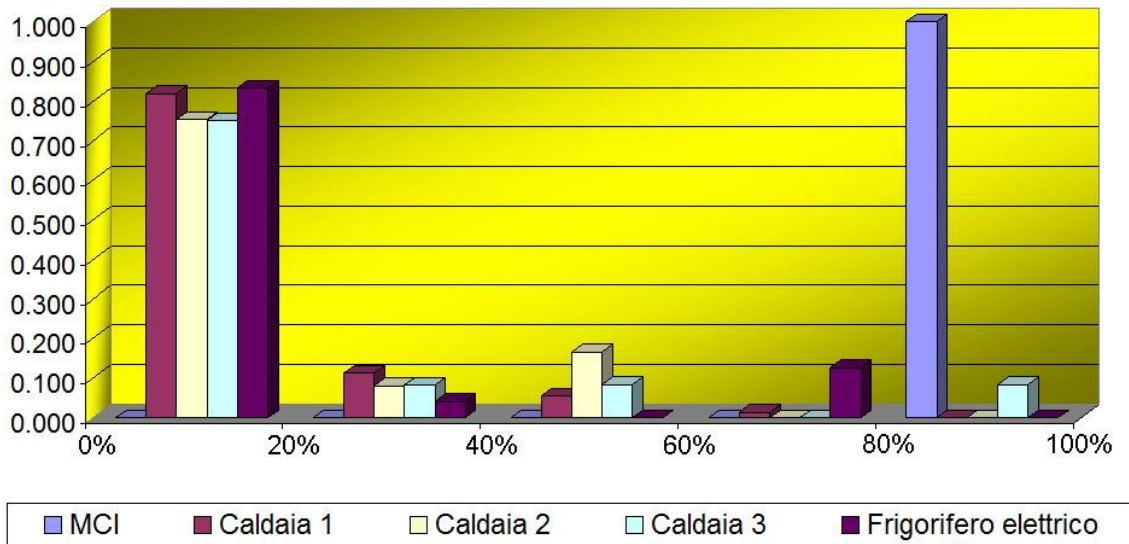


Figura 83 Fattori di utilizzo dei coefficienti di carico (metodo SQP)

Analizziamo ora separatamente il funzionamento delle macchine frigorifere:

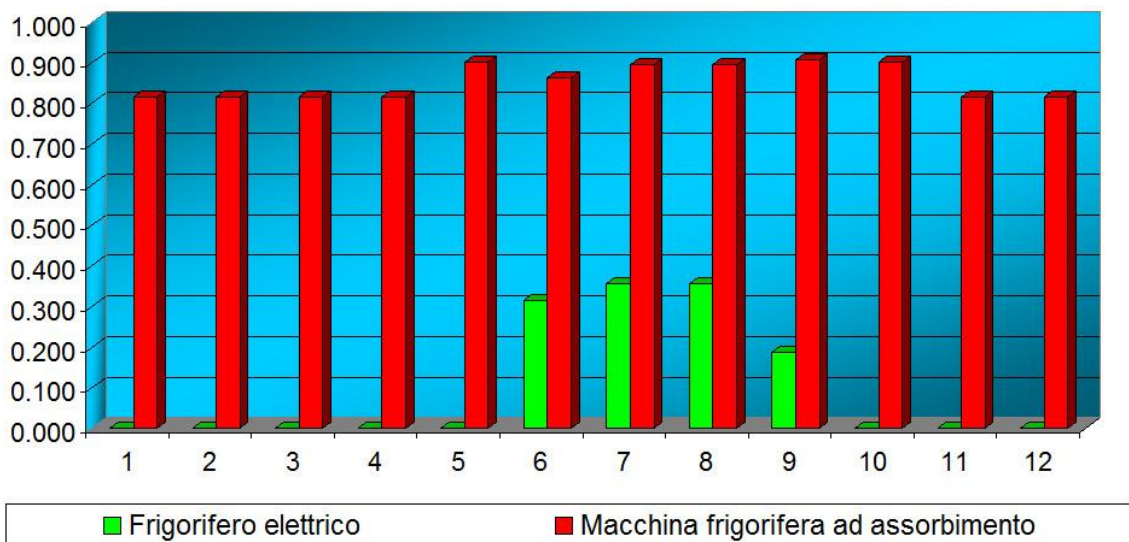


Figura 84 Coefficienti di carico medi mensili delle macchine frigorifere

La macchina frigorifera ad assorbimento di calore funziona spesso a carichi elevati, mentre quella elettrica entra in funzione solo in estate, quando la richiesta da parte dell'utenza supera la capacità massima della macchina frigorifera ad assorbimento.

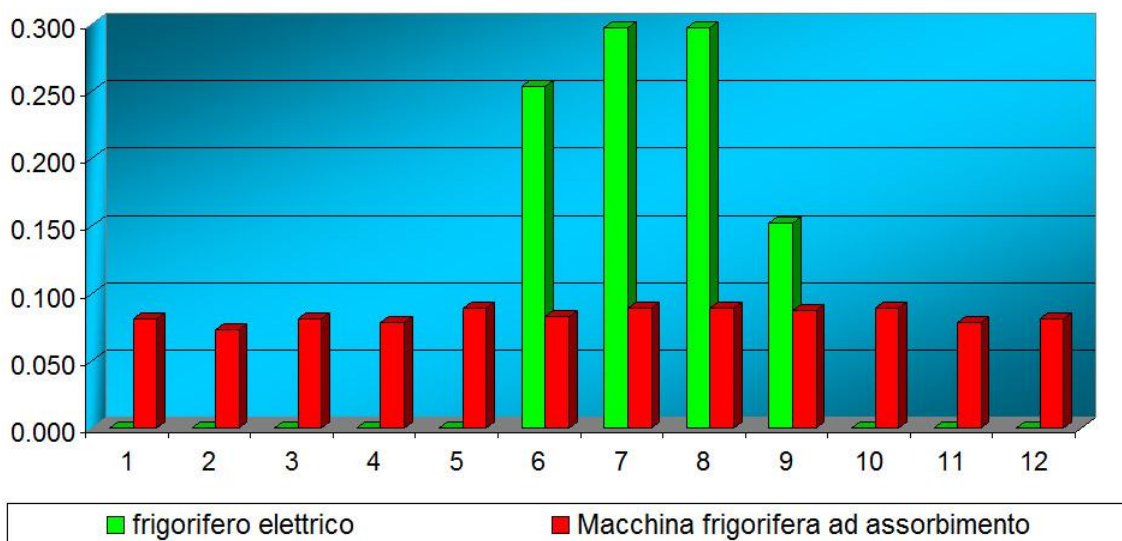


Figura 85 Coefficienti di carico medi mensili normalizzati (metodo SQP)

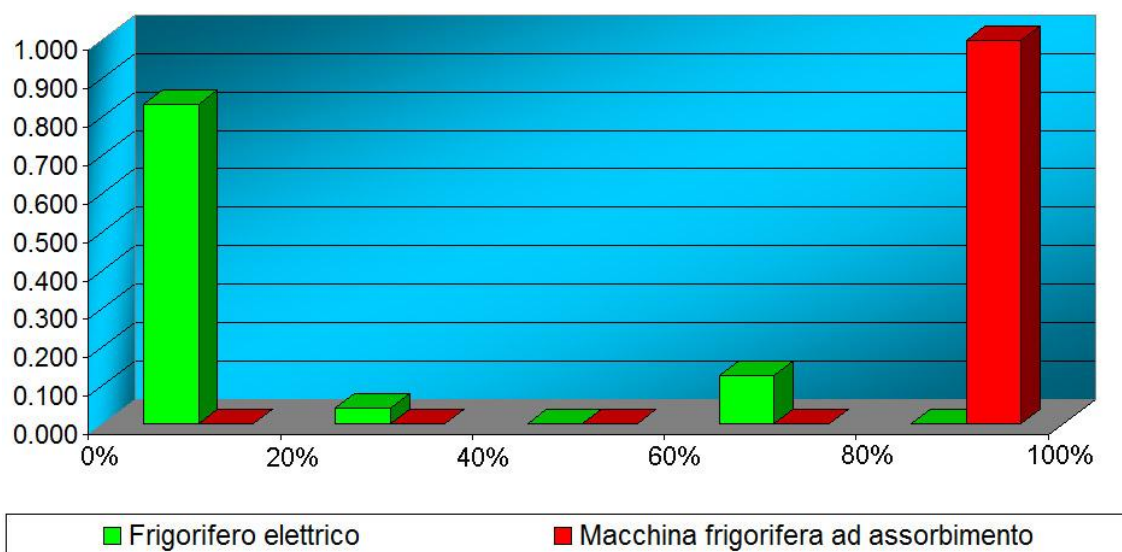


Figura 86 Fattori di utilizzo dei coefficienti di carico delle macchine frigorifere

Con la configurazione di impianto presa in esame, si ottengono grossi risparmi rispetto al caso precedente come mostrato in tabella:

Spesa totale (€)	1'330'800
<i>Profitto elettrico (€)</i>	+ 418'310
<i>Massa di combustibile utilizzata (kg)</i>	3'764'400
<i>Costo annuo per il combustibile (€)</i>	1'749'100

Tabella 28 Costi annui di gestione

Il risparmio rispetto al caso della configurazione originale ammonta a quasi 800'000 €, che corrisponde circa al 37% della spesa precedente.

8.4.3 Configurazione di minima spesa economica

La configurazione per conseguire la minima spesa energetica annua è composta dalle stesse macchine della configurazione precedente. La differenza risiede nella modalità di scelta dei coefficienti di carico. Nel caso precedente infatti il sistema era vincolato ad usare il motori cogenerativo sempre a pieno carico. In questo caso il codice può scegliere autonomamente la configurazione migliore senza altri vincoli tranne che il rispetto dei fabbisogni energetici delle utenze. In questo tipo di configurazione il modello è in grado di sfruttare al meglio le sue capacità di ottimizzazione trovando dunque dei coefficienti di carico che assicurino la minore spesa possibile. Ci attendiamo perciò costi minori (o al limite uguali) al caso precedente.

Rispetto al caso precedente risulta evidente come il software scelga in estate di ridurre il carico del motore a cogenerazione, rinunciando così a parte della vendita di energia elettrica. Questa scelta può essere giustificata dal fatto che nel periodo estivo si verifica una minore richiesta di energia termica ad alte temperature delle utenze. In questo tipo di situazione può risultare conveniente parzializzare il motore a cogenerazione rinunciando ad una parte di calore prodotto che sarebbe comunque in eccesso. La sola macchina frigorifera ad assorbimento non è in grado di produrre tutta l'energia termica fredda necessaria, per cui entra in azione anche il frigorifero elettrico.

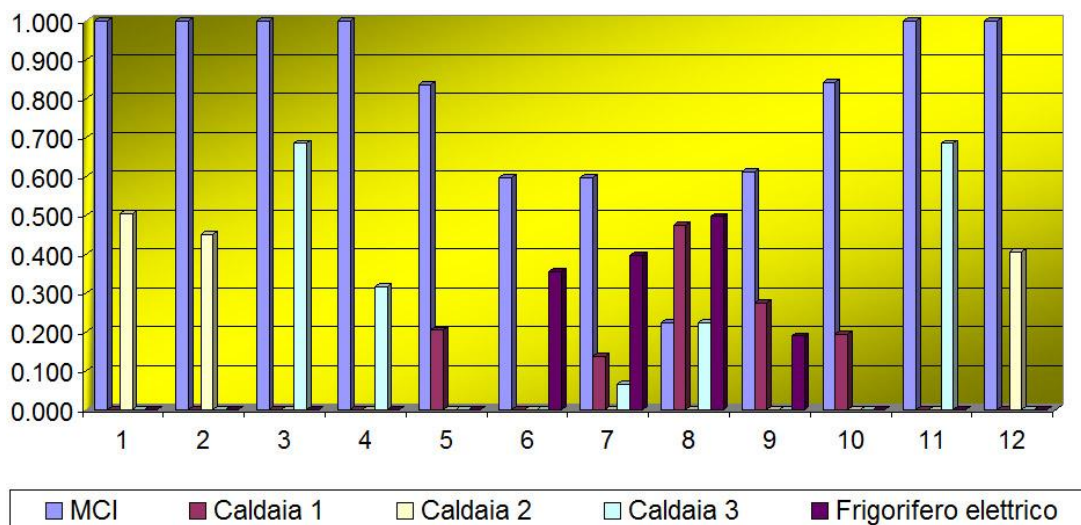


Figura 87 Coefficienti di carico medi mensili

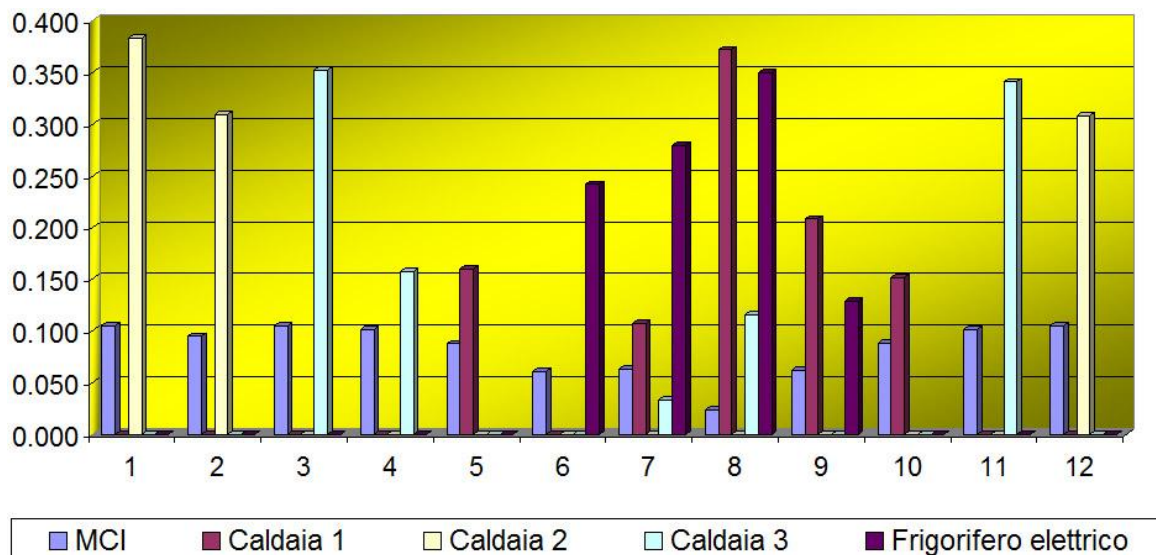


Figura 88 Coefficienti di carico medi mensili normalizzati

In figura 88 diventa ancora più evidente la diminuzione in estate dell'utilizzo motore a combustione interna. Il risultato non deve però trarre in inganno: il motore non funziona mai sotto il 35% del suo carico nominale quando è in funzione. Valori così bassi della media mensile, infatti, indicano intervalli in cui il motore non viene utilizzato (durante la notte in estate). Lo stesso discorso è valido anche per le altre macchine.

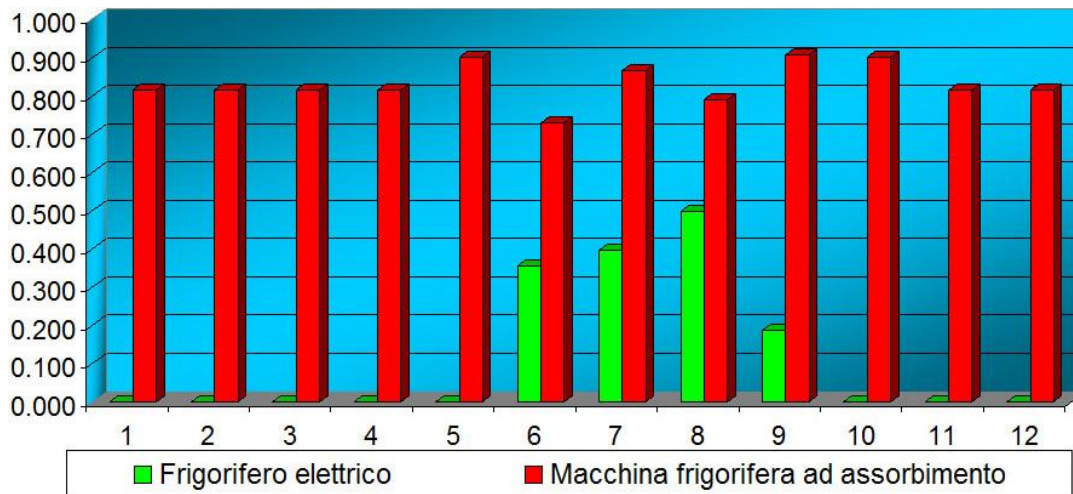


Figura 89 Coefficienti di carico medi mensili delle macchine frigorifere

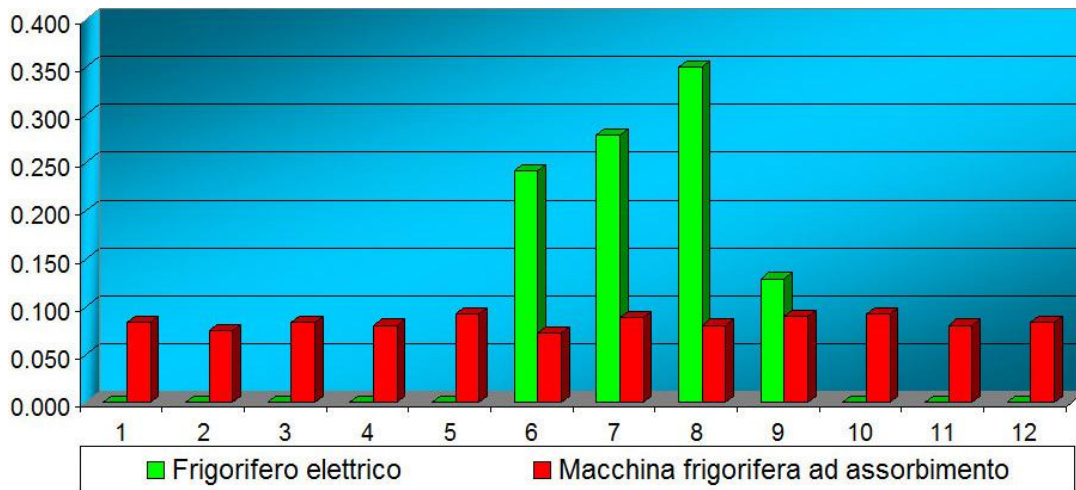


Figura 90 Coefficienti di carico normalizzati delle macchine frigorifere

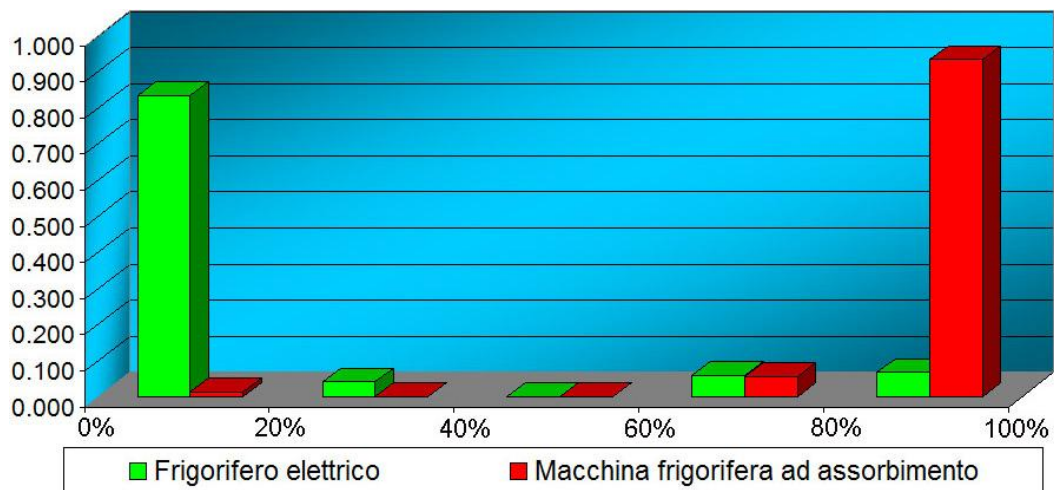


Figura 91 Fattori di utilizzo delle macchine frigorifere

Risulta molto interessante quello che succede nei mesi estivi a causa della riduzione delle utenze termiche e del contemporaneo aumento del fabbisogno di acqua fredda. E' già stato evidenziato come il motore a cogenerazione non funzioni in tutti gli intervalli temporali. Esaminiamo allora separatamente il comportamento delle macchine negli intervalli diurni e in quelli notturni.

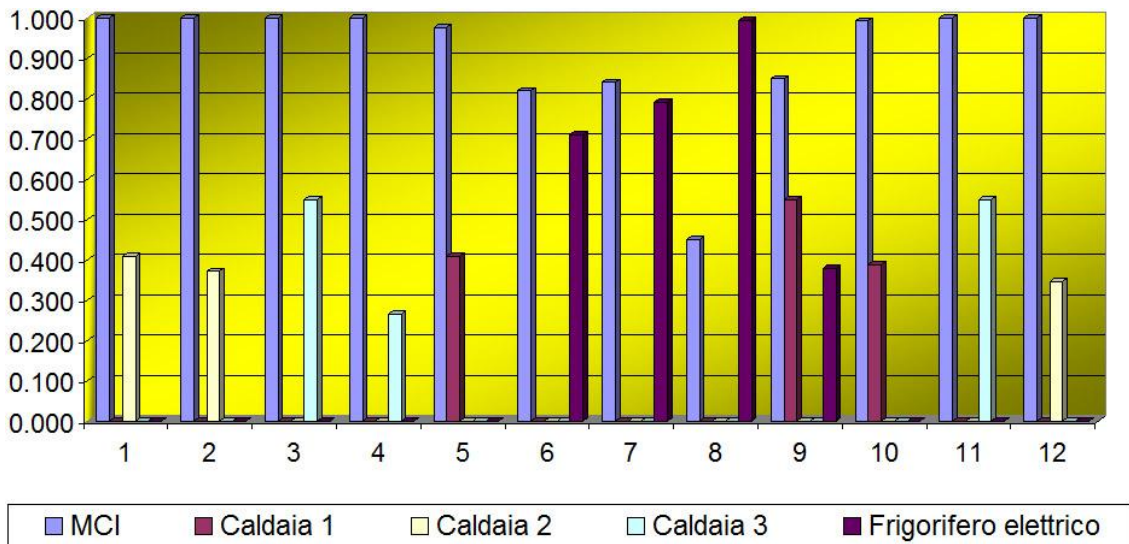


Figura 92 Coefficienti di carico medi mensili diurni

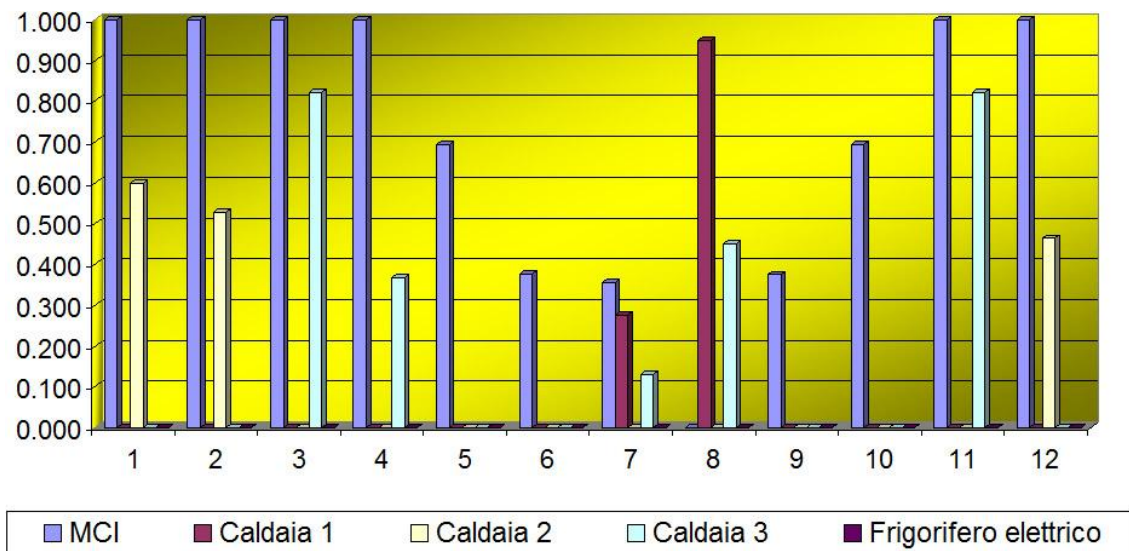


Figura 93 Coefficienti di carico medi mensili notturni

Si nota come in agosto il metodo opti per l'utilizzo del calore in eccesso prodotto del motore a cogenerazione di giorno e di quello prodotto dal generatore di vapore di notte (quando il motore produrrebbe un eccesso di energia termica sotto forma di acqua calda che non potrebbe venire utilizzata). In tutti i mesi estivi il frigorifero elettrico viene acceso solo il giorno (oltre alle macchine frigorifere ad assorbimento), mentre di notte è preferito il solo utilizzo delle macchine frigorifere ad assorbimento. In tutti i mesi eccetto agosto viene tenuto acceso anche di notte il motore a cogenerazione.

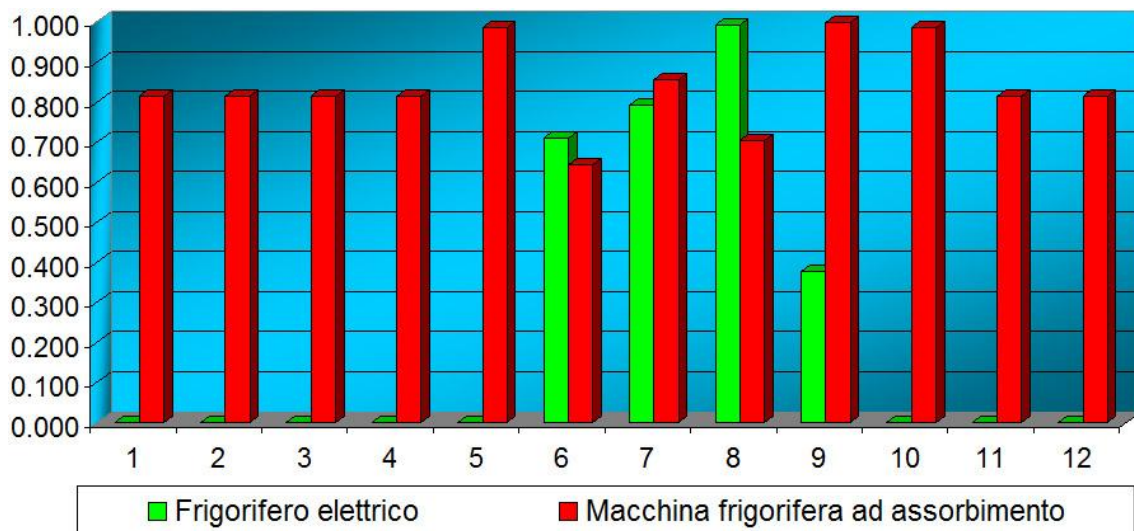


Figura 94 Coefficienti di carico medi mensili diurni per le macchine frigorifere

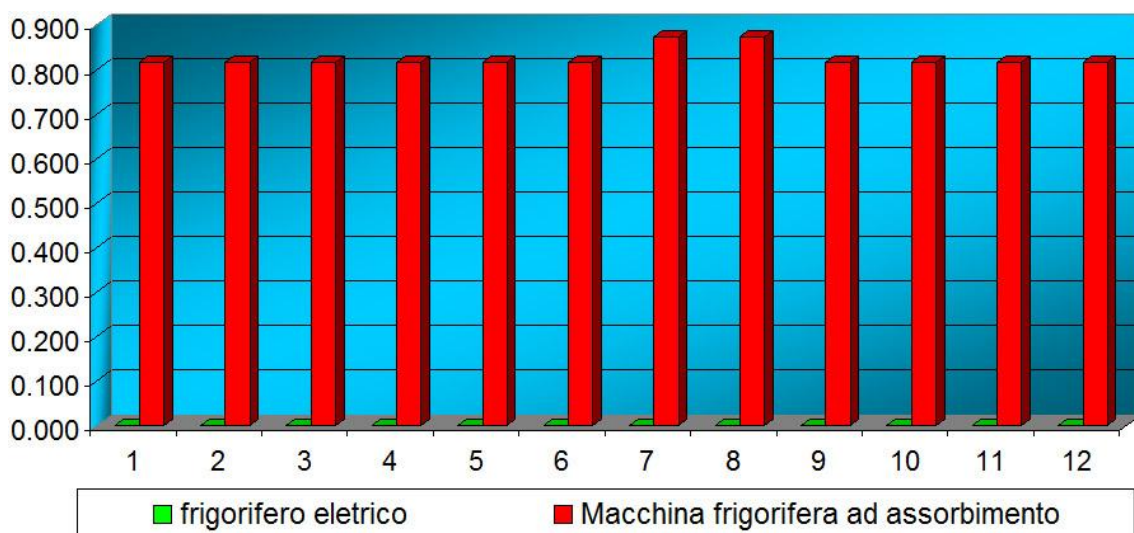


Figura 95 Coefficienti di carico medi mensili notturni per le macchine frigorifere

Per terminare, è utile dare uno sguardo d'insieme alla gestione complessiva del sistema centrale energetica, riassunta in tabella 29. La configurazione con il motore a cogenerazione e la macchina frigorifera ad assorbimento assicura un notevole risparmio rispetto alla configurazione base, circa 835'000 €/anno, corrispondenti ad un risparmio dell'ordine del 39%. Un risparmio più contenuto ma comunque non trascurabile si ottiene rispetto al caso della medesima configurazione con motore a cogenerazione sempre a pieno carico. In questo caso, già ottimizzato del resto, il risparmio è di 36'200 €/anno, con una riduzione sulla spesa totale del 2.7% circa.

Ottimizzazione SQP	
<i>Spesa totale annua PT (€)</i>	<i>1'294'600</i>
<i>Profitto elettrico annuo PE(€)</i>	<i>180'230</i>
<i>Massa di combustibile consumata (kg)</i>	<i>3'154'300</i>
<i>Spesa annua per il combustibile (€)</i>	<i>1'474'800</i>

Tabella 29 Costi annui di gestione

Conclusioni

In un contesto sempre più complesso, laddove le varie discipline tecniche appaiono non più sufficienti a far fronte singolarmente alle esigenze che vengono richieste ormai da più parti, è necessaria la loro integrazione con i principi economici, ambientali e di sviluppo sociale affinché venga favorita e sostenuta una crescita globale produttiva, sana e sostenibile.

Sebbene i progressi propriamente tecnici siano sicuramente utili e vadano sostenuti e incoraggiati, è la collaborazione trasversale tra varie discipline che rappresenta l'attuale punto di forza del nostro sistema. È appunto in tale direzione che il lavoro dei miei ultimi tre anni, come ho presentato nella tesi, si colloca.

Questa è infatti la prospettiva attraverso la quale deve essere valutato il progetto della microcar ibrida: il prodotto di diverse competenze integrate, messe in campo per ottenere dei risultati sempre migliori nel campo del trasporto automobilistico.

Da un punto di vista tecnico, il progetto, seppure ancora in fase sperimentale, ha dimostrato di essere una valida alternativa alla trazione tradizionale in ambito urbano, puntando in particolare sul sistema d'accumulo a supercondensatori. Questa scelta ha richiesto lo sviluppo di una strategia molto complessa della gestione dei flussi energetici, la definizione di apposite logiche e lo sviluppo di un software in grado di soddisfare le richieste del pilota rispettando i parametri operativi e di sicurezza dei componenti del veicolo.

Nella prima fase del progetto si sono effettuate delle simulazioni numeriche per definire le logiche di gestione sia dei sottosistemi che del sistema intero. Hanno fatto seguito i test per valutare il corretto funzionamento dei singoli componenti per la realizzazione e taratura di un controllo in controreazione per la gestione automatica del gruppo motogeneratore, che ha mostrato buone caratteristiche di stabilità e velocità di regolazione.

Infine sono state realizzate le prove del veicolo su strada e su banco a rulli, che hanno dimostrato la corretta funzionalità del programma di gestione sviluppato e mediante le quali è stato possibile calibrare i parametri di regolazione che influenzano maggiormente la gestione energetica del veicolo.

Le prove su strada hanno evidenziato quanto sia importante per un veicolo ibrido serie con supercapacitori l'adeguatezza del sistema di gestione della potenza. Infatti, in caso di gestione troppo lenta sono state riscontrate situazioni di incapacità del sistema di fornire la giusta potenza, al contrario, in caso di gestione troppo veloce, si è notato un eccessivo intervento del generatore, che trasformava il gruppo elettrogeno in una sorta di diesel-elettrico.

Riguardo la frenata rigenerativa, si è individuata la necessità di realizzare un sistema che ne migliorasse le prestazioni. Sul veicolo studiato due erano i problemi maggiori per la sua attuazione: l'incapacità di rigenerare a velocità inferiori a 15 km/h, che in ambito urbano sono molto frequenti e l'assenza di un sistema che ripartisse la coppia frenante tra l'impianto idraulico e quello elettrico, in modo da sfruttare sempre al meglio la frenata rigenerativa, e realizzare addirittura frenate solo elettriche.

L'Energy Management, è per sua natura caratterizzato da un approccio integrato della questione energia in ogni suo aspetto. La metodologia sviluppata è nata appunto con l'obiettivo di coniugare un maniera armonica ed efficiente le competenze di vari settori ingegneristici, manageriali e sociali per fornire uno strumento pratico a supporto delle attività decisionali di gestione e progettazione di centrali energetiche per autoproduzione di energia.

Il modello matematico impiegato per la rappresentazione delle macchine e dei bilanci di energia e di massa dei flussi energetici si è dimostrato affidabile e preciso. Il codice di calcolo sviluppato è sicuramente uno strumento di supporto di grande utilità, poiché consente di:

- simulare con facilità tutti gli scenari che si intende studiare
- valutare i risultati in maniera rapida e chiara, sia in termini particolari delle singole macchine e apparati che in termini globali dell'intero sistema
- confrontare i vantaggi e gli svantaggi di scenari e configurazioni diverse

Infine, anche l'algoritmo di ottimizzazione utilizzato nel modello si è dimostrato efficace ed efficiente, consentendo di raggiungere dei tempi di elaborazione dei risultati ridotti rispetto all'uso di singoli algoritmi di ottimizzazione forniti dalla ricerca operativa.

Bibliografia

- [1] IEA, "weo 2008,".
- [2] Arturo Romer, "La popolazione mondiale e il fabbisogno energetico," 2000.
- [3] International Energy Agency, "World Energy Outlook 2009," 2009.
- [4] ENEA, "Rapporto Energia Ambiente," 2007.
- [5] Andrea Masullo, "Strategie Energetiche per uno Sviluppo Sostenibile. Scenari energetici e protocollo di Kyoto," WWF Italia, 2002.
- [6] P. Villani M. Bresci, "La strada per kyoto," in *Convegno commissione tecnica ACI*, Roma, 2006.
- [7] M. Migliaccio M. Gambino, *Carburanti alternativi per l'autotrazione.*: Liguori editore, 1993.
- [8] A.D. Lopez, A. Rodgers, et al. M. Ezzati, "selected major risk factors and global and regional burden of disease," *Lancet*, no. 360, pp. 1347-1360, 2002.
- [9] U.S Department Efficiency of Energy, *Biodiesel Handling and Use Guidelines*, seconda ed., 2006.
- [10] *Development of a System for the Measurement of Soot Maldistribution and Pressure Drop Characteristics in diesel Particulate Filters*. University of Thessaly, 2002.
- [11] Vittorio Rocco, Sistemi di filtrazione del particolato emesso da motori Diesel, Università Tor Vergata - Dip.to Ing. Meccanica.
- [12] W. O. Siegl, D. D. Brehob, M. Haghoie E. W. Kaiser, "Engine out emissions from a direct-injection spark-ignition (DISI) engine," *Paper SAE*, Jan. 1999.
- [13] R. Brück, Lohmar W. Maus, "Futura tecnologia del trattamento dei gas di scarico dei motori a ciclo Otto. La prossima generazione di veicoli ad emissione estremamente bassa," , Graz, 1999.
- [14] Genova, Sasso Carnevali, "Stato dell'arte e nuove prospettive per i veicoli elettrici," Centro Ricerca Trasporti,.
- [15] Stefano Raffa, *Le nuove motorizzazioni e la tecnologia fuel cell.*, 2001.
- [16] R.H. Barnard C.M. Jefferson, *Hybrid Vehicles Propulsion.*: WIT Press, 2002.
- [17] Friedman D., *Hybrid Electric Vehicles: Possible configurations, Fuel Economy Potential and Performance.*: Cambridge Mass., 2003.
- [18] Feola M. Ubertini S., "Analysis of different hybrid vehicle architectures through new

simulation tool," in *ICE 2003, SAE-NA, Capri, Na, 2003*.

- [19] V. Di Giacomo, F. Tavani L. Martellucci, "Progetto microcar: quadriciclo consistema di propulsione ibrido serie e sistema di accumulo a supercondensator," in *ATI, Salerno, 2007*.
- [20] Santoro M. Martellucci L., "Parallel hybrid electric vehicle with ultracapacitor energy storage tank," in *20th International electric fuel cell and hybrid vehicle symposium, long beach (CA) - USA, 2003*.
- [21] Martini F., Ubertini S. Feola M., "An analitic model for hybrid vehicles design," in *ICE2005, Capri, Napoli, Italy, Settembre 2005*.
- [22] Ciminelli M. V., Feola M., Lungarini L., Martini F. Martellucci L., "Modelling and experimental evaluation of control management in the series hybrid vehicle Enea Urb-e," in *ICE2009, Capri, Napoli, 2009*.
- [23] Wayne C. Turner, William J. Kennedy Barney L. Capehart, *Guide to Energy Management*, quarta ed.: The Fairmont Press, Inc., 2003.
- [24] D. Paul Mehta. Albert Thumann, *Handbook of Energy Engineering*, Quinta ed.: The Fairmont Press, Inc., 2001.
- [25] Wayne C. Turner, *Energy Management Handbook* , Quarta ed.: The Fairmont Press, Inc. , 2001.
- [26] Bureau of Energy Efficiency, *General aspect of energy management and energy audit*. New Delhi (Book 1), 2005.
- [27] James E. Piper, *Operations and Maintenance Manual for Energy Management*.: M. E. Sharpe, Inc., 1999.
- [28] Agency (EPA) and U.S. Department of Energy. [Online]. www.energystar.gov
- [29] S. Hokoi, H. Miura, K. Shuhei L. Lopes, "Energy efficiency and energy savings in Japanese residential buildings — research methodology and surveyed results ," *Energy and Buildings*, no. 37, pp. 698–706, 2005.
- [30] W.A. Kamal, "Improving energy efficiency — the cost-effective way to mitigate global warming ," *Energy Conservation and Management* , vol. 38, no. 1, pp. 39–59, 1997.
- [31] A.K. Meier, "Observed Savings from Appliance Efficiency Standards," *Energy and Buildings*, vol. 26, pp. 111-117, 1997.
- [32] M. V. Ciminelli, B. Di Silvio, T. Fedele, and V. Introna V. Cesarotti, "Energy Budgeting and Control for Industrial Plant through Consumption Analysis and Monitoring," in *EuroPES 2007, Palma de Mallorca, 2007*.

- [33] Introna V., Dispense del corso di Gestione degli Impianti Industriali , 2006.
- [34] A.W.M. van Schijndel, "Optimal operation of a power plant , " *Energy and Buildings* , vol. 34, pp. 1055-1065., 2002.
- [35] P.G.M. Boonekamp, "Evaluation of methods used to determine realized energy savings," *Energy and Buildings*, vol. 34, pp. 3977-3992, 2006.