



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TORINO

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Ottimizzazione powertrain ibridi per applicazioni navali

Relatori

prof. Daniela Anna Misul
dott. Federico Miretti

Candidato

Francesco NOVELLO
matricola: 319048

ANNO ACCADEMICO 2024-2025

Sommario

L'inquinamento dell'aria nei pressi del centro storico di Venezia dovuto alla navigazione ha portato alla ricerca e all'analisi di sistemi di trasporto più sostenibili. L'utilizzo di sistemi ibridi diesel-elettrici ha mostrato buone potenzialità sull'abbattimento delle emissioni, in particolar modo sugli HC ed NO_x , i quali hanno effetti dannosi sulla salute umana. La struttura della tesi è composta da tre parti. Nella prima parte si è valutata la configurazione ibrido parallelo ottimale. Al fine di garantire il migliore risultato sulla riduzione del profilo emissivo, il comportamento del sistema e la strategia di controllo ottimale sono state ricavate facendo uso dell'algoritmo DynaProg. L'architettura si dimostra meno inquinante rispetto a quella convenzionale, mentre, rispetto alla configurazione ibrida serie, si ottengono risultati migliori sulla produzione degli HC a scapito di un aumento degli NO_x emessi. Nella seconda parte della tesi si è effettuato uno studio sulla variazione degli inquinanti in funzione della capacità della batteria all'interno dell'architettura ibrida serie. I risultati ottenuti dimostrano che installare una capacità eccessivamente grande non comporta nessun beneficio sulla produzione degli inquinanti, mentre, ne determina un tangibile aumento una riduzione della dimensione della batteria al di sotto di quella ottimale. Infine è stato sviluppato un sistema ECMS della configurazione ibrida serie, caratterizzato da 3 variabili di controllo e da una equazione di costo multi obiettivo incentrata sugli HC e NO_x , ottenendo un risultato che ricalca il comportamento ottenuto tramite la strategia di controllo ottimale definita da DynaProg. Lo sviluppo di un sistema ECMS ha posto le basi per l'applicazione real time della strategia di controllo, è stato quindi definito un controllo A-ECMS con lo scopo di svincolare il sistema da cicli di navigazione noti a priori.

Ringraziamenti

Ringrazio la prof.ssa Misul e il dott. Miretti per il tempo che mi è stato dedicato.

Ringrazio la mia famiglia che mi ha sostenuto durante questo percorso di studi dandomi l'opportunità di crescere come persona.

Ringrazio i miei amici, il cui tempo condiviso ha arricchito questi anni di studio.

Indice

Elenco delle tabelle	6
Elenco delle figure	7
1 Introduzione	9
1.1 Inquinamento atmosferico in Italia ed impatto sulla salute umana .	9
1.2 Inquinamento a Venezia	12
1.3 Modelli di imbarcazioni ibride e riduzione impatto ambientale . . .	14
1.4 Imbarcazione e rotta di navigazione presa in esame	16
1.5 Elaborazione dati all'elica	19
1.6 Configurazione parallelo	20
1.7 Configurazione serie	21
2 Analisi DP configurazione ibrido parallelo	23
2.1 Introduzione	23
2.2 Griglia computazionale	25
2.2.1 Valutazione griglia computazionale	25
2.3 Modello dinamico imbarcazione	28
2.3.1 Definizione vincoli	30
2.4 Risoluzione sistema e valutazione combinazione motori	30
2.5 Scelta della configurazione parallelo e confronto risultati ottenuti . .	35
2.5.1 Configurazione 125-40	36
2.5.2 Configurazione 147-40	41
2.6 Considerazioni configurazione parallelo e applicabilità in base al ciclo di navigazione	45
3 Design ottimale del pacco batteria nella configurazione ibrida serie	47
3.1 Introduzione	47
3.2 Valutazione numero ottimale di celle	47
3.2.1 Variazione inquinanti prodotti in funzione del numero di celle	48

3.2.2	Analisi dei parametri della batteria in funzione del numero di celle	49
3.2.3	Analisi funzionamento componente endotermica e valutazione energetica	51
3.3	Conclusioni	55
4	Modello ECMS della configurazione ibrida serie	57
4.1	Introduzione	57
4.2	Sviluppo modello ECMS incentrato sulla produzione di inquinanti .	58
4.3	Sviluppo strategia real time A-ECMS	64
4.4	Conclusioni	68
	Bibliografia	71

Elenco delle tabelle

1.1	Confronto limiti concentrazione di inquinanti normativa europea e normativa OMS [2].	10
1.2	Flotta di imbarcazioni stimata che percorre la laguna di Venezia [8].	13
1.3	Risultati consumo di carburante e produzione di inquinanti sul profilo di navigazione della linea 12	18
2.1	Tipologie di powerflow	29
2.2	Confronto emissioni ibrido parallelo e convenzionale	37
2.3	Confronto emissioni configurazione parallelo e serie	38
2.4	Confronto emissioni con il battello convenzionale e la configurazione ibrido parallelo 125-40	42
2.5	Confronto emissioni con il battello in configurazione ibrido serie . .	42
4.1	Confronto risultati ottenuti tramite ECMS e A-ECMS	67

Elenco delle figure

1.1	Concentrazione NO_2 , $PM_{2.5}$, SOMO35 e depositi di azoto (modello 2013) prodotti da LDDV [1]	10
1.2	Morti premature causate dai LDDV (EU28+) [1]	11
1.3	Numero di morti premature attribuite all'esposizione del $PM_{2.5}$, la linea tratteggiata rappresenta il trend lineare dei dati dal 2005 al 2020, la linea orizzontale rappresenta "Zero Pollution Action Plan" con una riduzione del 55% delle morti rispetto al 2005 [3]	11
1.4	Mappe concentrazione inquinanti in Europa, 2023 [2].	12
1.5	Confronto profili missioni	15
1.6	Linea 12 Foraneo	16
1.7	Architettura convenzionale [19]	17
1.8	Funzionamento motori Foraneo convenzionale durante la missione della linea 12	17
1.9	Distribuzione della potenza del singolo motore durante la missione .	18
1.10	Grafico flusso potenza	19
1.11	Schema configurazione in parallelo	20
1.12	Schema circuitale del modello semplificato della batteria	20
1.13	Schema configurazione serie	21
2.1	Principio di Bellman, esempio valutazione percorso migliore con archi di costo [23]	24
2.2	Variazione percentuale fuel consumption	26
2.3	Variazione percentuale NO_X	27
2.4	Variazione percentuale HC	27
2.5	Profilo <i>Torque split</i> durante la simulazione con $u_{max} = 3$	31
2.6	Variazione fuel consumption in funzione della combinazione delle taglie motori	33
2.7	Variazione produzione HC in funzione della combinazione delle taglie motori	34
2.8	Variazione produzione NO_X in funzione della combinazione delle taglie motori	35
2.9	Emissioni assolute e relative rispetto al battello convenzionale . . .	36

2.10	Configurazione 125-40 con $\mu = 0$	39
2.11	Configurazione 125-40 con $\mu = 1$	40
2.12	Emissioni assolute e relative rispetto al battello convenzionale . . .	41
2.13	Configurazione 147-40 con $\mu = 0$	43
2.14	Configurazione 147-40 con $\mu = 1$	44
3.1	Confronto emissioni inquinanti durante la missione al variare del trade off factor	48
3.2	Variazione relativa percentuale al variare del trade off factor para- metrizzata rispetto al numero di celle della batteria	49
3.3	Confronto profili di SOC parametrizzati rispetto al trade off factor .	50
3.4	Variazione profilo SOC in funzione del numero di celle fissato un trade off factor pari a 0.5	50
3.5	Corrente di carica e scarica della batteria in funzione del numero di celle fissato un trade off factor pari a 0.5	51
3.6	Profili di potenza per capacità della batteria corrispondenti a 150 kWh e 25 kWh	52
3.7	Punti di funzionamento, trade off factor = 0.5 e batteria da 150 kWh	53
3.8	Punti di funzionamento, trade off factor = 0.5, batteria da 25 kWh	54
4.1	Punti di funzionamento bsfc e andamento di α	59
4.2	Punti di funzionamento bsfc e andamento di α con una penalità imposta pari a 9×10^{-6} , ECMS	60
4.3	Punti di funzionamento bsfc e andamento di α ottenuto per mezzo di DynaProg	60
4.4	Andamenti valutati in funzione di μ durante il ciclo di calibrazione	62
4.5	Numero accensioni durante la missione in funzione di μ	64
4.6	Rapporto relativo percentuale rispetto alla simulazione DP	64
4.7	Confronto delle differenti missioni del battello	65
4.8	Andamento equivalence factor durante la missione analizzata	66
4.9	Profilo SOC ECMS ottimale e A-ECMS	67
4.10	Profilo di potenza ECMS ottimale e A-ECMS	68

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Inquinamento atmosferico in Italia ed impatto sulla salute umana

L'Italia, in particolare la zona della Pianura Padana, si contraddistingue nel continente Europeo a causa della presenza di una notevole quantità di inquinanti. La presenza di una forte industrializzazione e l'addensamento del trasporto su gomma, leggero e pesante, associato ad una morfologia del territorio sfavorevole alla circolazione dell'aria, genera una forte contaminazione, registrando valori ben al di sopra dei limiti consentiti. Quanto affermato è visibile da numerose analisi e studi, che evidenziano quanto questa zona del nord Italia soffra un degradamento della qualità dell'aria (Figura 1.1). Il legame fra la salute dell'uomo e la presenza di inquinanti è piuttosto complesso, nonostante ciò si stima che circa il 2.3% e il 3,5% delle morti premature avvenute in Europa nel 2017 sono state causate rispettivamente dall'esposizione a lungo termine all'ozono e al $PM_{2.5}$, entrambi di natura antropogenica, riconducibili agli NO_x prodotti dai LDDV. [1]. Si stima che il numero di morti sarebbe potuto essere del 47% più basso qualora i motori avessero emesso il livello di inquinanti dichiarati ed una riduzione che sfiora l'80% se i motori diesel avessero emesso la stessa quantità di inquinanti della controparte motoristica a benzina (Figura 1.2(a)). L'Italia si posiziona al primo posto per numero di morti causati dall'inquinamento fra i paesi Europei, con un valore che supera di circa 500 decessi la seconda nazione classificata (Figura 1.2(b)). Al fine di preservare la salute dei cittadini, l'Unione Europea e l'Organizzazione Mondiale della Sanità, hanno posto dei limiti sulla concentrazione di alcuni inquinanti. La transizione energetica messa in atto ha generato un trend in decrescita sul numero di morti a causa del $PM_{2.5}$ (Figura 1.3), nonostante ciò, i livelli di inquinamento raggiunti questo anno risultano superiori a quelli imposti, in particolare si sono superati di molto i vincoli OMS, che risultano maggiormente stringenti (Tabella 1.1).

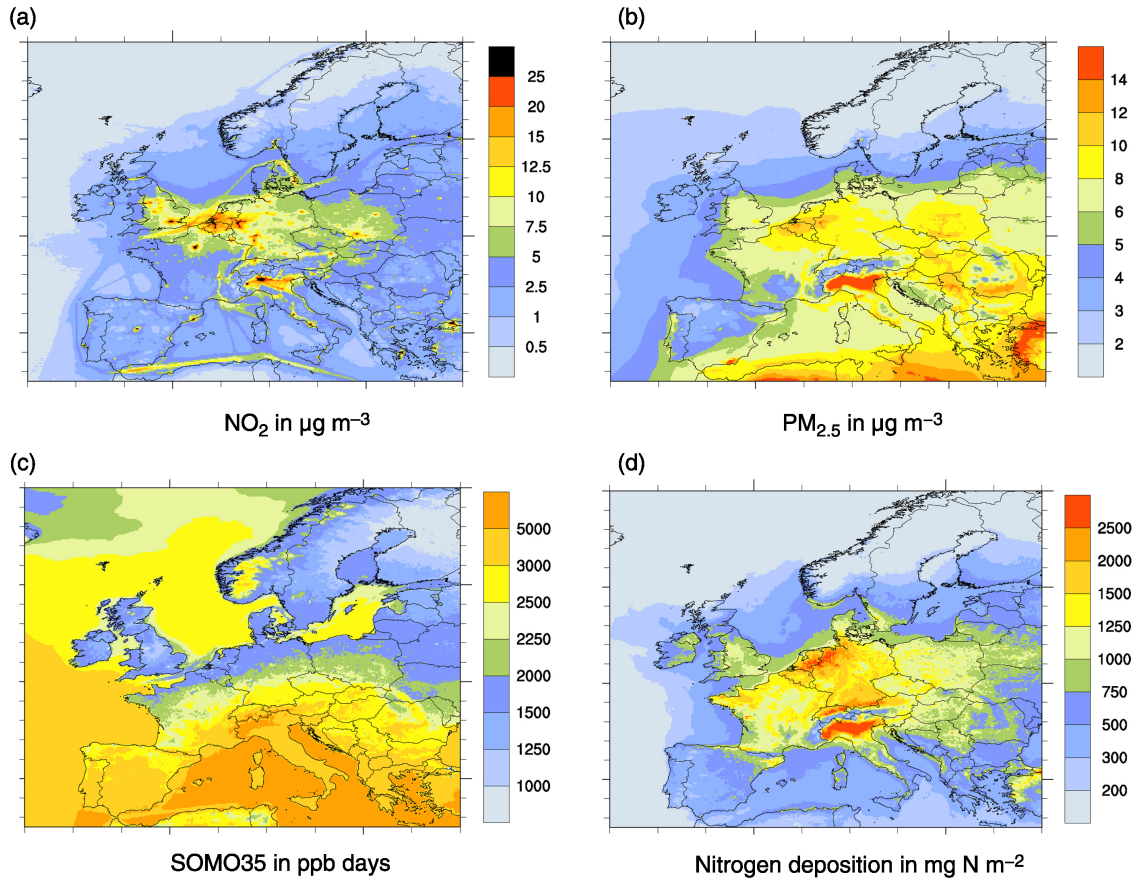


Figura 1.1: Concentrazione NO_2 , $PM_{2.5}$, SOMO35 e depositi di azoto (modello 2013) prodotti da LDDV [1]

	EU standards	WHO guidelines
$PM_{2.5}$	$25\mu g/m^3$ (concentrazione annua)	$5\mu g/m^3$ (concentrazione annua)
PM_{10}	$50\mu g/m^3$ (concentrazione giornaliera per 35gg all'anno)	$15\mu g/m^3$ (concentrazione annua)
O_3	$120\mu g/m^3$ (concentrazione media per 8h)	$100\mu g/m^3$ (concentrazione media per 8h)
NO_2	$40\mu g/m^3$ (concentrazione annua)	$10\mu g/m^3$ (concentrazione annua)

Tabella 1.1: Confronto limiti concentrazione di inquinanti normativa europea e normativa OMS [2].

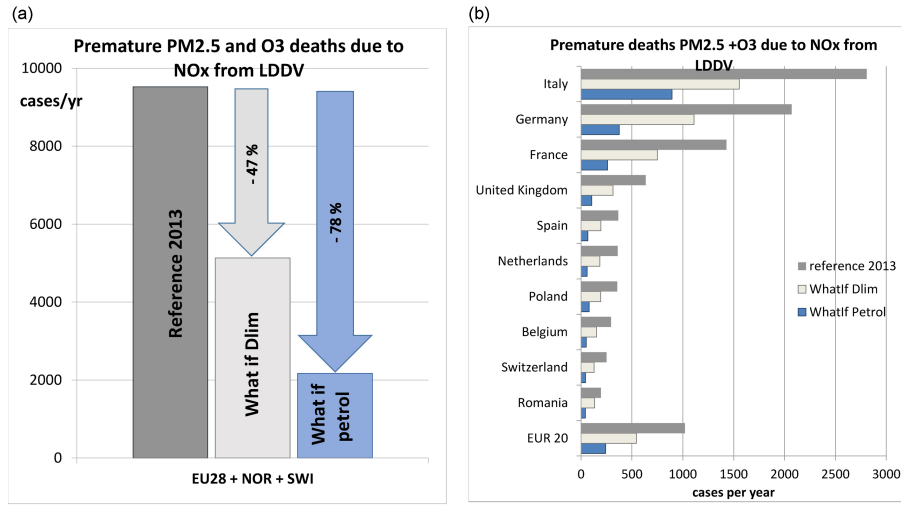


Figura 1.2: Morti premature causate dai LDDV (EU28+) [1]

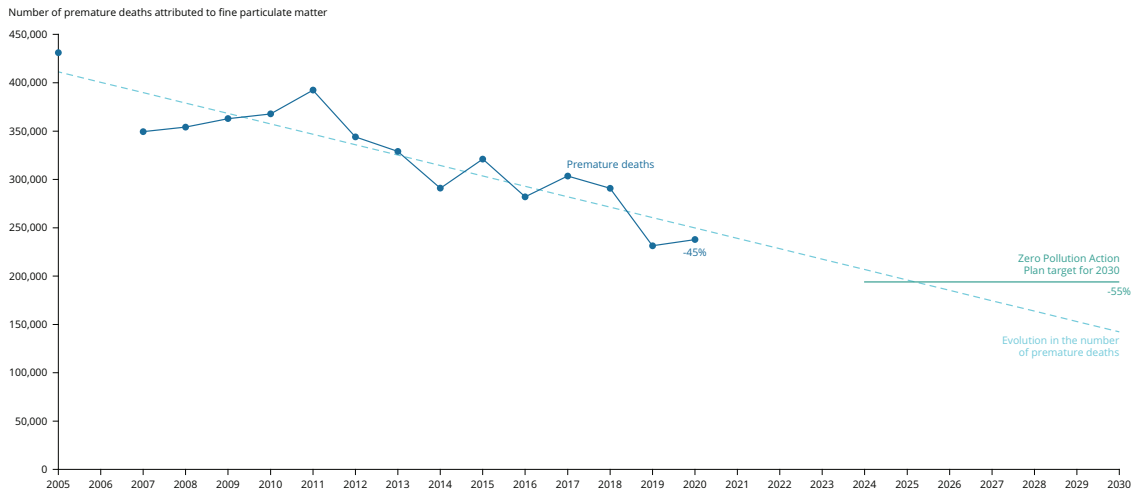


Figura 1.3: Numero di morti premature attribuite all'esposizione del $PM_{2.5}$, la linea tratteggiata rappresenta il trend lineare dei dati dal 2005 al 2020, la linea orizzontale rappresenta "Zero Pollution Action Plan" con una riduzione del 55% delle morti rispetto al 2005 [3]

Come è osservabile dalle due mappe (Figura 1.4) la zona più critica per concentrazione di inquinanti nel 2023 risulta la Pianura Padana, i valori raggiunti hanno superato i limiti europei imposti, rappresentando quindi un concreto pericolo per la salute della popolazione che abita in quelle zone.

Il peggioramento della qualità dell'aria è imputabile quasi totalmente alla combustione dei carburanti fossili, il loro largo impiego, in particolare nel settore dei

trasporti, ha causato la crescita di una economia basata sul loro consumo, generando un sistema poco sostenibile ed inquinante. Per quanto concerne al settore dei trasporti, possiamo distinguere diversi campi di applicazione che necessitano di essere citati in quanto particolarmente influenti sulle emissioni di inquinanti nell'atmosfera:

- il trasporto privato su gomma per mezzo di veicoli leggeri;
- i veicoli pesanti su gomma;
- la navigazione internazionale;
- la navigazione nazionale.

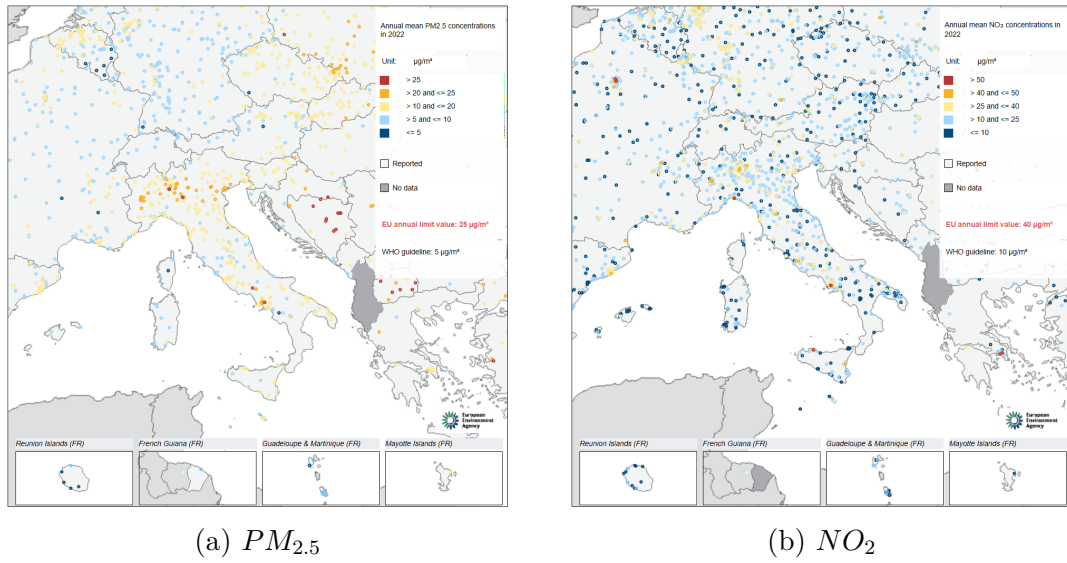


Figura 1.4: Mappe concentrazione inquinanti in Europa, 2023 [2].

1.2 Inquinamento a Venezia

La città di Venezia è situata in una zona confinante con la Pianura Padana ed il Mare Adriatico, come la maggior parte delle città dell'Italia del Nord è presente un notevole inquinamento causato principalmente dal trasporto, che in queste zone avviene facendo uso della navigazione. Una delle caratteristiche di questa città è la presenza di canali navigabili e di strade pedonali collegate da numerosi ponti; questa particolare conformazione motiva i residenti all'utilizzo dei Vaporetti, che muovendosi fra i canali della città svolgono un ruolo analogo a quello di una linea bus urbana. L'influenza del turismo è significativa ed incide notevolmente sul volume del traffico, si stima che i Vaporetti rappresentino il 13% del traffico navale, mentre più di 1/3 è generato per il sostentamento della città, come il trasporto di

cibo e bevande (Tabella 1.2).

La navigazione a Venezia è definita come via navigabile interna per questo motivo le imbarcazioni devono sottostare alla normativa EU 2016/1628 tabella II.5 [4]; si stima che la navigazione abbia influito nella produzione di NO_x e PM_{10} rispettivamente del 9,6% e del 17,7% nel 2019 [5]. Risulta piuttosto difficile attribuire correttamente la produzione di inquinanti alle diverse fonti, quali gli impianti di riscaldamento, gli impianti termoelettrici, le attività industriali di trasformazione oppure il trasporto; utilizzando i dati provenienti dalle quattro stazioni deputate alla valutazione della qualità dell'aria situate a Rio Novo, Sacca Fisola, Via Tagliamento e Parco Bissuola [6] è possibile valutare l'influenza delle rispettive fonti di inquinamento sui valori registrati.

Basandoci sui dati acquisiti dal 2017 al 2021 [7], la più alta concentrazione degli NO_2 è stata registrata dalla stazione di Rio Novo che mostra valori ampiamente superiori rispetto alle altre 3 stazioni, rendendo evidente come sia poca la qualità dell'aria, oltre a non rispettare le limitazioni imposte a livello Europeo.

	N. di imbarcazioni
Trasporto pubblico	150
Taxi	450
Navi cargo	1500
Imbarcazioni da diporto < 10 m	26000
Imbarcazioni da diporto > 10 m	4000
Imbarcazioni turistiche < 10 m	150
Navi cargo speciali	1200
Totale	33500

Tabella 1.2: Flotta di imbarcazioni stimata che percorre la laguna di Venezia [8].

I valori di PM_{10} registrati si dimostrano molto alti per tutte le stazioni, il risultato peggiore si registra in Via Tagliamento nel 2017, dove si è superato il limite imposto 94 volte a fronte di 31, miglior risultato registrato a Rio Novo durante il 2018. Valutando i dati su orizzonti temporali differenti (annuale, mensile, settimanale, orario) ed osservando l'andamento dei valori registrati, è possibile indagare e definire la possibile causa dell'anomalia; ad esempio, su base annuale, si assiste durante i mesi

invernali ad un peggioramento della qualità dell'aria come risultato dell'accensione dei riscaldamenti e della condizione climatica sfavorevole alla dispersione degli inquinanti. Data la posizione delle stazioni per il monitoraggio della qualità dell'aria è possibile studiare per ogni coppia di stazioni (nei pressi di Mestre e nei pressi del centro storico di Venezia) la differenza che intercorre fra zona trafficata e zona urbana; confrontando i delta ottenuti si rende evidente come si ha una maggiore variazione giornaliera per gli NO_2 nelle due stazioni di Rio Novo e Sacca Fisola in particolare nelle ore mattutine. Questo risultato sottolinea come la navigazione sia la principale fonte di inquinamento nei pressi del centro storico di Venezia, l'utilizzo di imbarcazioni con motori Diesel aumenta significativamente l'emissione di NO_2 in atmosfera.

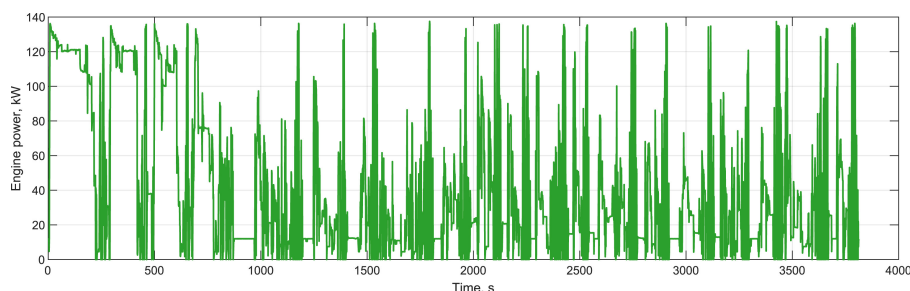
1.3 Modelli di imbarcazioni ibride e riduzione impatto ambientale

La navigazione genera un impatto ambientale non trascurabile, inoltre a differenza di quella internazionale, il cui aumento locale di inquinanti non comporta un rischio diretto per l'uomo, quella costiera e nazionale causano una riduzione della qualità dell'aria che viene respirata in tutte le zone limitrofe alle rotte di navigazione. Il contributo sulla produzione degli NO_X nelle regioni costiere riconducibile ai motori diesel si stima essere del 50% [9]; l'utilizzo di carburanti innovativi applicati con la simultanea presenza di sistemi di abbattimento delle emissioni [10][11][12] (EGR,SCR) porta in modo effettivo ad una riduzione degli NO_X , SO_X e PM. L'esigenza di imbarcazioni più sostenibili ha incentivato la ricerca di sistemi di propulsione ibridi, incentrati sulla riduzione degli inquinanti emessi in atmosfera. Data la varietà delle tipologie di imbarcazioni, differenti per tonnellaggio e potenze installate, e dei cicli di navigazione, alcuni caratterizzati da lunghi tratti sostenuti a velocità di crociera, ed altri più intermittenti, con continue manovre di ormeggio e disormeggio, si sono studiate diverse configurazioni ibride con caratteristiche che permettono di massimizzare la riduzione degli inquinanti emessi in base al caso studio scelto [13].

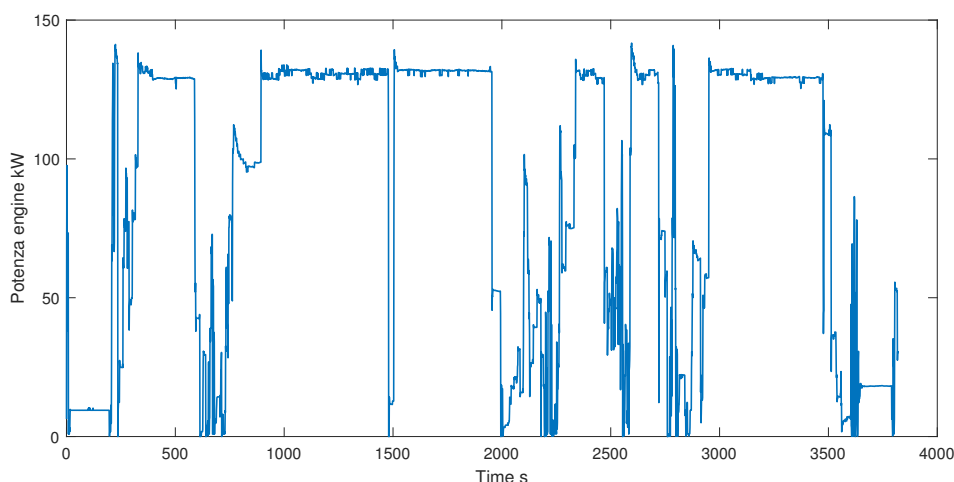
Analizzando casi applicativi simili a quelli di ACTV a Venezia, possiamo trovare un sistema propulsivo fuel cells ad idrogeno installato sul battello Halsterwasser nella città di Amburgo (capienza di 100 persone ed una lunghezza di circa 25m), caratterizzato da 12 bombole di idrogeno per un ammontare di 50 kg di capienza, una fuel cells con una potenza di output di 50 kW e una batteria da 360Ah 560V lead-gel [14]. Questa tipologia di soluzione oltre che ad azzerare le emissioni locali, ha il vantaggio di avere tempi di rifornimento simili a quelli dei carburanti convenzionali, circa 30 minuti per un rifornimento completo più altri 30 minuti per il raggiungimento della struttura.

Sebbene si distingue per dimensioni e profilo di navigazione, un esempio di imbarcazione ibrida diesel-elettrica è la Catriona costruita nel 2015 per la CMAL [15]. Questo battello lungo 43.5m e con una capienza di 150 passeggeri (22 veicoli) si occupa di collegare Lochranza con Tarbert lungo un tragitto di più di 20km senza fermate. Possiede un powetrain composto da 3 Volvo Penta Marine D13 MG e due motori elettrici a magneti permanenti da 375kW accoppiati ad un sistema di propulsione Voith 16 R5 EC/90-1.

A causa delle particolari missioni a cui sono sottoposti i battelli di ACTV, carat-



(a) Profilo potenza motore Linea 1 [18]



(b) Profilo potenza motore Linea 12 F.Nove-Treporti

Figura 1.5: Confronto profili missioni

terizzate da un notevole profilo dinamico con brevi tempi di sosta, una soluzione puramente elettrificata del battello [16] non è stata presa in considerazione anche per l'implicazione infrastrutturale che una scelta di questo tipo impone. Riferendosi allo studio sulla conversione della componente endotermica dei battelli [17], valutando complessivamente il costo da sostenere, la riduzione dell'impatto ambientale, la facilità di implementazione e il periodo di ammortamento, le soluzioni ibride con sistema di accumulo si sono dimostrate essere le migliori. Tale tipo di architettura

può essere implementata in due configurazioni, serie e parallelo, le cui performance dipendono dal tipo di missione a cui sono sottoposte. L'analisi svolta sulla Linea 1 di ACTV [18] ha mostrato come siano migliori le potenzialità dell'ibrido serie in contesti dove i punti di lavoro del motore sono notevolmente distati dai punti di ottimo, il grado di libertà aggiuntivo disaccoppia il comportamento della componente termica da quella elettrica, a beneficio di una maggiore flessibilità e minore produzione degli inquinanti. Concentrandosi sulla Linea 12 risulta interessante vedere dove si colloca la prestazione della configurazione parallelo, poiché il profilo della missione risulta diverso (Figura 1.5); soffermandosi sulla potenza erogata dal motore termico, è osservabile un comportamento più dinamico per la Linea 1, mentre la Linea 12 presenta tratti di navigazione più lunghi la cui potenza è simile a quella nominale del motore.

1.4 Imbarcazione e rotta di navigazione presa in esame

L'analisi è stata condotta sulla Linea 12 Fondamenta Nove-Treporti (Figura 1.6), la quale attraversa le principali isole dell'arcipelago veneziano con un itinerario che



Figura 1.6: Linea 12 Foraneo

dura per intero circa 50 minuti. La navigazione è fatta per mezzo del vaporetto Foraneo 330, la propulsione avviene grazie all'ausilio di due motori diesel Iveco Aifo 8210 da 147 kW a cui si collegano, tramite una trasmissione con rapporto di

riduzione 4:1, due eliche a passo fisso (FPP) (Figura 1.7). ACTV ha fornito i dati

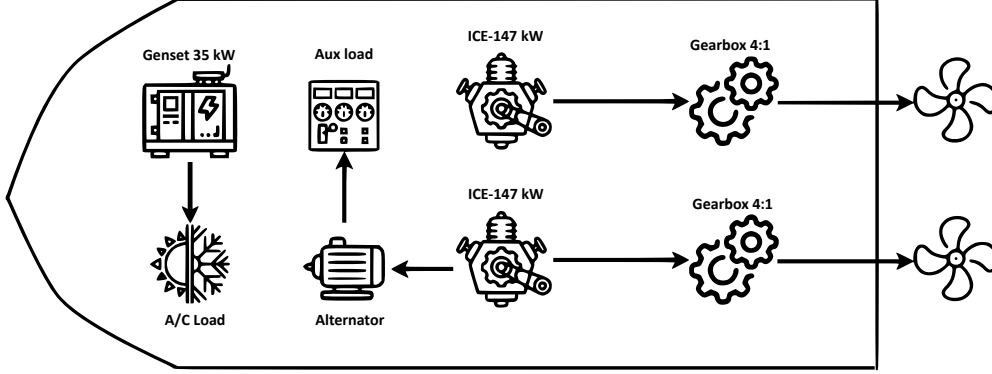


Figura 1.7: Architettura convenzionale [19]

della missione (potenza generata, rpm e velocità imbarcazione) con un tempo di acquisizione di 1/20 di secondo, di entrambi i motori installati sul battello. Grazie a questi dati è stato possibile ricavare il ciclo di navigazione, il quale ha permesso di simulare il funzionamento del gruppo propulsore nella tratta da F.Nove a Treporti. Per stimare il funzionamento e la produzione di inquinanti durante la missione sono

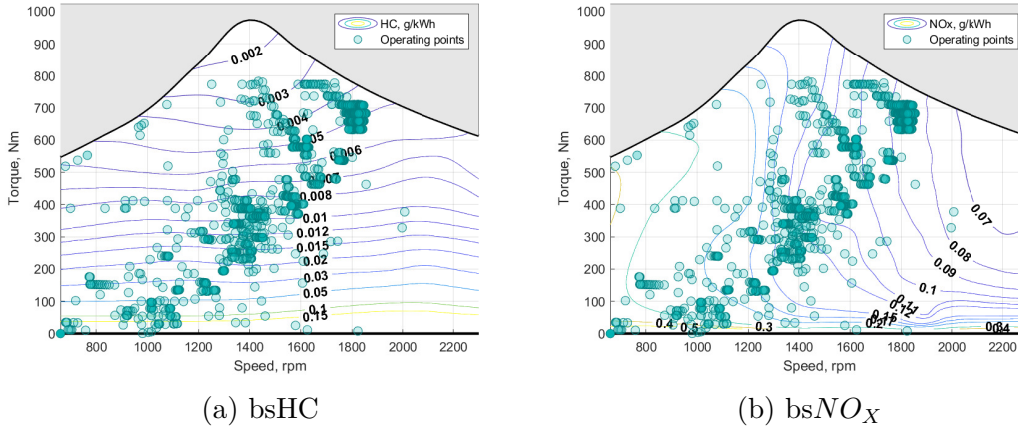


Figura 1.8: Funzionamento motori Foraneo convenzionale durante la missione della linea 12

state utilizzate delle mappe motore riferite al modello FPT-N67, un motore diesel heavy duty con potenza nominale di 125 kW, i cui valori sono stati riscaldati su una potenza nominale di 147 kW generando delle mappe rappresentative dei motori installati sul modello convenzionale. Dopo aver importato i dati della missione e le caratteristiche dell'imbarcazione, si è proceduto con la simulazione del ciclo di

navigazione estrapolando il comportamento del battello convenzionale. Osservando la Figura 1.8 possiamo notare come la disposizione dei punti ricopra la maggior parte delle curve parametrizzate, sebbene si possa notare un addensamento nella zona prossima alla potenza nominale del motore. Una così grande variabilità dei punti di funzionamento ha un risultato negativo sulla produzione di inquinanti, poiché si lavora su curve con emissione specifica maggiore, con un conseguente aumento della produzione degli NO_X e HC. Come si era dedotto dalla mappa motore, si rende evidente nella Figura 1.9 che il campo di funzionamento del motore durante la missione presenta due picchi, uno a bassa potenza (quando il motore è in idle) ed uno a potenza prossima alla nominale, dovuto alla navigazione a velocità di crociera. I risultati ottenuti dalla simulazione (Tabella 1.3) costituiscono la

Battello convenzionale	
Fuel consumption kg/h	41,96
NO_X g/h	1120,9
HC g/h	21,06

Tabella 1.3: Risultati consumo di carburante e produzione di inquinanti sul profilo di navigazione della linea 12

base con cui rapportare i risultati delle nuove configurazioni e sono rappresentativi del livello di inquinamento prodotto dalla configurazione convenzionale lungo la specifica rotta.

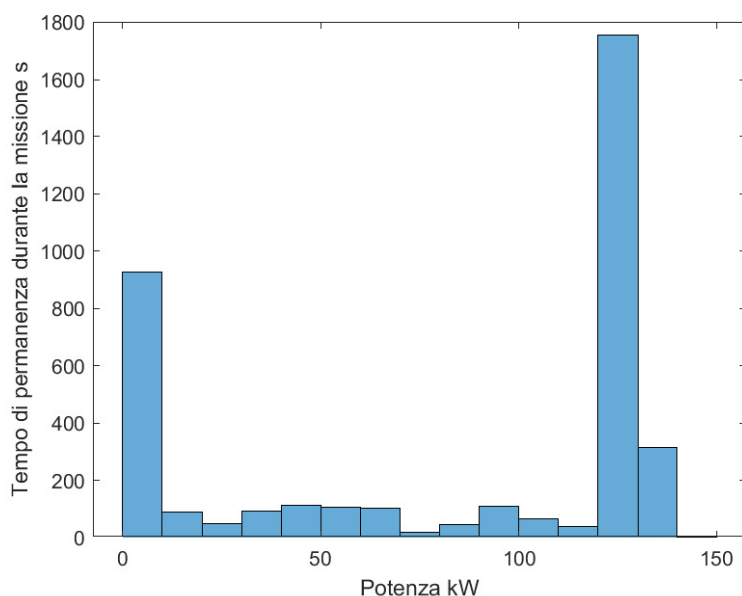


Figura 1.9: Distribuzione della potenza del singolo motore durante la missione

1.5 Elaborazione dati all'elica

I dati forniti sono stati acquisiti dal motore, motivo per il quale si rende necessaria un'analisi a ritroso sull'albero di trasmissione, fino al raggiungimento dell'elica, in questo modo si ricava un profilo di potenza richiesta che deriva dalla specifica missione, che risulta svincolato dal motore, quindi utilizzabile su modelli e configurazioni differenti (Figura 1.10). Si è partiti dalla potenza letta dal motore, a cui si è sottratto un carico ausiliario di 2.5 kW, spostandosi sul riduttore di velocità 4:1 con una efficienza di $\eta_{GB} = 0,97$ per arrivare all'elica con la potenza decomposta in coppia e velocità angolare. Durante l'analisi forward conoscendo il valore di accelerazione angolare (variazione della velocità angolare in istanti successivi dell'acquisizione) si sono considerati anche gli effetti inerziali del motore e del moltiplicatore di coppia. I dati forniti, sono inoltre stati rielaborati correggendo piccoli errori durante l'acquisizione; i valori di coppia che superavano il massimo consentito nello specifico regime di rotazione sono stati saturati, mentre le velocità di rotazione prossime all'idle di 650 rpm sono state riportate a tale valore con una tolleranza di 4 rpm, infine si è fatta l'assunzione per cui in idle e per velocità dell'imbarcazione inferiori ad 1 km/h, la velocità e coppia all'elica risultino nulle.

In questo modo si sono estrapolate le informazioni di velocità e coppia all'elica durante la missione analizzata, utilizzando un approccio backward è possibile ricavare il funzionamento dei motori a monte dell'elica, siano essi endotermici oppure elettrici.

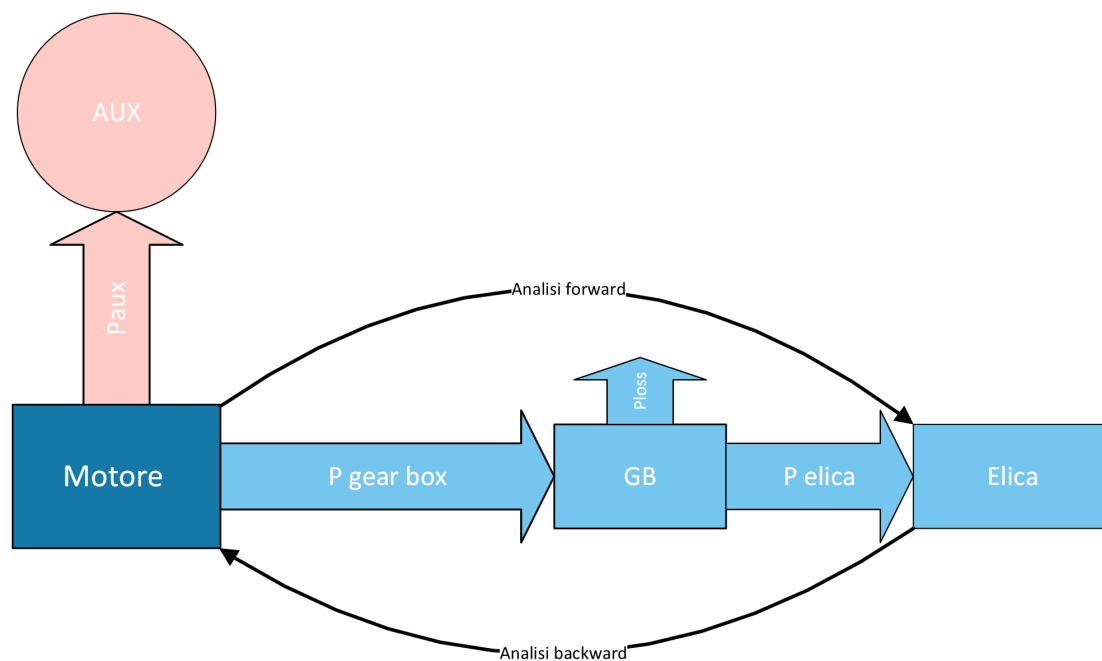


Figura 1.10: Grafico flusso potenza

1.6 Configurazione parallelo

La configurazione in parallelo presenta un motore elettrico ed uno endotermico su ciascun albero di trasmissione, i motori elettrici sono collegati entrambi ad una batteria la cui modellizzazione puramente resistiva [20] genera lo schema circuitale semplificato di Figura 1.12. Questa approssimazione permette di calcolare la

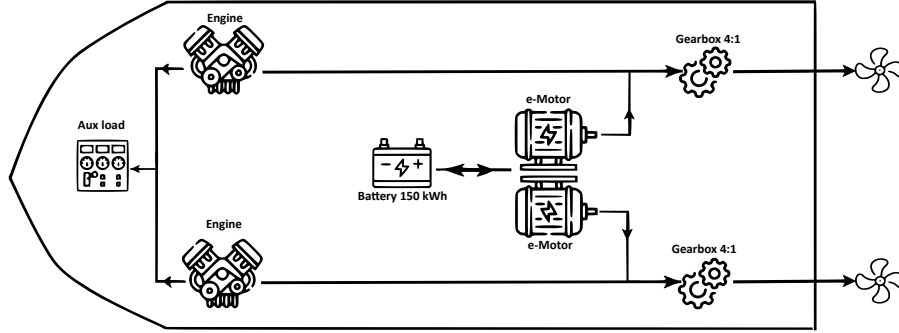


Figura 1.11: Schema configurazione in parallelo

corrente della batteria come:

$$I_{batt} = \frac{V_{OC} - \sqrt{V_{OC}^2 - 4R_{eq}P_{batt}}}{2R_{eq}} \quad (1.1)$$

consentendo di determinare la variazione del livello di carica come:

$$SOC = \frac{I_{batt}}{C_{batt}} \quad (1.2)$$

dove V_{OC} , R_{eq} e C_{batt} sono rispettivamente la tensione a circuito aperto, la resistenza equivalente e la capacità della batteria. I parametri R_{eq} e V_{OC} non sono costanti e

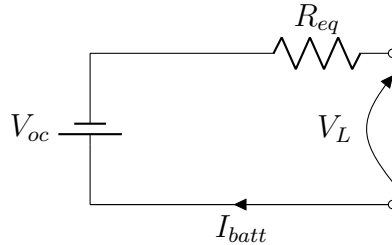


Figura 1.12: Schema circuitale del modello semplificato della batteria

variano in funzione del livello di carica della batteria, in particolare si è utilizzata

una discretizzazione di 17 punti in un range di SOC 10% – 90%.

Lo schema proposto (Figura 1.11) mostra la configurazione schematica del sistema, dove si osserva la presenza di un albero di trasmissione su cui lavorano il motore elettrico ed il motore endotermico separati da un dispositivo di disinnesto. Un flusso di potenza che dal motore termico raggiunge gli ausiliari dell'imbarcazione, garantisce il corretto funzionamento di tutti i dispositivi necessari alla navigazione e al controllo del battello. Sono state analizzate configurazioni con componenti di dimensioni differenti, si è fatto uso di funzioni atte al loro ridimensionamento in base alla taglia nominale scelta, permettendo di effettuare analisi anche sulla condizione ottimale di architetture uguali ma con componenti di dimensioni nominali differenti.

1.7 Configurazione serie

La configurazione serie considerata da Alberto Nicolotti [19] è caratterizzata dalla presenza di 3 motori diesel da 125 kW, una batteria litio ferro fosfato da 150 kW e due motori elettrici da 147 kW. A differenza dell'architettura precedente in

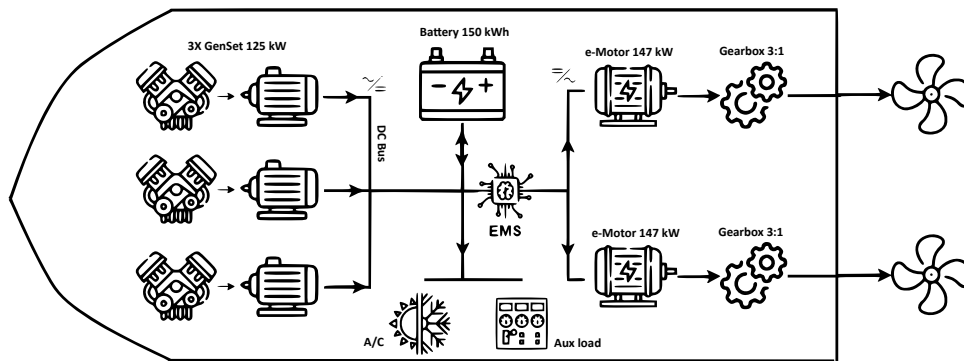


Figura 1.13: Schema configurazione serie
[19]

questa la potenza che arriva all'albero di trasmissione è completamente gestita dal motore elettrico, essendo l'unico accoppiato con il riduttore di velocità la cui uscita è collegata con l'elica. La configurazione è stata utilizzata come base di raffronto dall'architettura parallelo al fine di valutare la prestazione del nuovo sistema oggetto di studio, inoltre, ci si è avvalsi di questo modello ibrido dell'imbarcazione per effettuare l'analisi dell'ottimizzazione del pacco batteria, studiando la variazione del comportamento del sistema in funzione della sua dimensione nominale. Infine si è sviluppato un modello ECMS e successivamente A-ECMS atto alla gestione delle diversi fonti di energia, utilizzando come target la riduzione delle emissioni di HC ed NO_X .

Capitolo 2

Analisi DP configurazione ibrido parallelo

2.1 Introduzione

L'analisi della configurazione parallelo del Foraneo è stata condotta attraverso DynaProg, un toolbox Matlab open source sviluppato da Federico Miretti [21], attraverso il quale si è valutata la migliore strategia di controllo del sistema in questione. Si è definito un modello dinamico dell'imbarcazione descrivibile da un'equazione del tipo (2.1):

$$x_{k+1} = f_k(x_k, u_k) \quad k = 0, 1, N-1 \quad (2.1)$$

dove x rappresenta la variabile (o le variabili) di stato del sistema, mentre u rappresenta la variabile (o le variabili) di controllo. Il problema assume quindi una natura deterministica finita, il cui orizzonte temporale viene discretizzato in N istanti.

Il costo totale associato alla funzione assume la forma (2.2), dove la sommatoria rappresenta la somma dei costi associati ad ogni evoluzione temporale, mentre il termine $g_N(x_N)$ è strettamente legato allo stato finale del sistema.

$$J(x_0, u_0, \dots, u_{N-1}) = g_N(x_N) + \sum_{k=0}^{N-1} g(x_k, u_k) \quad (2.2)$$

L'algoritmo permette di valutare e minimizzare il costo totale associato, rendendo possibile la definizione di una sequenza di controllo ottimale (2.3).

$$J^*(x_0) = \min_{u_k, k=0, \dots, N-1} J(x_0, u_0, \dots, u_{N-1}) \quad (2.3)$$

Il costo ottimale è calcolato utilizzando il Principio di ottimalità di Richard Bellman, il problema è quindi scomposto in sottoproblemi più piccoli i quali vengono

risolti in maniera iterativa. Considerando un problema con la variabile di stato SOC $x_{vec} = \{0.6, 0.65, 0.7\}$, e la variabile di controllo $u_{vec} = \{-0.1, -0.05, 0, 0.05, 0.1\}$ definito fra uno stato iniziale A ed uno stato finale L a passi temporali unitari da 1 a N è possibile ottenere una rappresentazione grafica come in Figura 2.1. Gli archi di costo rappresentano il costo associato ad ogni transizione ammissibile fra stati consentiti del livello di carica.

Appellandosi al principio di ottimalità di Bellman:

"An optimal policy has the property that whatever the initial state and initial decision are, the remaining decisions must constitute an optimal policy with regard to the state resulting from the first decision" [22]

che definisce come i sotto problemi di una soluzione ottimale risultino anch'essi ottimali indipendentemente dalla scelta del punto iniziale, si è utilizzato un approccio backward. Percorrendo il grafico dal punto L al punto A, si analizzano le combinazioni di costo che minimizzano il costo totale associato al raggiungimento del punto iniziale, ottenendo il percorso migliore che nel caso preso in esame risulta $A-B-F-K-L$.

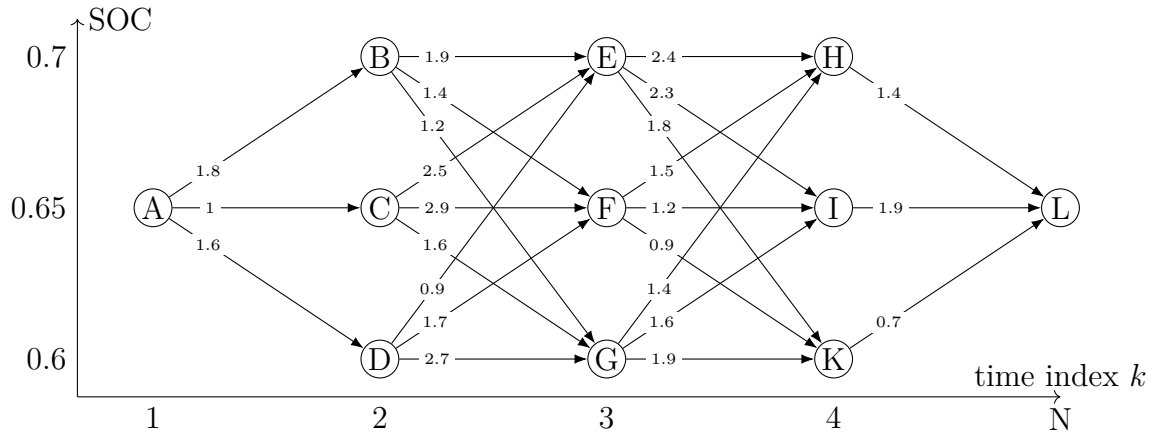


Figura 2.1: Principio di Bellman, esempio valutazione percorso migliore con archi di costo [23]

Analogamente l'algoritmo di calcolo presenta dapprima una fase di calcolo backward con cui viene calcolato il percorso migliore, il quale rappresenta la soluzione ottimale, seguito quindi da una seconda fase di analisi forward che ripercorre la combinazione delle variabili di stato precedentemente trovate generando il profilo della simulazione.

2.2 Griglia computazionale

Un passaggio preliminare alla risoluzione del nostro sistema, ma di notevole importanza, risulta la creazione della griglia di calcolo; la scelta assume rilevanza in vista della propria influenza sul tempo di esecuzione e sull'accuratezza dei risultati ottenuti. Una griglia eccessivamente fitta genera dei risultati più accurati, ma a scapito di tempi di risoluzione che aumentano in maniera non lineare portando a richieste computazionali sempre maggiori.

Per valutare la funzione associata al costo si rende necessario determinare $f_k(x_k, u_k)$ per ogni combinazione di variabile di stato e variabile di controllo, ad ogni passo si esegue un numero di iterazioni pari a:

$$N_{SV_1} \times N_{SV_2} \times \dots \times N_{SV_{NS}} \times N_{CV_1} \times N_{CV_2} \times \dots \times N_{CV_{NC}}$$

dove N_{SV_i} e N_{CV_j} sono il numero di punti della griglia computazionale rispettivamente della variabile di stato SV_i e della variabile di controllo CV_j , mentre NS e NC rappresentano il numero delle variabili di stato e di controllo.

2.2.1 Valutazione griglia computazionale

Il problema associato al Foraneo parallelo è caratterizzato da una griglia computazionale ottenuta discretizzando l'orizzonte temporale della simulazione con passi temporali pari ad un secondo, ottenendo quindi, per una simulazione del ciclo di navigazione di circa 1h, 3822 passi temporali. Al fine di valutare il corretto numero di punti costituenti la variabile di controllo (torque split) e la variabile di stato (SOC), si è condotta una analisi per mettere in evidenza la variabilità dell'accuratezza della soluzione in base alla combinazione di numero di punti analizzata. Essendo il problema caratterizzato da una sola variabile di stato e di controllo, il peso computazionale rimane contenuto sebbene si infittisca con molti punti la griglia di calcolo, generando tempi di simulazione variabili da circa 20 s a circa 4 min, crescenti con il crescere dei punti.

Data la complessità del problema associata ad una missione multi obiettivo quale quella proposta, si è scelto di effettuare 3 casi studio, al fine di valutare la variabilità dell'errore su 3 diversi obiettivi (fuel consumption, emissioni HC, emissioni NO_X); in questo modo si sono ottenuti 3 grafici caratterizzati dalla combinazione di due vettori $N_{SV} = \{200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000\}$ e $N_{CV} = \{31, 91, 151, 211, 271, 331, 391, 451, 511\}$, rispettivamente il numero di punti della variabile di stato e il numero di punti della variabile di controllo.

```
% Scelta griglia computazionale ottimizzata
soc = linspace(200,1000,((1000-200)/(100)+1));
tsplit = linspace(30,510,((510-30)/(60)+1));
tsplit=tsplit+1;
comb = combinations(soc,tsplit);
```

```

comb = table2array(comb);
for n=1:height(comb)
    n
    obiettivo_target(n)=run_boat([147*10^3 100*10^3
    150],false,"svSize",comb(n,1),"cvSize",comb(n,2));
end
combinedArray = horzcat(comb, consumo');
save("results.mat","combinedArray");

```

Listing 2.1: Codice di calcolo utilizzato per l'estrazione dell'andamento degli errori sulle combinazioni di punti create

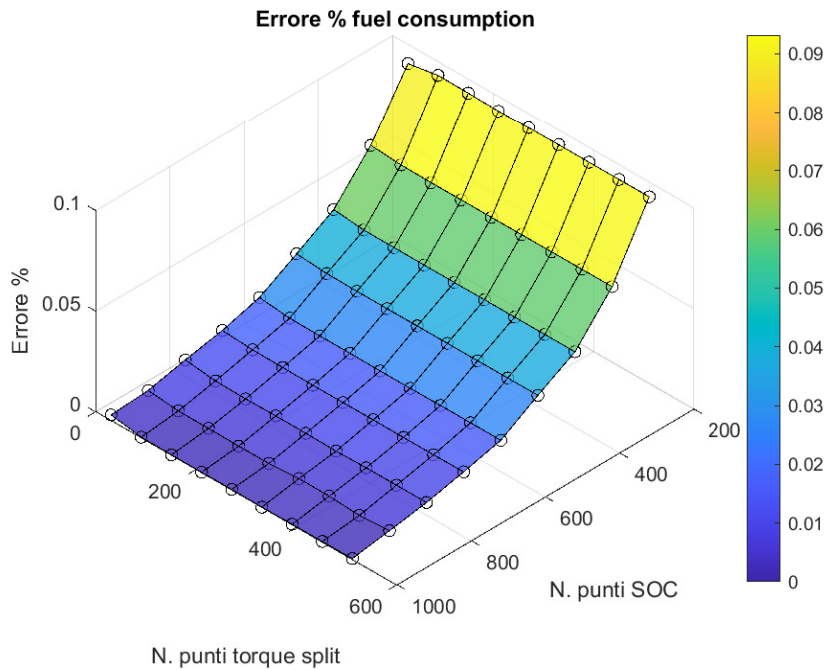


Figura 2.2: Variazione percentuale fuel consumption

Il grafico (Fig.2.2) mostra in maniera evidente come un aumento del numero di punti del SOC comporti un miglioramento della soluzione, sebbene raddoppiando i punti si ha solamente una riduzione dell'errore dello 0.05%; il range totale di variazione è comunque limitato attestandosi a valori inferiori dello 0.1%. L'andamento dell'errore ottenuto per le emissioni di NO_X (Fig.2.3), si mostra differente rispetto a quello ottenuto per la fuel consumption, difatti la variabilità della soluzione si mostra sensibile ad entrambe le variabili considerate. Il grafico ottenuto per le emissioni di HC (Fig.2.4) mostra un comportamento leggermente diverso, la soluzione ottenuta mostra una maggiore variabilità rispetto alla densità di punti della variabile di controllo, in particolare considerando pochi punti, si ottengono

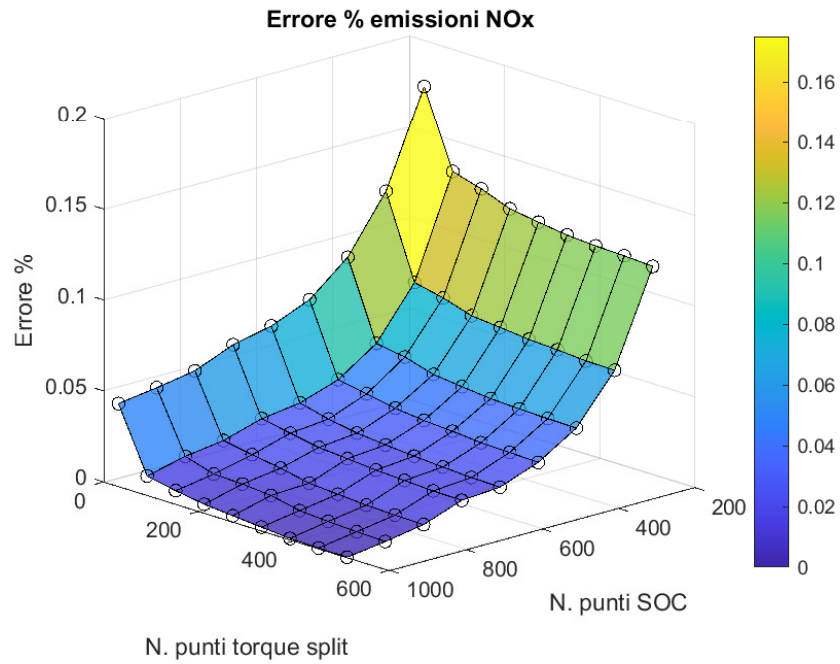


Figura 2.3: Variazione percentuale NO_x

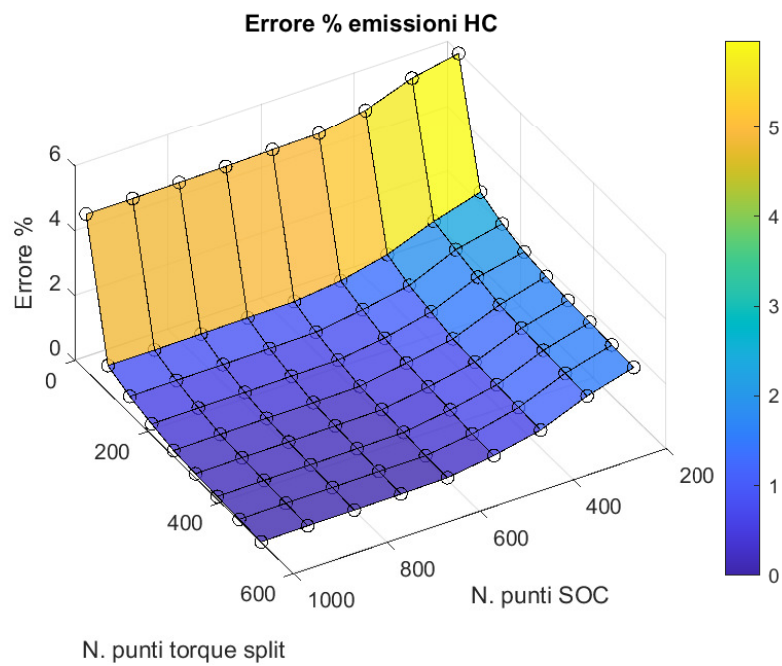


Figura 2.4: Variazione percentuale HC

dei risultati con un errore non più trascurabile (circa il 5%); ciò porta ad affermare che l'obiettivo più critico, legato alla sensibilità dell'errore rispetto alla griglia computazionale, risulta la produzione degli HC; in generale, sebbene i 3 obiettivi proposti, mostrino variabilità leggermente diverse rispetto alle due variabili, si può asserire che utilizzando griglie composte da un buon numero di punti, rispettivamente $N.T_{split} > 271$ e $N.SOC > 600$, si giunge a soluzioni che presentano degli errori percentuali inferiori all'1% in tutti i casi analizzati, aumentare di molto tali valori comporterebbe un notevole aumento del tempo di risoluzione a fronte di una riduzione dell'errore trascurabile.

2.3 Modello dinamico imbarcazione

La generazione del modello dinamico dell'imbarcazione risulta essenziale per l'implementazione del problema attraverso DynaProg; inoltre è l'elemento cardine della modellizzazione del problema proposto, in particolare, grazie alla sua risoluzione è possibile ricavare la variabile di costo istante per istante durante la definizione della strategia ottimale di controllo. Il modello conferisce un significato "fisico" al problema, la sua definizione deve essere coerente e fedele con la controparte reale, sia come sistema (qualora esista una controparte reale), sia come singolo componente costituente l'imbarcazione.

Si è reso necessario la definizione di una funzione del tipo:

```
function [x_next, stageCost, unfeas, additional outputs]
    = Foraneo_model(x, u, w, boat)
```

Listing 2.2: Sintassi funzione modello dinamico

dove i dati di input vengono rappresentati dalla variabile di stato x , la variabile di controllo u , gli input di natura esogena w ed infine la variabile struttura $boat$, dove vengono contenute le caratteristiche tecniche del battello; mentre i dati di output sono la variabile di stato all'istante successivo x_{next} , lo *StageCost* calcolato, gli *unfeas*, ovvero un vettore booleano che permette di valutare se vengono superati alcuni vincoli da noi imposti, o se si generano assurdità fisiche, ed infine una serie di output aggiuntivi con lo scopo di valutare l'andamento di alcune variabili di nostro interesse in modo specifico. Gli input di natura esogena variano ad ogni passo temporale del nostro problema, in questo caso corrispondono con i dati all'elica del ciclo di navigazione, in particolare i profili di velocità, coppia e accelerazione angolare. Il modello si basa sulla singola variabile di controllo *torque split*, in particolare il modo in cui essa viene trattata, implica, facendo una analogia con il mondo automotive, una configurazione parallelo P2, dove sull'albero di trasmissione della potenza si accoppia un motore elettrico con la presenza di una frizione fra l'EM e il motore endotermico, permettendo anche un possibile disaccoppiamento durante il funzionamento.

Si è definita quindi la variabile di controllo (2.4)

$$u = \frac{engTrq}{demTrq} \quad (2.4)$$

come il rapporto fra la coppia generata dal motore e la coppia richiesta, perciò in base al valore che assume è possibile dedurre il powerflow utilizzato:

Valore <i>Torque split</i>	Tipo di powerflow
$u = 0$	Puro elettrico
$u = 1$	Puro termico
$0 < u < 1$	Power split
$u > 1$	Ricarica batteria

Tabella 2.1: Tipologie di powerflow

Definita la variabile di controllo e la coppia richiesta (input esogeno), il modello creato, definito il valore della variabile di controllo, permette di ottenere la quota parte di coppia dei due motori, potendo quindi definire il loro punto di funzionamento. Determinato il punto di funzionamento e conoscendo le specifiche dei componenti del nostro sistema (mappe di funzionamento, geometrie, accoppiamenti, ...), è compito della funzione che modella l'imbarcazione calcolare le variabili del sistema istante per istante, verificando che tutti i vincoli siano rispettati.

```
%% Torque split
engTrq = u{1} .* demTrq ; % Nm
emShaftTrq = ( 1 - u{1} ) .* demTrq; % Nm
%% Engine
...
%% EM
...
%% Battery
...
%% Stage cost
...
%% Unfeasibilites
...
```

Listing 2.3: Struttura della funzione del modello dinamico del Foraneo

2.3.1 Definizione vincoli

Affinché il modello sia pertinente con la fisica del problema, per ogni componente si sono definiti dei vincoli, coerenti con le proprie specifiche, i quali se non rispettati causano l'attivazione della variabile *unfeas*, permettendo di segnalare la presenza dell'errore.

- *Motore endotermico*, devono essere rispettati i vincoli di coppia, minima velocità di rotazione (idle) e massimo regime di rotazione.

$$T_{eng} = uT_{req} \leq T_{eng,lim}(\omega_{eng})$$

$$\omega_{idle} \leq \omega_{eng} \leq \omega_{max}$$

- *Motore elettrico*, in modo analogo al motore endotermico devono essere rispettati i vincoli di coppia e velocità di rotazione, trattandosi di un motogeneratore il valore della coppia minima risulta negativo e rappresenta la massima coppia resistente che l'EM è in grado di generare.

$$T_{EM,gen,lim} \leq T_{EM} \leq T_{EM,mot,lim}$$

$$0 \leq \omega_{EM} \leq \omega_{max}$$

- *Pacco batteria*, deve essere rispettato il vincolo sulla massima corrente di scarica della batteria e la massima potenza di carica, inoltre per scongiurare il rischio di failure del componente si manterrà il livello di *SOC* all'interno di un range 0.4% – 0.8%, imponendo la discretizzazione della variabile entro tali limiti.

$$I_{batt} \geq I_{batt,charge,limit}$$

$$P_{batt} \leq P_{batt,max}$$

2.4 Risoluzione sistema e valutazione combinazione motori

Sulla base delle precedenti considerazioni, si è scelto di utilizzare una griglia computazionale con 800 punti per la variabile di stato e 301 punti per la variabile di controllo, inoltre si è posta una deviazione massima del *SOC* rispetto alla condizione $x_{iniziale} = x_{finale}$ (condizione charge sustaining) pari a 0.01.

La fase di set up è contraddistinta dalla discretizzazione delle variabili di stato e di controllo, la generazione dei punti all'interno della variabile *torquesplit* è stata oculata in modo tale da prendere in considerazione il valore $u = 1$, l'assenza di tale

valore comporterebbe un'impossibilità da parte di DynaProg di valutare la condizione per cui la richiesta di coppia è pienamente soddisfatta da parte del motore termico (Tab.2.1). Il limite destro della variabile di controllo non è definito a priori, a seguito di diverse prove, si è rivelato sufficiente porre $u_{max} = 3$. Osservando la Figura 2.5 è possibile osservare come solamente alcuni punti compresi fra gli istanti temporali $t = 2000$ s e $t = 2500$ s risultano limitati dal valore massimo imposto, estendere il limite della variabile ha un effetto trascurabile al fine del funzionamento della simulazione, ma richiede un maggiore numero di punti se si vuole mantenere la densità della griglia di calcolo costante, generando tempi di esecuzione più lunghi. A seguito della definizione degli input esogeni e della discretizzazione temporale del problema, richiamando il modello precedentemente descritto è possibile creare l'oggetto *prob* e generare la risoluzione del sistema.

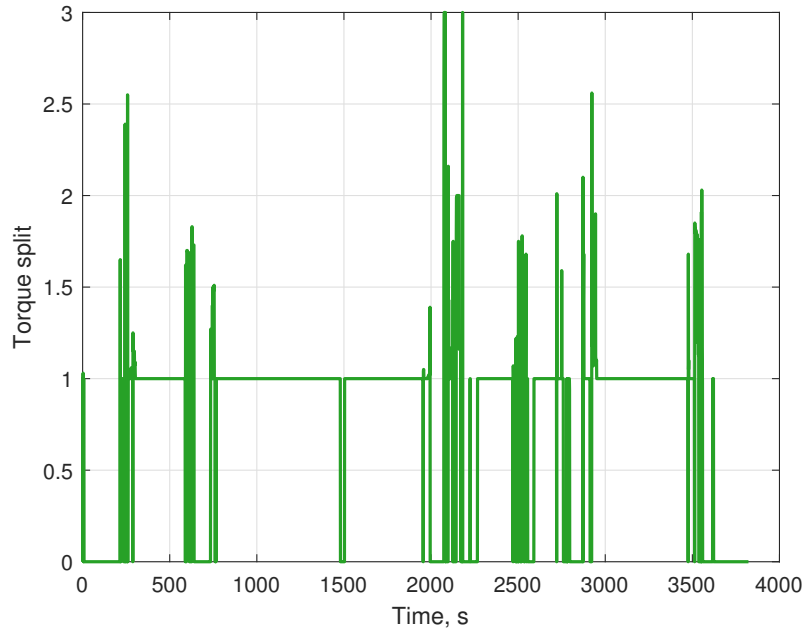


Figura 2.5: Profilo *Torque split* durante la simulazione con $u_{max} = 3$

```
%% Set up DynaProg
% State variable grid
SVnames = {'SOC'};
x_grid = {linspace(0.4, 0.8, opts.svSize)};

% Initial state
x_init = {0.6};
% Final state constraints
x_final = {[0.6 (0.6 + opts.psiTol)]]};
```

```

% Control variable grid
CVnames{1} = 'Torque split';
u1_grid = linspace(0, 3, opts.cvSize);
u_grid = {u1_grid};
dt = 1;

% Create exogenous input
w{1} = boat.mis.propData.propTrq;
w{2} = boat.mis.propData.propSpd;
w{3} = boat.mis.propData.boatSpeed;
w{4} = [0; diff(boat.mis.propData.propSpd)/dt];

% Number of stages (time intervals)
Nint = length(w{1});

% Function handle dynamic model
fun=@(x, u, w)Foraneo_model(x, u, w, boat);

% Create DynaProg object
prob = DynaProg(x_grid, x_init, x_final, u_grid, Nint,
    fun, 'ExogenousInput', w, 'StateName', SVnames, '
    ControlName', CVnames);

%% Solve
% Solve the problem
prob = run(prob);

```

Listing 2.4: Fase di set up di DynaProg e risoluzione del problema

Nella configurazione in parallelo la potenza installa sull'albero risulta la somma della potenza generata dal motore termico e quella generata dal motore elettrico, quindi ad una data potenza nominale sull'albero corrispondono diverse possibili combinazioni di motori. A fronte dell'ultima considerazione è opportuno verificare come al variare della combinazione si modifica la prestazione del battello in configurazione parallelo, in termini di emissioni di NOx, HC e consumo di carburante. In modo analogo a quanto fatto durante la valutazione della griglia computazione, si è proceduto alla definizione di due vettori contenenti le potenze nominali, $Taglia_{EM} = \{40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200\}kW$ e $Taglia_{eng} = \{140, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280, 300\}kW$, generando la loro combinazione è stato possibile costruire la griglia di valutazione.

Durante il caricamento dei dati, avendo a disposizione i dati del motore endotermico FTP-N67 da 125 kW e quelli del motore elettrico AS-147 da 147 kW si è reso

necessario effettuare un ridimensionamento delle caratteristiche importante coerentemente con le varie potenze nominali simulate. A tale scopo sono state definite due funzioni di ridimensionamento, attraverso le quali, in base alla potenza nominale inserita, tutte le mappe e le caratteristiche tecniche del motore vengono ricalcolate permettendo l'esecuzione della simulazione.

Anche la batteria contribuisce alla modifica dei risultati ottenuti, una variazione delle sue specifiche comporta una variazione della configurazione del sistema che si riflette sul profilo della simulazione; nell'analisi condotta la batteria si è considerata uguale a quella attualmente installata sulla configurazione serie del Foraneo, in modo da eliminare la sua influenza e valutare correttamente la sola variabilità introdotta dalla combinazione dei motori, esprimendo i dati ottenuti come variazione percentuale relativa al miglior risultato raggiunto. Osservando i risultati ottenuti in

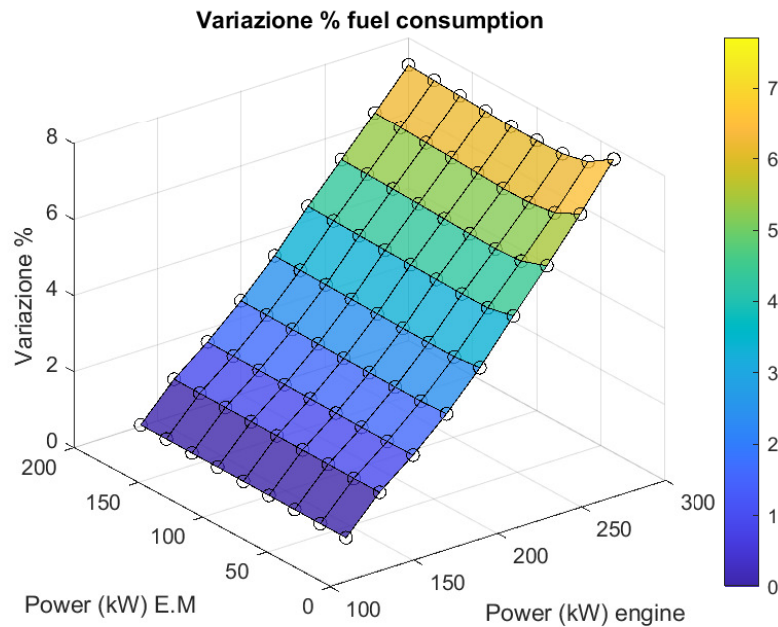


Figura 2.6: Variazione fuel consumption in funzione della combinazione delle taglie motori

merito al consumo di carburante (Figura 2.6) è possibile dedurre come il consumo dipenda in modo marcato solamente dalla taglia del motore termico e si mantiene pressoché costante rispetto alla variazione di potenza del motore elettrico. Aumentando la taglia del motore si aumenta il consumo di carburante, comprovato dal fatto che aumentando la potenza nominale, le curve di consumo specifico si spostano verso l'alto, se i punti di funzionamento si mantengono costanti, si trovano su curve a consumo specifico maggiore. Nonostante ciò sebbene si raddoppi la potenza in gioco, il consumo rimane contenuto in un aumento percentuale relativo dell'8%.

Dal punto di vista emissivo, la produzione degli HC (Figura 2.7) beneficia di un aumento della potenza nominale dell'EM; si può affermare che al di sopra di una determinata potenza non si hanno più miglioramenti in termini di riduzione degli HC indipendentemente dalla taglia del motore endotermico. Su potenze del motore elettrico più contenute, ha un certo peso anche la taglia del motore termico, in questo caso la scelta di un motore con minor potenza nominale comporta un miglior risultato. In questo caso la differenza degli HC prodotti varia in un range piuttosto ampio arrivando in alcuni casi a più che dimezzare l'emissione dell'inquinante. Il grafico degli NO_X prodotti (Figura 2.8) assume una forma piuttosto complessa, evidenziando una maggiore sensibilità alla variazione della taglia del motore termico rispetto a quella dell'EM, inoltre data la forma convessa della curva, è possibile evidenziare la presenza di un punto di ottimo, il quale permette di ottenere la migliore prestazione sulla riduzione degli NO_X , in maniera pressoché indipendente alla scelta del motore elettrico.

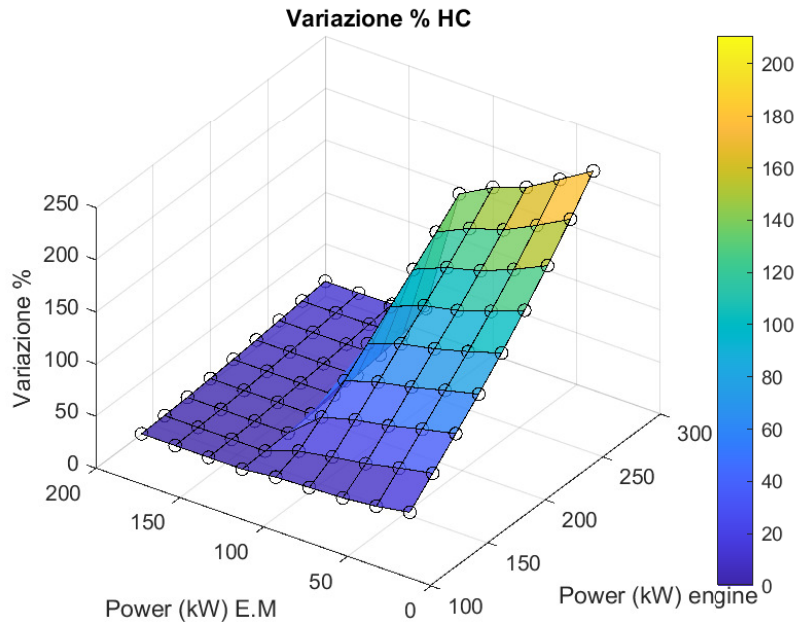


Figura 2.7: Variazione produzione HC in funzione della combinazione delle taglie motori

In conclusione, analizzando i risultati ottenuti in questi 3 casi studio, gli HC emessi mostrano la maggiore variabilità del risultato ottenuto, richiedendo l'installazione di un EM con una potenza nominale piuttosto alta (comparabile con quella termica installata sulla configurazione convenzionale). Volendo scegliere una soluzione che permetta il miglioramento simultaneo degli obiettivi proposti, sulla base dei grafici ottenuti, è evidente che bisogna optare per una soluzione la cui potenza nominale

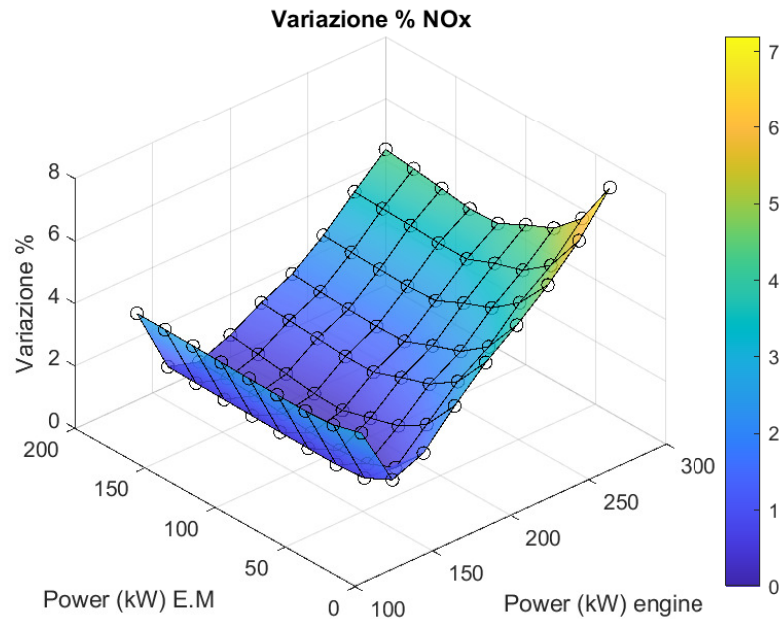


Figura 2.8: Variazione produzione NO_x in funzione della combinazione delle taglie motori

totale installata sul singolo albero risulta notevolmente maggiore di quella installata nel battello convenzionale (147 kW), come si mostrerà in seguito, questa risulta essere una prerogativa di questo tipo di configurazione (configurazione parallelo).

2.5 Scelta della configurazione parallelo e confronto risultati ottenuti

La scelta della configurazione indicata, per il confronto con il Foraneo serie, ha generato alcune difficoltà, poiché, al fine di rendere equo il confronto, bisogna imporre un'uguaglianza sui parametri caratterizzanti il battello. Data la grande diversità fra le due configurazioni, risulta sbagliato e fuorviante effettuare un confronto a parità di potenza generata dai motori termici/elettrici oppure complessiva, poiché la potenza stessa, in base alla configurazione scelta, assume significati differenti (sul modello in parallelo si ha la somma delle potenze concorrenti sullo stesso albero, mentre nel modello in serie la potenza termica risulta disaccoppiata da quella elettrica data la presenza della batteria interposta). Per dare significato al confronto, si è deciso di prendere in esame due diverse configurazioni:

1. Motore endotermico da 125 kW e motore elettrico da 40 kW.

2. Motore endotermico da 147 kW e motore elettrico da 40 kW.

Per la prima configurazione si è scelto di porre la potenza installata sul singolo albero uguale, con il vincolo di utilizzare una taglia di un motore esistente, ottenendo una potenza totale di 165 kW. La seconda configurazione è stata scelta in modo da affiancare al motore attualmente in uso nel battello convenzionale, un motore elettrico, in questo modo si aumenta la potenza installata, allo stesso tempo, in base alle considerazioni fatte sulla valutazione delle taglie dei motori, ci si sposta in una condizione favorevole a questo tipo di configurazione.

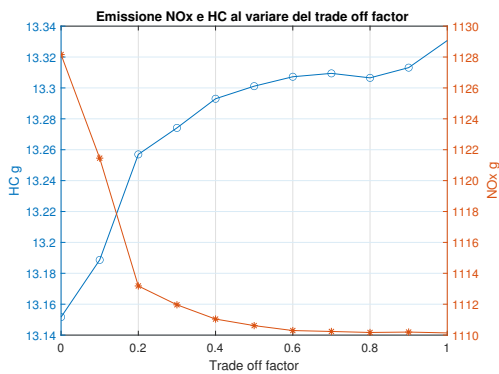
Il target prefissato è l'abbattimento delle emissioni di inquinanti, il che conduce ad una analisi multi obiettivo, nello specifico, tramite l'utilizzo di un fattore di calibrazione, si è valutata una strategia di controllo ottimale che permettesse la riduzione simultanea degli NO_X e degli HC, definendo lo *stage cost* come:

$$stagecost = \mu \frac{NOx}{NOx_{max}} + (1 - \mu) \frac{HC}{HC_{max}} \quad (2.5)$$

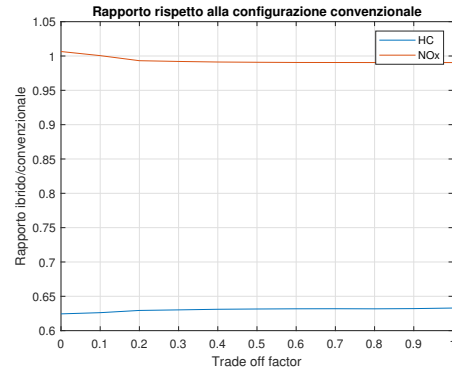
Il trade off factor μ varia fra 0 ed 1, attraverso il proprio valore è possibile conferire maggiore importanza alla riduzione della produzione di NO_X , a scapito dell'emissione degli HC, e viceversa. Analizzando l'equazione (2.5), quando $\mu = 1$ si giunge ad una analisi mono obiettivo incentrata sulla sola emissione NO_X , mentre quando $\mu = 0$, si genera un'analisi il cui unico scopo è la riduzione degli HC.

2.5.1 Configurazione 125-40

La calibrazione del trade off factor per questo tipo di architettura, ha mostrato una ridotta (se non nulla) influenza del fattore di calibrazione sull'emissione degli in-



(a) Variazione emissioni NO_X e HC in funzione di μ



(b) Variazione relativa al battello convenzionale delle emissioni di NO_X e HC in funzione di μ

Figura 2.9: Emissioni assolute e relative rispetto al battello convenzionale

quinanti. Sebbene in termini assoluti sui grammi di inquinanti prodotti (Fig.2.9a), l'andamento risulti in linea con quanto affermato in precedenza, la variabilità risulta così ridotta che se si rapportano i risultati con, ad esempio, il Foraneo convenzionale, si ottiene un grafico come quello mostrato in Fig.2.9b, che rende evidente l'assenza di variabilità.

Dal punto di vista emissivo non si apporta alcun tipo di miglioramento sugli NO_X il cui rapporto rasenta l'unità anche in presenza di $\mu = 1$, mentre valutando la produzione degli HC si ottiene una buona performance che si attesta in una riduzione di circa il 40%.

μ	HC g/h ibrido parallelo	NO_X g/h ibrido parallelo	Var.% HC convenzionale	Var.% NO_X convenzionale
0	12,77	1095,30	-37,55%	0,73%
0,1	12,80	1088,79	-37,38%	0,13%
0,2	12,87	1080,76	-37,05%	-0,61%
0,3	12,89	1079,57	-36,97%	-0,72%
0,4	12,91	1078,68	-36,88%	-0,80%
0,5	12,91	1078,27	-36,84%	-0,84%
0,6	12,92	1077,96	-36,81%	-0,87%
0,7	12,92	1077,90	-36,80%	-0,87%
0,8	12,92	1077,84	-36,82%	-0,88%
0,9	12,93	1077,86	-36,78%	-0,88%
1	12,94	1077,81	-36,70%	-0,88%

Tabella 2.2: Confronto emissioni ibrido parallelo e convenzionale

Volendo fare un confronto fra le 3 configurazioni, ibrido serie, ibrido parallelo e convenzionale si ottengono le tabelle 2.2 e 2.3. Particolarmente interessante risulta la tabella di confronto con l'architettura ibrida serie (2.3); la variazione data ai termini percentuali è generata essenzialmente dal contributo della configurazione serie, che in questo caso si mostra ampiamente più sensibile a μ , dimostrando una maggiore flessibilità del sistema.

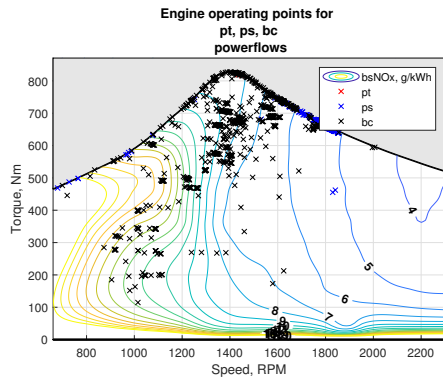
Mostrando i punti di funzionamento durante la missione nel caso in cui $\mu = 0$ e nel caso in cui $\mu = 1$ è possibile osservare come il funzionamento del sistema risulti pressoché lo stesso, non essendo in grado di sostenere variazioni di funzionamento dovute al cambiamento dell'obiettivo della missione. Tale atteggiamento "rigido" del sistema è imputabile al fatto che quando il battello viaggia a velocità di crociera il requisito di potenza (Fig.2.10d) risulta simile alla potenza nominale del battello (147 kW), essendo la nostra configurazione caratterizzata da un motore endotermico di 125 kW durante queste fasi del viaggio, il battello in configurazione 125-40 al

fine di generare la potenza richiesta, deve utilizzare contemporaneamente il motore elettrico ed il motore endotermico. Questa considerazione, associata all'obiettivo charge sustaining, porta a vincolare i restanti punti del sistema, dove, quando possibile, si effettua la ricarica della batteria; il risultato generale è un comportamento della configurazione che rimane invariato in base allo *StageCost* prefissato.

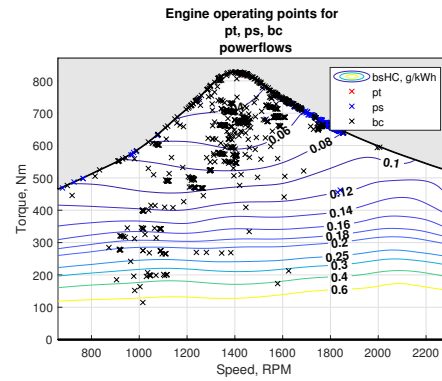
μ	HC g/h ibrido parallelo	NO_X g/h ibrido parallelo	Var.% HC ibrido serie	Var.% NO_X ibrido serie
0	12,77	1095,30	72,55%	-47,44%
0,1	12,80	1088,79	40,71%	-18,08%
0,2	12,87	1080,76	31,34%	-11,82%
0,3	12,89	1079,57	-25,07%	47,42%
0,4	12,91	1078,68	-25,83%	48,07%
0,5	12,91	1078,27	-28,26%	53,16%
0,6	12,92	1077,96	-30,91%	56,57%
0,7	12,92	1077,90	-31,27%	56,42%
0,8	12,92	1077,84	-31,65%	56,59%
0,9	12,93	1077,86	-35,37%	57,26%
1	12,94	1077,81	-38,95%	57,39%

Tabella 2.3: Confronto emissioni configurazione parallelo e serie

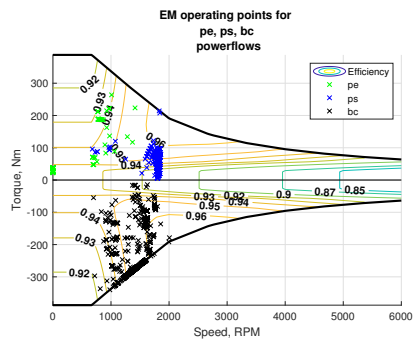
A conferma del fatto che il motore risulta vincolato a lavorare assistito dal motore elettrico, analizzando le tipologie di powerflow durante la simulazione, si può notare come manchi la presenza della condizione $u = 1$ definita pure thermal "pt", situazione in cui il requisito di coppia è pienamente soddisfatto dal motore termico; osservando i punti di funzionamento si rende evidente come la configurazione in esame "rimbalzi" dalla condizione di power split, causata dal deficit di potenza del motore termico, alla condizione di ricarica della batteria $u > 1$, al fine di mantenere il livello di carica della batteria costante fra l'inizio e la fine della simulazione.



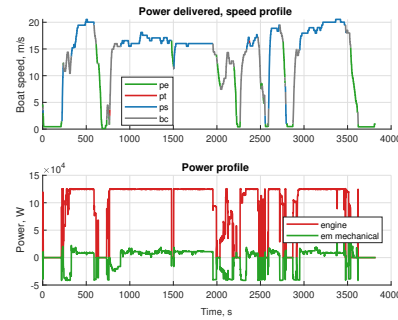
(a) Punti di funzionamento, grafico emissione specifica NOx



(b) Punti di funzionamento, grafico emissione specifica HC

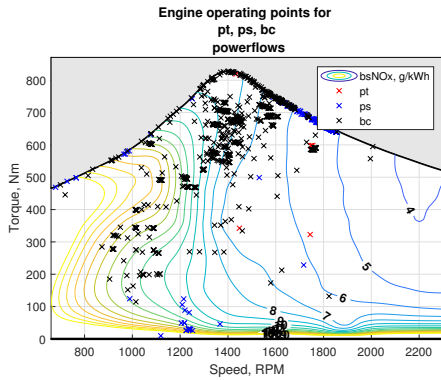


(c) Punti di funzionamento motore elettrico

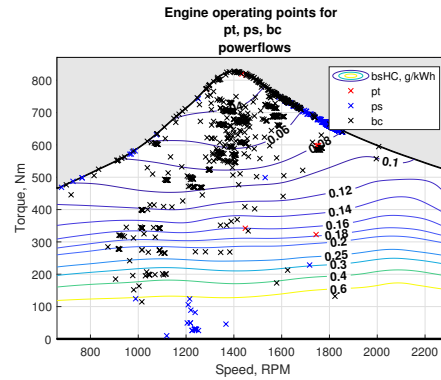


(d) Potenza generata sul profilo di velocità del battello, potenza generata dal motore elettrico e termico

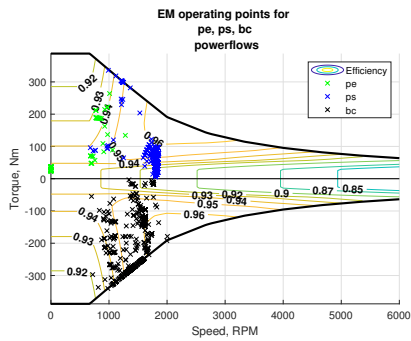
Figura 2.10: Configurazione 125-40 con $\mu = 0$



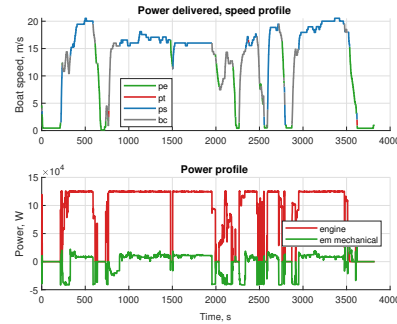
(a) Punti di funzionamento, grafico emissione specifica NOx



(b) Punti di funzionamento, grafico emissione specifica HC



(c) Punti di funzionamento motore elettrico

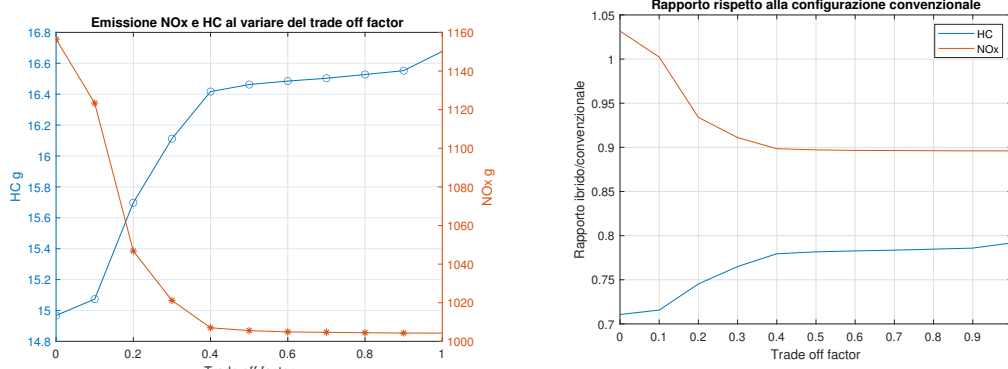


(d) Potenza generata sul profilo di velocità del battello, potenza generata dal motore elettrico e termico

Figura 2.11: Configurazione 125-40 con $\mu = 1$

2.5.2 Configurazione 147-40

Questa architettura è caratterizzata dalla presenza di un motore termico di potenza nominale pari a quello correntemente installato sul Foraneo convenzionale, con l'aggiunta di un motore elettrico da 40 kW. La calibrazione del trade off factor, ha portato, in termini generali, ad un risultato peggiore sugli HC prodotti, mentre ad un miglioramento delle emissioni di NO_X . A differenza del caso precedente,



(a) Variazione emissioni NO_X e HC in funzione di μ

(b) Variazione relativa al battello convenzionale delle emissioni di NO_X e HC in funzione di μ

Figura 2.12: Emissioni assolute e relative rispetto al battello convenzionale

ora è possibile osservare una dipendenza più marcata al variare del fattore di calibrazione, sebbene l'ampiezza di variazione si mantenga più contenuta rispetto alla configurazione ibrida serie.

Confrontando i risultati ottenuti con il Foraneo parallelo e la configurazione precedente (Tabella 2.4), è possibile osservare una maggiore ampiezza delle variazioni percentuali, in un range che si attesta di circa l'8% per gli HC e il 13% per gli NO_X , in particolare, rispetto al caso 125-40, si ha sempre una maggiore emissione di HC, ma in alcuni casi, si ha una riduzione delle emissioni di NO_X di poco più del 9%. Ponendo un confronto fra la configurazione 147-40 e quella ibrido serie (Tabella 2.5), è possibile notare che generalmente la configurazione in parallelo ottiene risultati migliori sulla emissione degli HC, miglioramenti che risultano comunque inferiori all'aumento della produzione degli NO_X , il cui divario rimane di circa il 40% a favore della configurazione serie. I punti di funzionamento e il profilo della potenza durante la missione negli estremi del caso studio $\mu = 0$ e $\mu = 1$ (Figura 2.13 e Figura 2.14), mostrano in modo evidente l'aumento della flessibilità dato dall'aumento della potenza del motore endotermico, si constata che in base all'obiettivo proposto, il sistema muta il proprio funzionamento, al fine di assolvere in modo ottimale la propria missione.

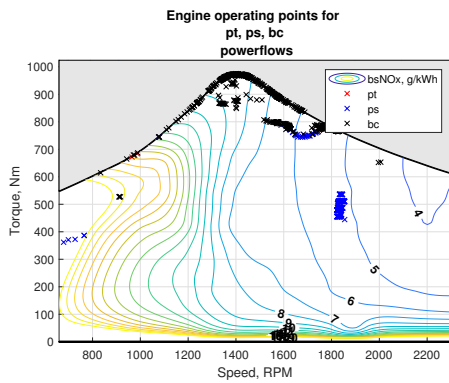
μ	HC g/h ibrido parallelo	NO_X g/h ibrido parallelo	Var.% HC conven- zionale	Var.% NO_X conven- zionale	Var.% HC Config.125- 40	Var.% NO_X Config.125- 40
0	14,53	1122,79	-28,94%	3,18%	13,81%	2,51%
0,1	14,63	1090,65	-28,43%	0,22%	14,29%	0,17%
0,2	15,24	1016,28	-25,47%	-6,61%	18,41%	-5,97%
0,3	15,64	991,44	-23,50%	-8,89%	21,38%	-8,16%
0,4	15,94	977,70	-22,06%	-10,15%	23,50%	-9,36%
0,5	15,98	976,28	-21,84%	-10,29%	23,77%	-9,46%
0,6	16,00	975,62	-21,73%	-10,35%	23,88%	-9,49%
0,7	16,02	975,43	-21,65%	-10,36%	23,99%	-9,51%
0,8	16,05	975,20	-21,53%	-10,38%	24,21%	-9,52%
0,9	16,07	975,05	-21,41%	-10,40%	24,33%	-9,54%
1	16,19	975,02	-20,82%	-10,40%	25,10%	-9,54%

Tabella 2.4: Confronto emissioni con il battello convenzionale e la configurazione ibrido parallelo 125-40

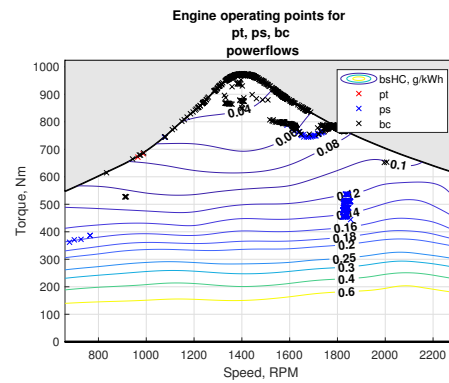
I punti di funzionamento si spostano lungo curve ad emissione specifica più bassa in base al target imposto, inoltre, si può assistere alla comparsa del powerflow in solo termico, siccome in questa configurazione durante la velocità di crociera, il motore non è vincolato a cooperare con quello elettrico al fine di raggiungere la potenza richiesta.

μ	HC g/h ibrido parallelo	NO_X g/h ibrido parallelo	Var.% HC ibrido serie	Var.% NO_X ibrido serie
0	14,53	1122,79	96,38%	-46,12%
0,1	14,63	1090,65	60,82%	-17,94%
0,2	15,24	1016,28	55,51%	-17,08%
0,3	15,64	991,44	-9,05%	35,39%
0,4	15,94	977,70	-8,40%	34,21%
0,5	15,98	976,28	-11,21%	38,68%
0,6	16,00	975,62	-14,41%	41,70%
0,7	16,02	975,43	-14,77%	41,55%
0,8	16,05	975,20	-15,10%	41,68%
0,9	16,07	975,05	-19,65%	42,26%
1	16,19	975,02	-23,63%	42,38%

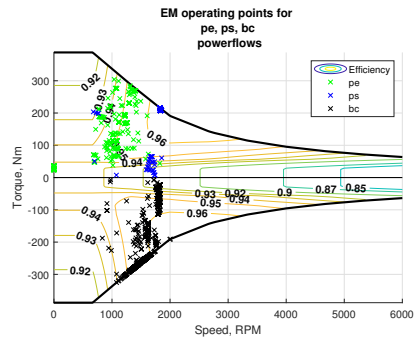
Tabella 2.5: Confronto emissioni con il battello in configurazione ibrido serie



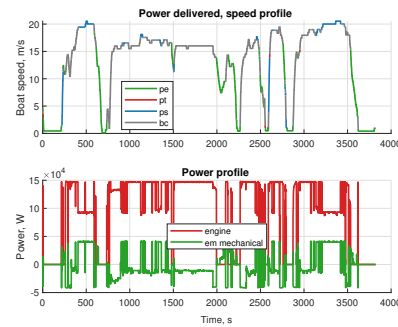
(a) Punti di funzionamento, grafico emissione specifica NO_X



(b) Punti di funzionamento, grafico emissione specifica HC

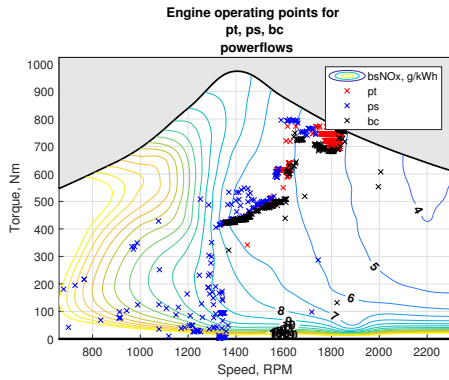


(c) Punti di funzionamento motore elettrico

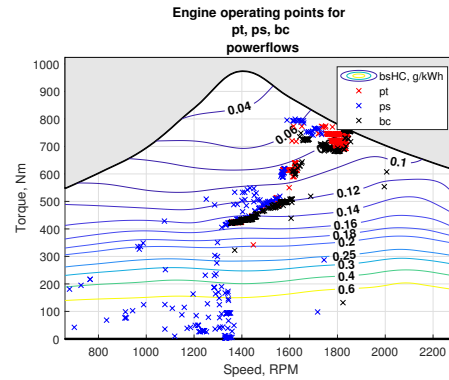


(d) Potenza generata sul profilo di velocità del battello, potenza generata dal motore elettrico e termico

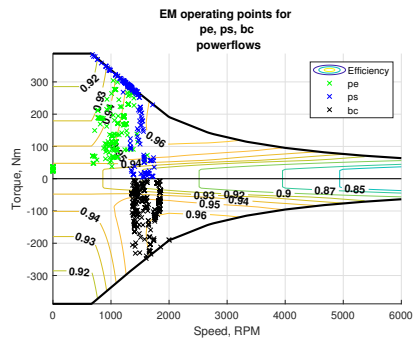
Figura 2.13: Configurazione 147-40 con $\mu = 0$



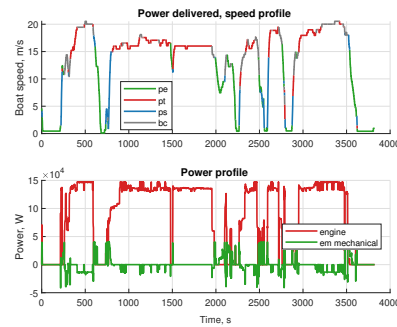
(a) Punti di funzionamento, grafico emissione specifica NOx



(b) Punti di funzionamento, grafico emissione specifica HC



(c) Punti di funzionamento motore elettrico



(d) Potenza generata sul profilo di velocità del battello, potenza generata dal motore elettrico e termico

Figura 2.14: Configurazione 147-40 con $\mu = 1$

2.6 Considerazioni configurazione parallelo e applicabilità in base al ciclo di navigazione

Le due configurazioni in parallelo analizzate si dimostrano entrambe migliori dal punto di vista emissivo rispetto al Foraneo convenzionale; i risultati ottenuti, di natura analitica, derivano dall'utilizzo di mappe di funzionamento di motori diesel più moderni rispetto a quelli correntemente installati sul convenzionale, il che fa presumere che i grammi di inquinanti prodotti siano lievemente maggiori rispetto a quelli stimati, aumentando il divario rispetto alle configurazioni ibride. I dati ottenuti per mezzo di DynaProg, sono rappresentativi di una strategia di controllo ottimale applicata ad un ciclo di navigazione noto, di conseguenza, in presenza di profili di navigazione differenti, causati da variabilità quali le maree e le correnti che discostano la missione da quella analizzata, potrebbero perdere di significato. L'analisi condotta sulle configurazioni in parallelo, dimostra come questo tipo di architettura, al fine di funzionare in modo flessibile accogliendo le richieste da noi imposte, richiede di aumentare la potenza installata rispetto al caso convenzionale, in particolare l'idea che accompagna questo tipo di configurazione è di fornire una assistenza elettrica al motore convenzionale, permettendo quindi di eliminare zone di funzionamento a basso rendimento e caratterizzate dall'emissione di più inquinanti. Diminuire la potenza del motore endotermico, come nel primo caso studio, porta con sé anche un certo rischio collegato all'applicazione reale del modello; qualora si verificassero anomalie rispetto alla missione analizzata risulterebbe collegato il rischio che il battello non porti a compimento la navigazione, se non in un regime di guasto. Riducendo il confronto fra la seconda architettura e il modello ibrido serie, si può affermare che dal punto di vista emissivo la configurazione in parallelo ha una performance generalmente peggiore. Nella configurazione in parallelo, per valori del trade off factor variabili fra 0.7-0.9, si riesce a ridurre fino a circa il 20% la produzione degli HC a fronte di un aumento di circa il 40% dell'emissione degli NO_X rispetto alla configurazione serie. Va ricordato, inoltre, che la potenza meccanica dovuta al solo contributo dei motori endotermici installata nella configurazione analizzata, risulta piuttosto più piccola di quella del modello serie, in particolare $294 < 375$ kW, il che rende il confronto meno equo.

Considerando il ciclo di navigazione caratteristico della tratta F.nove-Treporti, il quale presenta diversi tratti a velocità di crociera con requisito di potenza prossimo al nominale, la configurazione in parallelo non si dimostra adatta, quantomeno risulta più inquinante, rispetto alla configurazione serie, inoltre quest'ultima accoglie meglio i requisiti che ACTV vuole per le proprie imbarcazioni, dimostrandosi più flessibile e permettendo, ad esempio, l'allontanamento dell'imbarcazione e l'attracco utilizzando i soli motori elettrici, al fine di ridurre anche l'inquinamento acustico nei pressi delle aree più affollate.

Capitolo 3

Design ottimale del pacco batteria nella configurazione ibrida serie

3.1 Introduzione

All'interno delle configurazioni ibride la batteria assume una notevole importanza, una variazione della dimensione può causare comportamenti diversi del sistema durante la missione, per questo motivo si è scelto di analizzare come una riduzione del numero di celle della batteria potesse influire sul sistema ibrido serie (quello utilizzato come base di confronto per i risultati ottenuti con la configurazione ibrido parallelo), ponendo particolare attenzione alla variazione di inquinanti prodotti.

3.2 Valutazione numero ottimale di celle

La configurazione serie presa in esame prevede l'utilizzo di una batteria $LiFePO_4$, la quale a seguito di una analisi preliminare, presenta una capacità di 150 kWh, corrispondenti a 6 pacchi batteria ognuno della capacità di 25 kWh. Tale capacità se paragonata ad altre imbarcazioni ibride di pari dimensioni risulta generalmente più grande, motivo per il quale si è stati spinti a fare una ottimizzazione della capacità della batteria.

La simulazione del ciclo di navigazione ottimale è stata ottenuta per mezzo di *DynaProg* utilizzando una opportuna funzione di scale della batteria che ha permesso di ridimensionare la batteria sulla base della capacità imposta. Si è proceduto discretizzando l'intervallo da 25 a 150 in passi da 25, percorrendo decrementi multipli di 25 si è potuto valutare il comportamento del sistema alla rimozione di una cella

alla volta, partendo da 6 ed arrivando al caso limite di una sola cella da 25 kWh. Rimanendo attinenti alle specifiche del produttore delle batterie, si è scelto di utilizzare per la ricarica un valore di C-rate pari ad 1C mentre per la scarica un valore pari ad 1.3C, tali vincoli risulteranno particolarmente determinanti in presenza di un pacco batteria dalla capacità particolarmente ridotta.

L'analisi è stata condotta per ogni valore del trade off factor, ciò ha richiesto l'esecuzione di 11 simulazioni per ogni dimensione della batteria, generando una notevole quantità di dati; per tale motivo spesso si effettueranno considerazioni generali, talvolta fissando un determinato fattore di calibrazione al fine di un confronto puntuale.

3.2.1 Variazione inquinanti prodotti in funzione del numero di celle

Ponendo particolare riguardo agli estremi delle simulazioni effettuate (corrispondenti al caso con 6 celle ed al caso con una sola cella), si ottiene il Grafico 3.1 dove si evidenzia come una riduzione della dimensione della batteria comporta generalmente un aumento nella produzione di NO_x e HC. Volendo effettuare un confronto

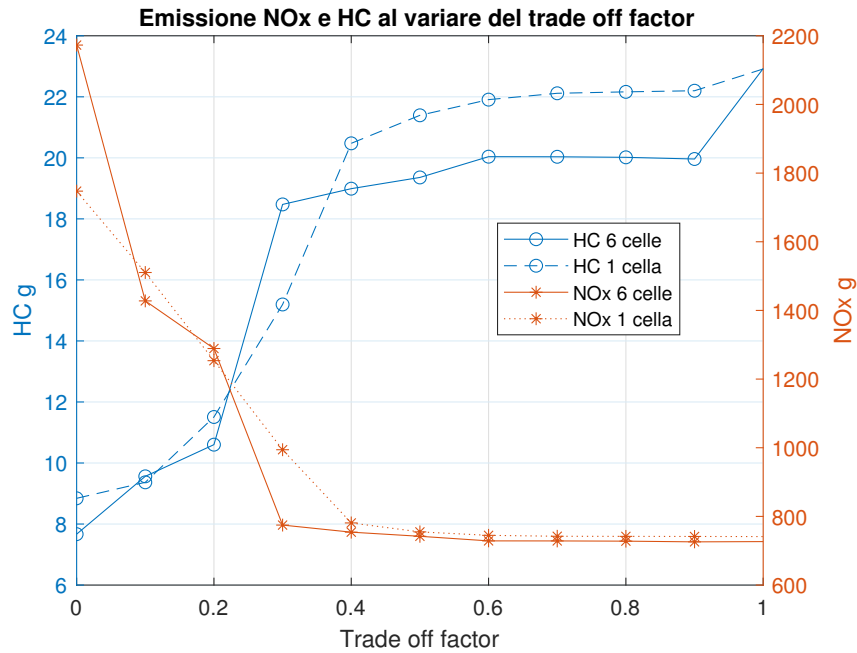


Figura 3.1: Confronto emissioni inquinanti durante la missione al variare del trade off factor

in modo mirato sui due inquinanti si è proceduto valutando la variazione relativa

percentuale rispetto al caso con 6 celle di tutte le taglie della batteria, osservando come ogni step di ridimensionamento della capacità influisse la produzione di inquinanti. Ad eccezione del primo punto iniziale le curve della Figura 3.2a risultano pressoché uguali fino ad una riduzione della batteria corrispondente a 75 kWh, diminuendo ulteriormente la sua dimensione si osserva un notevole aumento sulla produzione degli HC che raggiunge valori anche dell'ordine del +10%. Comparando i dati con quelli ottenuti per gli NO_X (Figura 3.2b) si evidenzia una minore sensibilità alla riduzione della dimensione nominale, nonostante ciò si osserva un

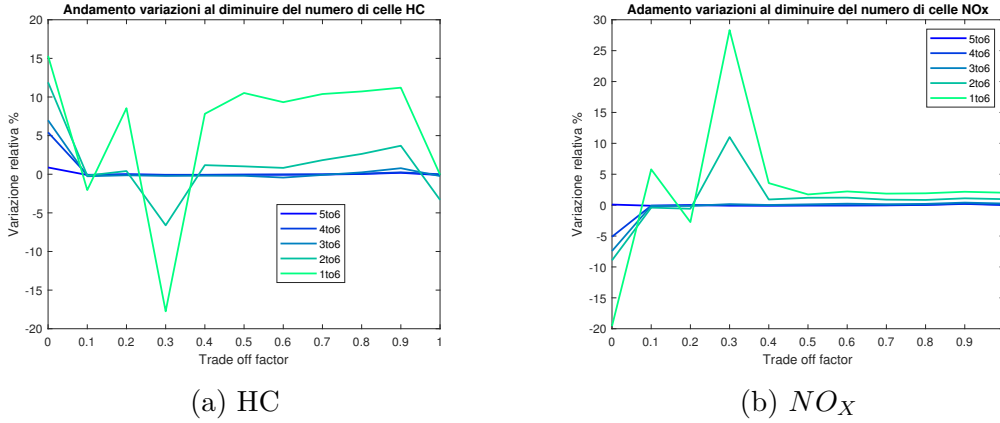


Figura 3.2: Variazione relativa percentuale al variare del trade off factor parametrizzata rispetto al numero di celle della batteria

picco sulla produzione di NO_X per un valore di trade off factor pari a 0.3 (riferito al caso limite, corrispondente ad una capacità di 25 kWh) che supera il 25%, il quale vanifica il miglioramento a cui si assisteva sulla produzione degli HC.

3.2.2 Analisi dei parametri della batteria in funzione del numero di celle

Analizzando il comportamento del SOC durante la missione (Figura 3.3), parametrizzando quindi le curve un funzione del fattore di trade off, si è reso evidente come al diminuire della capacità della batteria, il sistema si dimostra più "rigido", ovvero si ha sempre una minore adattabilità in base alla missione fissata, che sia la riduzione degli NO_X oppure degli HC. Espressione di questo comportamento possiamo dedurlo osservando il grafico riguardante la batteria di capacità nominale più piccola; l'andamento del SOC ricalca la medesima forma sebbene vengano variati gli obbiettivi della missione. Un altro aspetto rilevante risultano le implicazioni che una batteria più piccola comporta al sistema; la riduzione di questo buffer di energia provoca un andamento del SOC più altalenante con valori di fluttuazioni

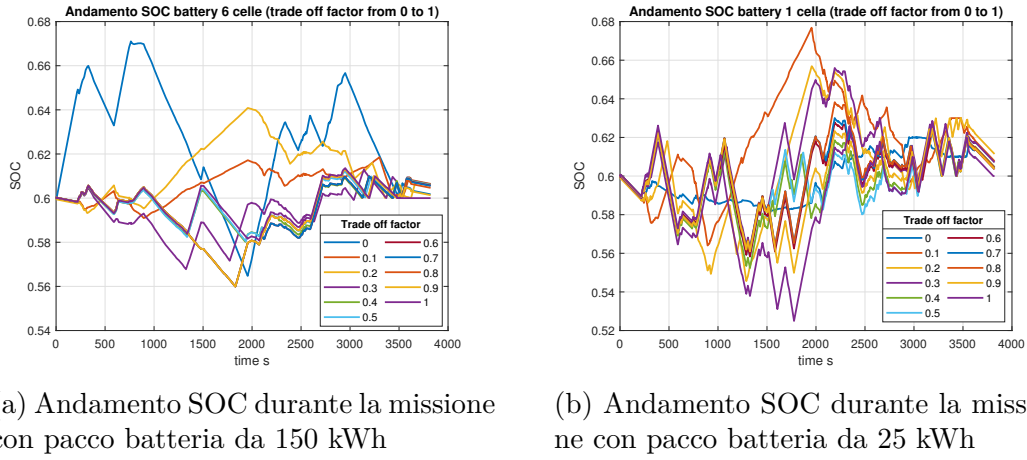


Figura 3.3: Confronto profili di SOC parametrizzati rispetto al trade off factor

maggiori (Figura 3.4), inoltre i cicli di carica e scarica risultano sempre maggiormente vincolati dal C-rate imposto, ottenendo quindi una limitazione della corrente in uscita ed in entrata che raggiungono per la maggior parte della simulazione il loro valore di saturazione (Figura 3.5).

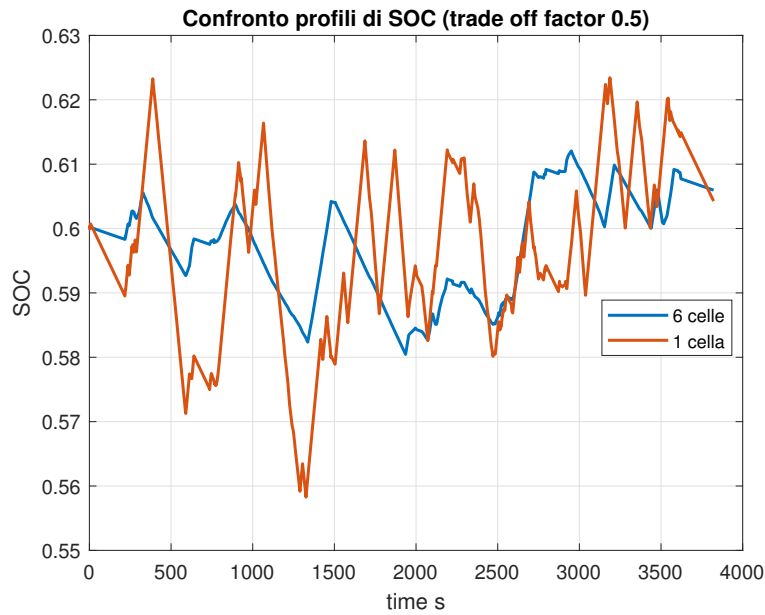


Figura 3.4: Variazione profilo SOC in funzione del numero di celle fissato un trade off factor pari a 0.5

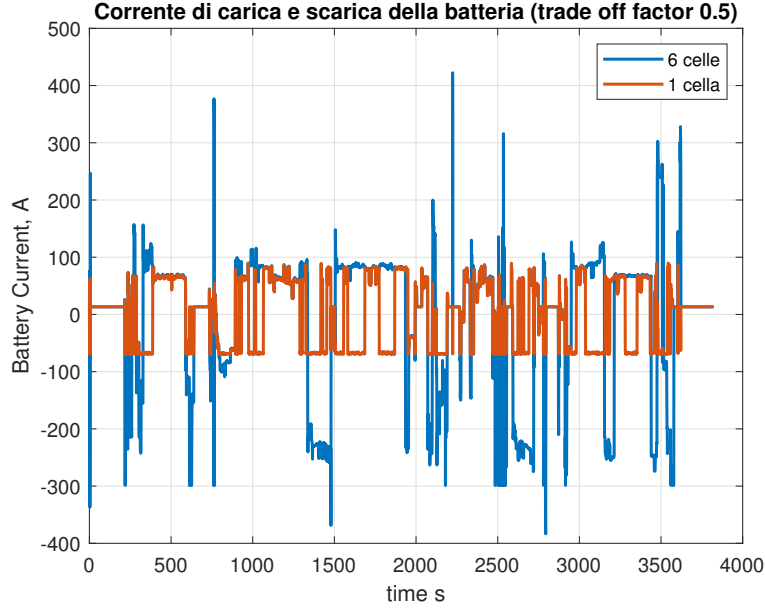


Figura 3.5: Corrente di carica e scarica della batteria in funzione del numero di celle fissato un trade off factor pari a 0.5

3.2.3 Analisi funzionamento componente endotermica e valutazione energetica

La variazione della dimensione della batteria ha ripercussioni anche sulla componente endotermica del sistema, la quale si trova a lavorare in condizioni sempre più vincolate, allontanandosi progressivamente dalla condizione ottimale, generando l'aumento degli inquinanti ben visibile nella Figura 3.1.

Anche in questo caso fissando un valore di trade off factor è possibile osservare come variano le mappe di funzionamento dei motori in funzione della dimensione della batteria; il risultato conferma quanto affermato precedentemente per il profilo del SOC in particolare confrontando il funzionamento del motore in presenza della batteria di capacità più piccola si osservano molti punti allontanarsi dalla condizione di ottimo, a scapito della performance del sistema, che diventa sempre minore, confermandosi una soluzione più inquinante. Nella configurazione con 6 celle (Figura 3.7) si osserva un picco a potenza prossima alla nominale, i 3 motori lavorano in condizioni costanti in questo punto di funzionamento generando sulla mappa bsHC e bsNO_x essenzialmente un unico punto. La situazione cambia notevolmente in presenza di un sola cella (Figura 3.8) difatti la distribuzione della potenza si sposta verso valori più bassi generando un comportamento più intermittente dei motori, che si trovano anche vincolati dal valore di saturazione della corrente di carica della

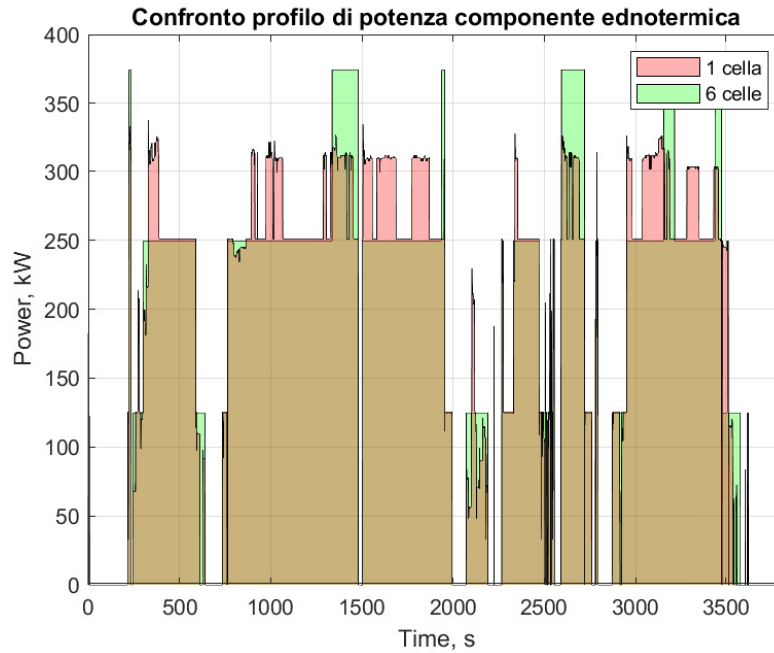
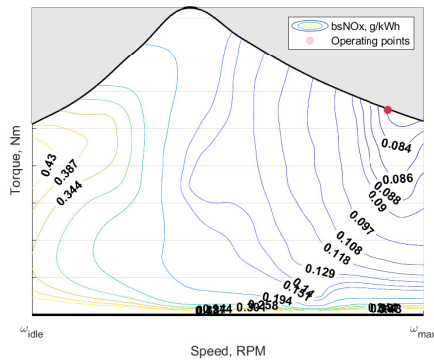


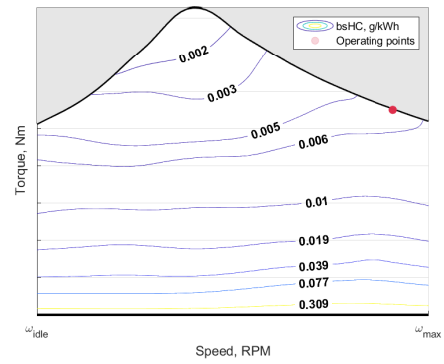
Figura 3.6: Profili di potenza per capacità della batteria corrispondenti a 150 kWh e 25 kWh

batteria, motivo per il quale spesso non riescono a lavorare nella condizione ottimale generando un aumento della produzione di inquinanti.

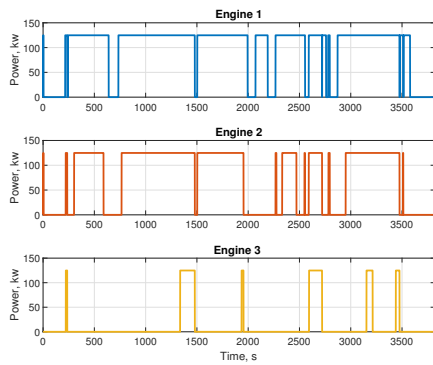
Dal punto di vista energetico (Figura 3.6), nel caso con la batteria di maggiore capacità, il profilo di potenza risulta costante caratterizzato da un punto di funzionamento multiplo della potenza nominale dei motori endotermici. Ciò non accade per la configurazione con la batteria di dimensione minore, è osservabile un profilo decisamente meno costante e caratterizzato da intervalli di potenza non multipli della potenza nominale indice della saturazione della potenza di carica della batteria e di allontanamento dalla condizione di lavoro ottimale.



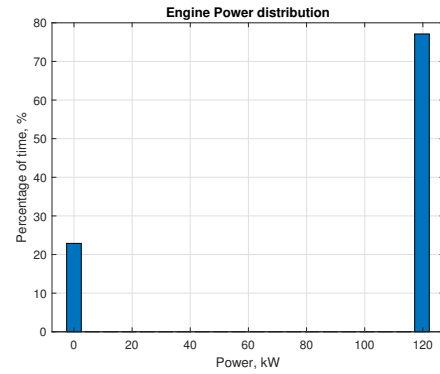
(a) Grafico emissione specifica NOx



(b) Grafico emissione specifica HC

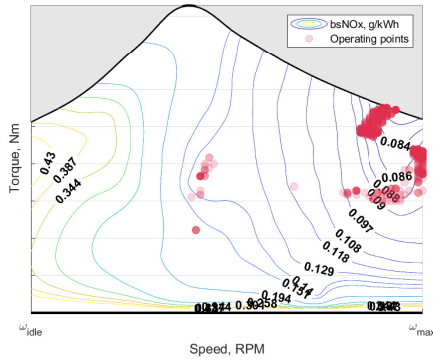


(c) Potenza generata, motori termici

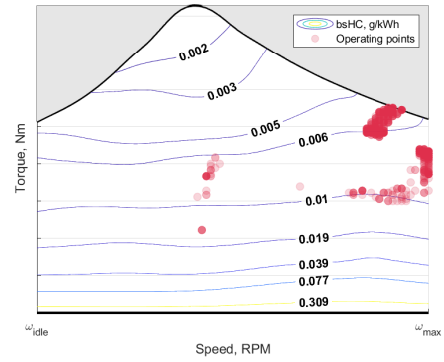


(d) Distribuzione della potenza

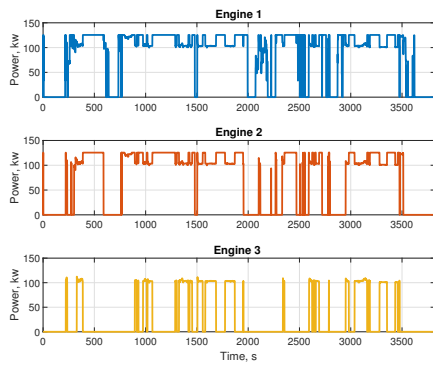
Figura 3.7: Punti di funzionamento, trade off factor = 0.5 e batteria da 150 kWh



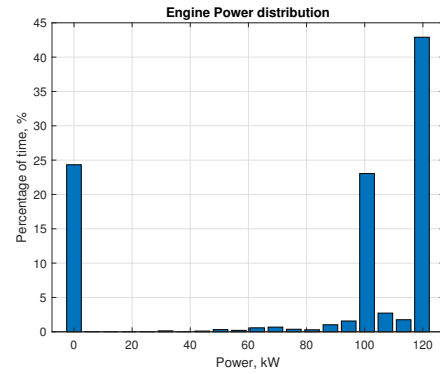
(a) Grafico emissione specifica NOx



(b) Grafico emissione specifica HC



(c) Potenza generata, motori termici



(d) Distribuzione della potenza

Figura 3.8: Punti di funzionamento, trade off factor = 0.5, batteria da 25 kWh

3.3 Conclusioni

Il funzionamento del sistema è influenzato dalla capacità della batteria, un suo corretto dimensionamento comporta l'ottenimento delle migliori performance da parte della configurazione ibrida. Una eccessiva riduzione della taglia vincola pesantemente il comportamento dei motori termici e quindi la gestione della potenza, discostando il funzionamento dal punto ottimale richiesto dalla specifica missione; il suo sovradimensionamento genera un buffer energetico sufficiente a disaccoppiare il funzionamento della componente termica da quella elettrica permettendo quindi di lavorare nella condizione ottimale, a scapito di un notevole aumento del peso e di un costo di installazione iniziale maggiore.

Nel caso in esame si può affermare che la condizione di miglior dimensionamento corrisponde a 3 celle (Figura 3.2a, Figura 3.2b) difatti nonostante la riduzione della capacità non si osserva una variazione tangibile degli inquinanti emessi.

Considerando il metodo di calibrazione adottato (che richiede lo spegnimento di una cella) e il vincolo imposto dalla possibilità di effettuare una navigazione in puro elettrico per il rientro dell'imbarcazione, è possibile affermare che la taglia da 150 kWh della batteria permette di soddisfare in modo completo i requisiti tecnici e i vincoli imposti da ACTV.

Capitolo 4

Modello ECMS della configurazione ibrida serie

4.1 Introduzione

Partendo dal modello dinamico dell'imbarcazione sviluppato per la implementazione con la DP si è proceduto con la creazione di un controllo ECMS. L' ECMS è una strategia di gestione dell'energia del sistema che basa il proprio funzionamento sulla minimizzazione di una funzione di costo, ad esempio il consumo equivalente di un veicolo (Eq.4.1). La discretizzazione delle variabili di controllo e la loro combinazione definisce la griglia su cui viene valutata la funzione di costo, si ottengono quindi N possibili soluzioni pari al numero delle combinazioni precedentemente calcolate.

$$EqFuelConsumption = FuelFlwRate - EqFactor * (SOC_{new} - SOC_{old}) \quad (4.1)$$

L'equivalence factor svolge un ruolo fondamentale al fine di conferire il corretto peso al consumo della batteria [24]; trattandosi di un sistema ibrido, nel calcolo del consumo equivalente bisogna considerare anche la variazione dello stato di carica. Il valore dell'Eq.Factor non è arbitrario ma è vincolato all'ipotesi charge sustaining, un valore corretto permette di calibrare il consumo della batteria ottenendo un valore di SOC finale pari a quello iniziale entro una tolleranza imposta dell'1%, un valore eccessivamente grande porta a conferire un notevole peso al consumo della batteria, generando un profilo di SOC crescente, mentre un valore eccessivamente piccolo porta ad avere un SOC decrescente incentivandone lo scaricamento. La deviazione del SOC finale (dipendente dall'Eq.Factor) è una funzione continua caratterizzata da un cambiamento di segno; sfruttando tale caratteristica è possibile applicare l'algoritmo di bisezione al fine di valutare il valore ottimale dell'equivalence factor che permette di rispettare l'ipotesi charge sustaining. La deviazione

del SOC si dimostra particolarmente sensibile al valore di equivalence factor imposto [25], piccole variazioni possono alterare notevolmente la soluzione cercata, tale caratteristica rende difficile una sua applicazione su cicli reali di guida poiché piccole deviazioni della missione analizzata comporterebbero un allontanamento dalla condizione di ottimo valutata a priori.

4.2 Sviluppo modello ECMS incentrato sulla produzione di inquinanti

Lo sviluppo del controllo ECMS è iniziato considerando il consumo di carburante, una volta valutato il corretto funzionamento del modello dell'imbarcazione e del sistema si è passati alla creazione di una equazione di costo basata sulla produzione degli inquinanti.

La configurazione serie analizzata è caratterizzata da 3 variabili di controllo:

- La velocità angolare del motore termico [84 – 241]
- La coppia del motore termico [0 – 825]
- α , variabile che considera il numero di motori accesi [0, 1, 2, 3]

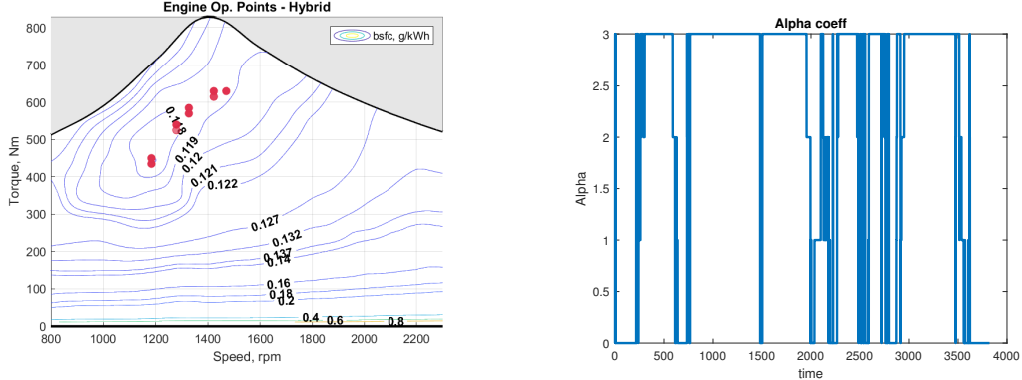
procedendo con una discretizzazione e generando un numero di punti equivalente al numero di combinazioni possibili si è generata la griglia di valutazione.

```
% Control variable and control grid
spdSet = 84:5:241;
trqSet = 0:15:825;
uSet = [0,1,2,3];
[spdSet, trqSet, uSet] = meshgrid(spdSet, trqSet, uSet);
```

Listing 4.1: Creazione variabili di controllo e griglia di valutazione

Fornendo al modello il valore di SOC e α_{prev} (numero di motori accessi) come variabili di stato, la griglia di valutazione come variabili di controllo ed infine i valori di velocità e coppia all'elica come input esogeni, si è riusciti a valutare per ogni combinazione delle variabili di controllo il corrispettivo valore di consumo di carburante. Il set di dati ottenuto viene rielaborato ponendo ad infinito i valori di consumo corrispettivi alle soluzioni che superano i vincoli imposti del problema (rendendone certa l'esclusione durante la valutazione del minimo); successivamente si procede con la valutazione del più piccolo valore di consumo di carburante identificando quindi le corrispettive variabili di controllo dello specifico istante temporale. Tale operazione va ripetuta per tutti gli istanti in cui è stata discretizzata la missione, generando il profilo di controllo ottimale. Il consumo equivalente di carburante considera anche la variazione dello stato di carica della batteria per mezzo dell'Eq.Factor, quindi

affinché la soluzione abbia significato bisogna calibrare il sistema per mezzo dell'algoritmo di bisezione. Attuando la calibrazione si ottiene $\text{Eq.Factor} = 2.949$ con una deviazione finale del SOC pari a 0.08, tale soluzione risponde al requisito imposto di minimizzazione del consumo di carburante, osservabile dalla Figura 4.1(a) dove i punti risultano all'interno delle curve specifiche a minor consumo, ma generando una soluzione poco realistica per via del numero eccessivo di accensioni che si attesta a 65 generando il profilo di α mostrato nella figura Figura 4.1(b). Si è



(a) Punti di funzionamento motore endotermico

(b) Andamento numero di motori accesi

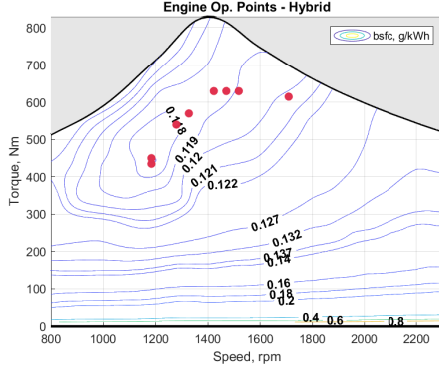
Figura 4.1: Punti di funzionamento bsfc e andamento di α

reso necessario definire una penalità sull'accensione in modo da limitare il numero di accensioni ad un valore inferiore o uguale a 10 (valore in linea con quello ottenuto con la DP); si è proceduto modificando la funzione del consumo equivalente di combustibile come quanto segue:

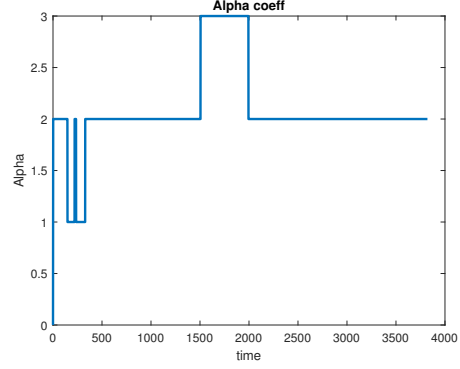
```
% Equivalent fuel consumption
EqFuelFlwRate = (fuelFlwRate * 1e-3) - eqFactor .* K .* (
    (soc_new - state{1}) - (max(uSet - state{2}, 0) .*
    penalty) );
```

Listing 4.2: Definizione consumo equivalente con penalità all'accensione

Modificando il valore imposto della penalty si varia il peso all'accensione del motore, di conseguenza all'aumentare della penalità si ottiene un numero di accensioni sempre minore. Ponendo un valore della penalità pari a 9×10^{-6} e calibrando si ottiene un $\text{Eq.Factor}=3.027$ con un numero di accensioni pari a 5. Il risultato ottenuto (Figura 4.2) si discosta dal precedente anche sui punti di funzionamento, a causa del nuovo vincolo imposto ci si sposta verso condizioni meno ottimali generando però un comportamento del numero di accensioni più attinente alla realtà. Il risultato ottenuto sulla minimizzazione del consumo di carburante per mezzo della DP con un valore di penalità all'avviamento pari ad 8 ha portato alla soluzione



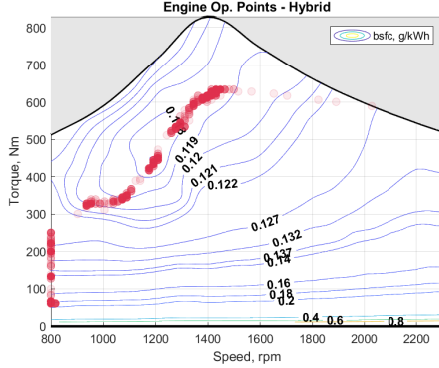
(a) Punti di funzionamento motore endotermico



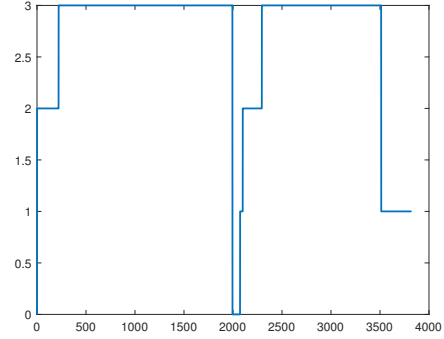
(b) Andamento numero di motori accesi

Figura 4.2: Punti di funzionamento bsfc e andamento di α con una penalità imposta pari a 9×10^{-6} , ECMS

presentata nella Figura 4.3. Si nota come la soluzione dell'ECMS ricalchi quella della DP sebbene con punti di lavoro più definiti e meno distribuiti, è anche osservabile come nel controllo ottimale si hanno tutti e tre i motori accesi per più tempo durante il profilo della missione. Definito il modello ECMS si è proceduto con lo



(a) Punti di funzionamento motore endotermico



(b) Andamento numero di motori accesi

Figura 4.3: Punti di funzionamento bsfc e andamento di α ottenuto per mezzo di DynaProg

sviluppo di una funzione di costo che tenesse in considerazione gli HC ed NO_X prodotti mantenendo una penalità sull'avviamento dei motori. Come nel caso DP anche in questo caso è stato definito un un fattore di trade off in modo da poter gestire il target multi obiettivo della funzione di costo. Si è proceduto con la normalizzazione dei due inquinanti in base al loro valore più alto letto nella mappa

motore ottenendo:

```
% Equivalent emissions
EqEmissions = mu.*(NOx ./ 0.2843) + (1-mu).*(HC ./
    0.0115) - eqFactor .* ( ( soc_new - state{1} ) - (
    max(uSet - state{2}, 0) .* penalty) ) ;
```

Listing 4.3: Definizione emissione equivalente con penalità all'accensione

Data la presenza di tre variabili (μ , Eq.Factor e penalty) la ricerca della soluzione ottimale con il valore dell'Eq.Factor calibrato si è dimostrata più complicata rispetto al caso precedente. Si è creato un ciclo caratterizzato da 11 passi (pari alla discretizzazione della μ) dove in ogni passo si è proceduto con l'imposizione di penalità e successiva calibrazione del sistema, verificando il numero di accensioni dei motori. Volendo mantenere il numero delle accensioni inferiore a 10, iterativamente si è aumentata la penalità fino al valore per cui, con l'Eq.Factor calibrato, si otteneva un risultato accettabile.

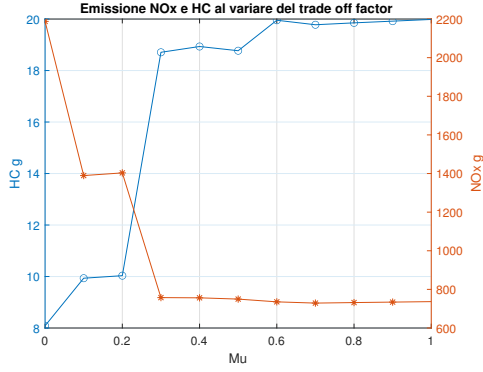
```
% Loop calibrazione
for mu=0:0.1:1
    i=i+1;
    % Impongo penalita'
    penalty = 0.00001;
    % Calibro
    extremes = [100 3000];
    SOCDevTol = 0.01;
    [eqFactor, SOCDev, maxiter] = eqfactor(penalty,
        extremes,mu, SOCDevTol);
    while maxiter == 1
        penalty = penalty+0.000001;
        [eqFactor, SOCDev, maxiter] = eqfactor(
            penalty,extremes,mu);
    end
    [~,~,~,avviamenti] = run_ECMS_inq(eqFactor,false,
        penalty,mu);
    while (avviamenti > 10)
        % Impongo penalita'
        penalty = penalty+0.000001;
        [eqFactor, SOCDev, maxiter] = eqfactor(
            penalty,extremes,mu);
        while maxiter == 1
            penalty = penalty+0.000001;
            [eqFactor, SOCDev, maxiter] =
                eqfactor(penalty,extremes,mu);
```

```

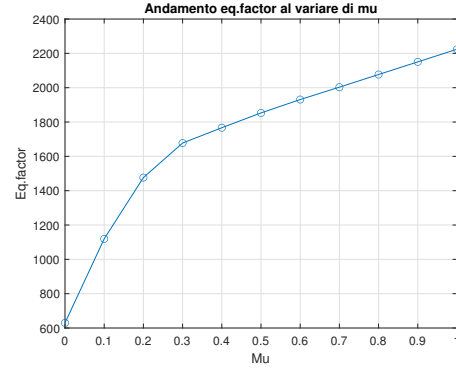
end
[~,~,~,avviamenti] = run_ECMS_inq(eqFactor,false,
    penalty,mu);
end
[~,prof{i},mainRes{i},accensioni(i)]=run_ECMS_inq
    (eqFactor,false,penalty,mu);
end
    
```

Listing 4.4: Loop per la calibrazione del sistema

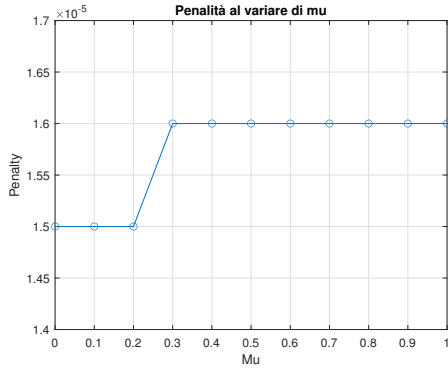
La variabile *maxiter* è stata integrata nel loop con il principale scopo di limitare il numero delle iterazioni dell'algoritmo di bisezione, si verifica per alcuni valori della *penalty* che la soluzione non converga con la tolleranza imposta dall'ipotesi charge sustaining, di conseguenza per scartare tali valori si incrementa il valore della *penalty* (quando *maxiter*=1). I risultati raccolti (Figura 4.4) mostrano un andamento



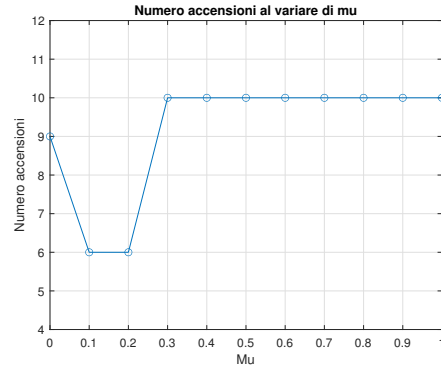
(a) Profilo emissivo HC, NOx



(b) Andamento Eq.Factor



(c) Andamento penalità imposta



(d) Numero di accensioni dei motori

 Figura 4.4: Andamenti valutati in funzione di μ durante il ciclo di calibrazione

sulla produzione di inquinanti coerente con quello che ci potevamo aspettare, ai due estremi si passa da una soluzione puramente incentrata sugli HC ad una NO_X

oriented. L'andamento del fattore di equivalenza è crescente con il crescere del trade off factor, mentre quello della penalità risulta pressoché costante. Questo risultato comporta un notevole alleggerimento dal ciclo di calibrazione, difatti è possibile considerare una penalità costante pari a 1.6×10^{-5} , ottenendo un numero di accensioni più basso per i primi valori di μ .

Si è proceduto con la definizione di un nuovo ciclo a penalità costante:

```
% Loop calibrazione
for mu=0:0.1:1
    i=i+1;
    mu
    % Impongo penalita'
    penalty = 0.000016;
    % Calibro
    extremes = [100 2500];
    SOCDevTol = 0.01;
    [eqFactor, SOCDev, maxiter, SOCDevTol] = eqfactor
        (penalty, extremes, mu, SOCDevTol);
    while maxiter == 1
        SOCDevTol = SOCDevTol + 0.01;
        SOCDevTol
        [eqFactor, SOCDev, maxiter, SOCDevTol] =
            eqfactor(penalty, extremes, mu, SOCDevTol
                );
    end
    [~, prof{i}, mainRes{i}, accensioni(i)] = run_ECMS_inq
        (eqFactor, false, penalty, mu);
end
```

Listing 4.5: Loop per la calibrazione del sistema con penalità costante

dove l'eccesso di iterazioni sull'algoritmo di bisezione è stato gestito incrementando la tolleranza imposta sulla deviazione del SOC anziché variare il valore della penalità. L'andamento dei risultati ottenuti è analogo a quello precedente, le uniche variazioni tangibili sono rappresentate dalla modifica della tolleranza per $\mu = 0$ dove si è reso necessario aumentarla fino a 0.03, e dal numero di motori accesi per i punti dell'estremità sinistra del grafico (Figura 4.5). Confrontando i risultati ottenuti con quelli generati dalla DP, che rappresentano la condizione ottimale, si possono fare considerazioni sulla qualità delle soluzioni ottenute (Figura 4.6). Per valori di μ sino a 0.4 la soluzione ha un andamento altalenante, con prestazioni inferiori in particolare sulla produzione degli HC; considerando la parte più a destra del grafico, dove le missioni conferiscono maggior peso alla produzione degli NO_x, si ottengono risultati migliori con un aumento di HC ed NO_x contenuto nel 10%.

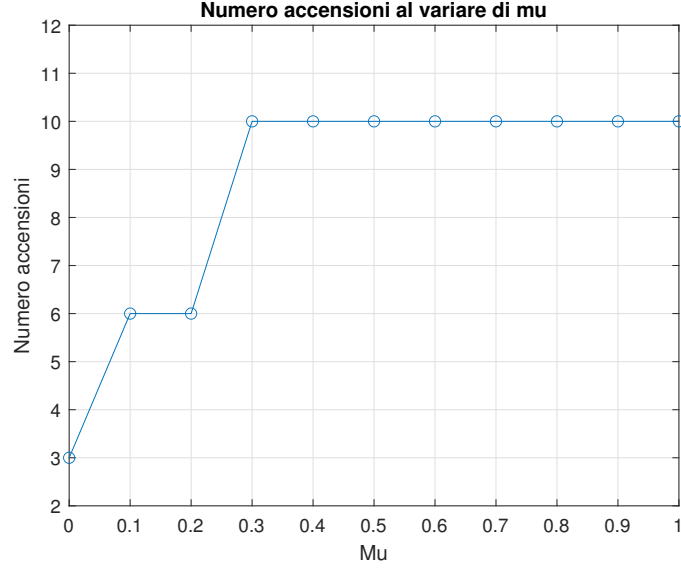
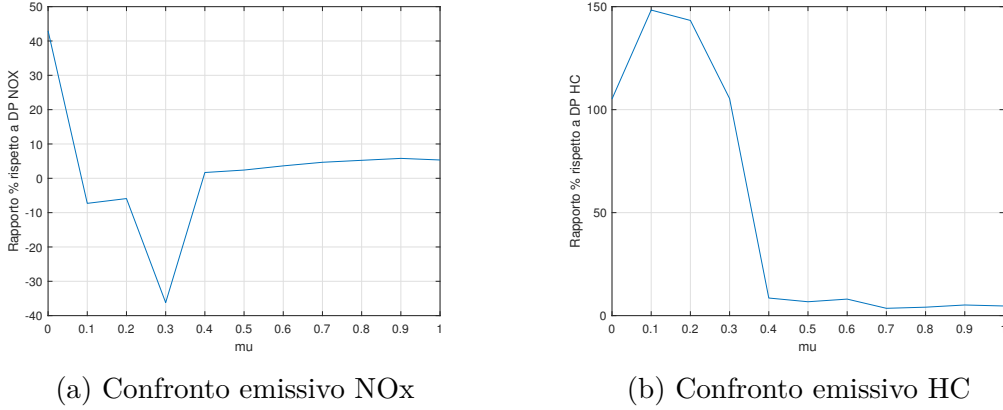


Figura 4.5: Numero accensioni durante la missione in funzione di μ



(a) Confronto emissivo NOx

(b) Confronto emissivo HC

Figura 4.6: Rapporto relativo percentuale rispetto alla simulazione DP

4.3 Sviluppo strategia real time A-ECMS

Il controllo real time utilizzato si basa sulla calibrazione ad istanti temporali fissi dell' Eq.Factor, partendo da un valore iniziale impostato, la simulazione procede a passi di tempo fissi entro cui il valore calcolato del fattore di equivalenza rimane costante. Il principio di funzionamento si basa sull'idea che in presenza di un fattore più piccolo di quello ottimale si ha una scaricamento più rapido della batteria mentre con un valore più grande si ha la tendenza ad accumulare la carica. In presenza di un'ipotesi charge sustaining, valutando ad ogni step temporale quanto

ci si è discostati dal valore di target, si procede a modificare il valore precedente dell' Eq.Factor in modo da portare il trend del SOC ad un profilo simile a quello ottimale. Similmente a quanto fatto in "*Adaptive Equivalent Consumption Minimization Strategy for Hybrid Electric Vehicles*" [25], si è definita l'equazione per rendere adattivo il sistema come quanto segue:

```
eqFactorNew = ( ctrl.eqFactor + ctrl.eqFactorPrev ) / 2 +
               ctrl.eqFactorGain .* ( ctrl.socRef - x(n) );
```

Listing 4.6: Equazione per rendere adattivo il calcolo dell'Eq.Factor

in particolare si è utilizzata la variabile di controllo *ctrl* che contiene:

- il tempo di aggiornamento, posto pari a 100 secondi, coerente con il tipo di missione a cui è sottoposta l'imbarcazione
- il guadagno, il quale permette di modificare la velocità di risposta del sistema
- il valore dell' Eq.Factor dello slot temporale $k-1$ e k
- il valore di riferimento del SOC posto pari a 0.6

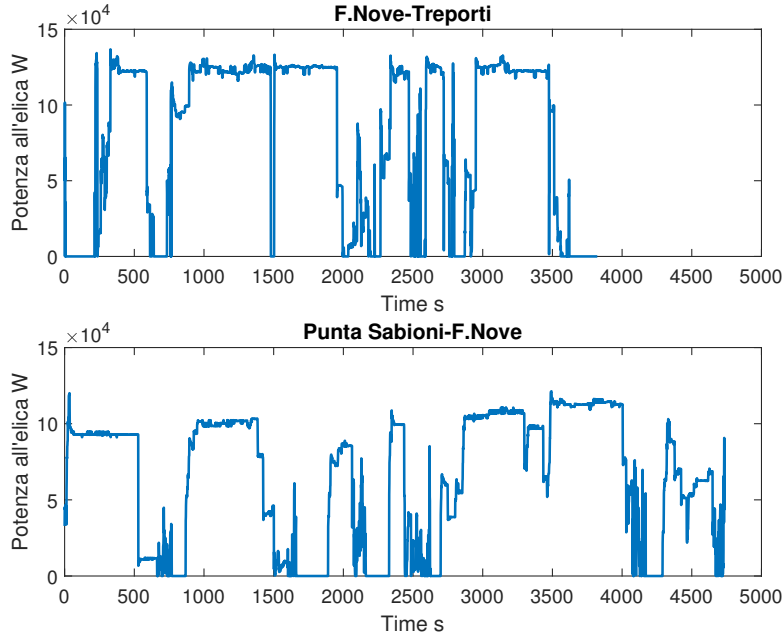


Figura 4.7: Confronto delle differenti missioni del battello

L'utilizzo della media del valore di Eq.Factor riferito all'istante $k-1$ ed all'istante k , serve a stabilizzare il sistema; in presenza di due istanti temporali di scarica e carica consecutivi, qualora venga raggiunto il SOC di riferimento, all'istante successivo

non ci sarebbe una modifica del fattore di equivalenza che tenderebbe ad aumentare eccessivamente la carica. Al fine di valutare le performance del sistema si è deciso di analizzare un ciclo di navigazione differente rispetto a quello fino ad ora utilizzato che considerava la rotta di navigazione F.Nove Treporti. Utilizzando i dati forniti da ACTV per la stessa linea in esame (Linea 12) si è scelta una missione che comprendesse la partenza da Punta Sabioni. Come è osservabile dalla Figura 4.7 la nuova missione considerata si presenta differente dalla precedente sia per il profilo di potenza all'elica che risulta mediamente più basso, sia per la durata della missione di circa 20 minuti maggiore. Effettuando delle analisi preliminari sul nuovo ciclo

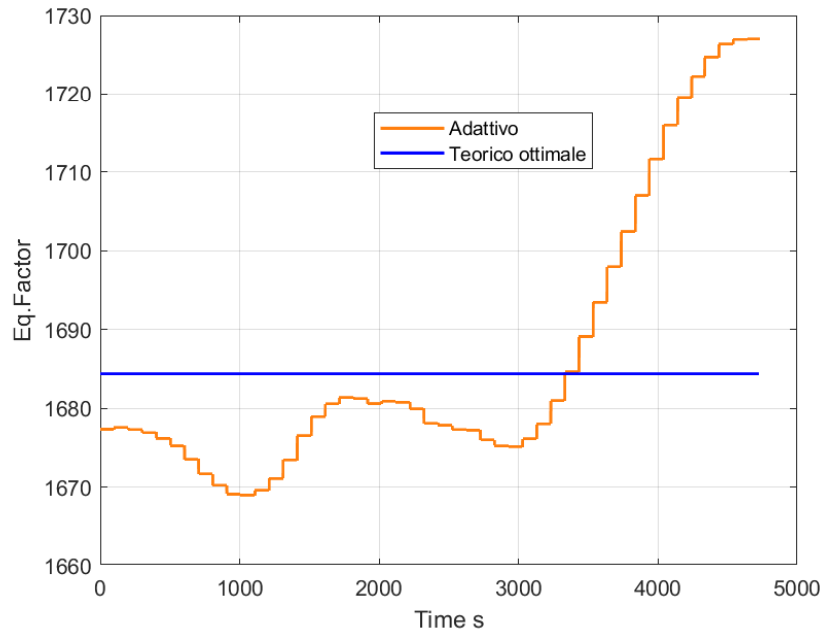


Figura 4.8: Andamento equivalence factor durante la missione analizzata

di navigazione si è reso evidente come il fattore di penalità posto precedentemente fosse eccessivo, per tale motivo si è deciso di abbassare il suo valore a 1.4×10^{-5} ottenendo un valore medio di circa 5 accensioni. Definito il primo valore dell'Eq. Factor pari al valore trovato per la prima missione corrispondente a $\mu = 0.3$ si è proceduto con un tuning del guadagno in modo da rispettare l'ipotesi charge sustaining, evitando che il sistema diventi instabile. Ponendo un valore di guadagno pari a 70 si è ottenuto un andamento dell'Eq. Factor (Figura 4.8) che non mostra una eccessiva periodicità e che permette di raggiungere una condizione finale di carica $SOC_{end} = 0.6096$. Comparando i profili SOC ottenuti (Figura 4.9) è possibile osservare una variazione del comportamento del sistema, dove si raggiungono valori di SOC più bassi; considerando il grafico dell'equivalence factor si nota come per la maggior parte della missione il valore rimanga al di sotto di quello

ottimale, ciò determina una maggiore scarica della batteria che viene compensata con un notevole aumento dell'Eq.Factor verso il termine della missione. I risultati

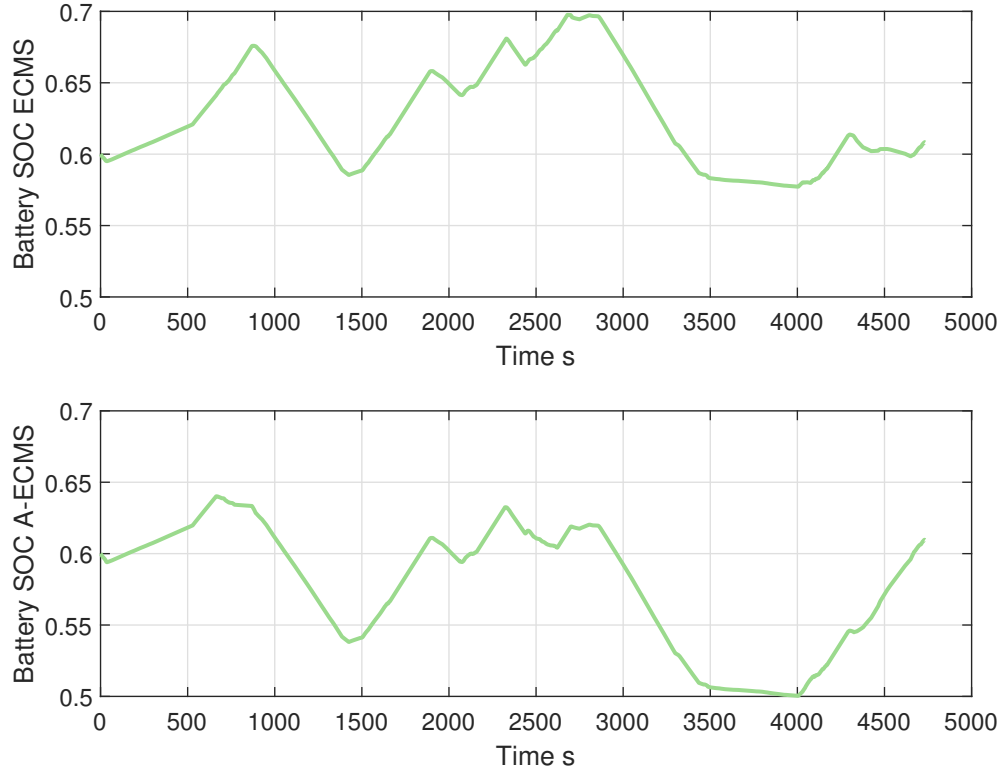


Figura 4.9: Profilo SOC ECMS ottimale e A-ECMS

ottenuti (Tabella 4.1) rendono evidente come il risultato sia pressoché identico alla versione non adattiva, il modello A-ECMS si dimostra particolarmente adatto a questo tipo di applicazione.

	ECMS	A-ECMS
<i>NOx</i>	771g	774g
<i>HC</i>	18.7g	18.7g
<i>FC</i>	45.5kg	45.6kg

Tabella 4.1: Confronto risultati ottenuti tramite ECMS e A-ECMS

Il comportamento dei motori elettrici è strettamente legato alla missione generando due profili sovrapponibili per le soluzioni ottenute; analizzando la potenza generata

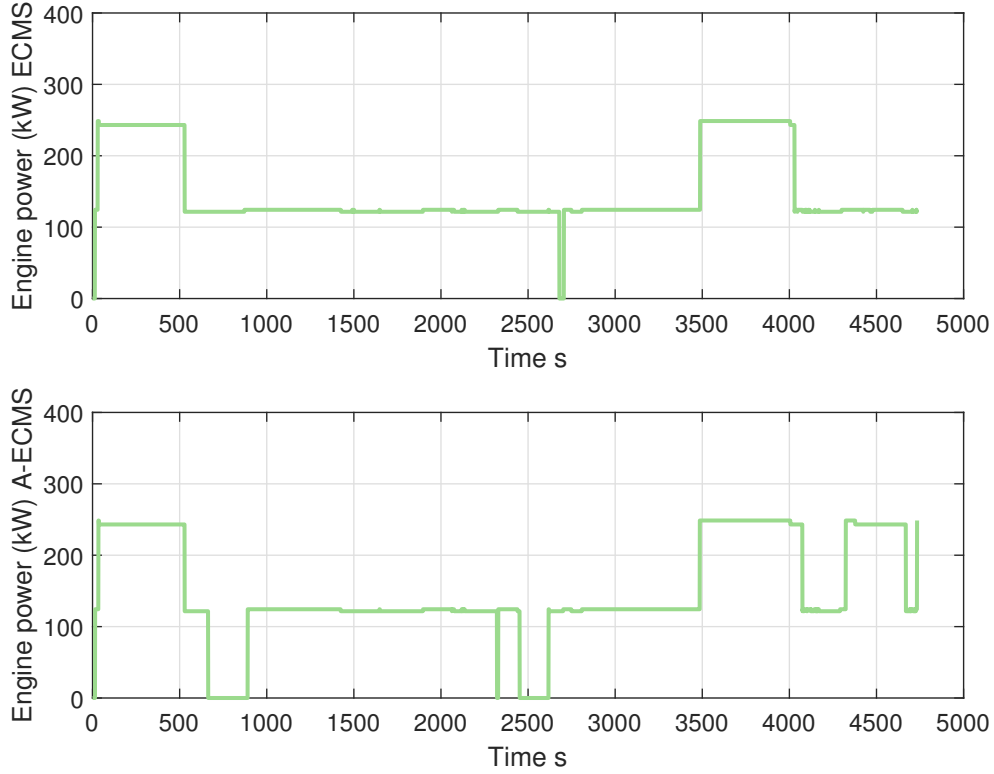


Figura 4.10: Profilo di potenza ECMS ottimale e A-ECMS

dai motori termici è possibile osservare un profilo diverso (Figura 4.10). La potenza erogata risulta multipla della potenza nominale dei motori, osservando meglio la figura possiamo dedurre che per questo tipo di missione non viene utilizzato il terzo motore e saltuariamente viene utilizzato il secondo, a conferma del fatto che il profilo di potenza medio risulta più basso della precedente.

4.4 Conclusioni

Lo sviluppo di un modello ECSM integrato sulla produzione di inquinanti ha portato alla rielaborazione della funzione di costo con la nascita del fattore μ , atto a gestire il target multi obbiettivo posto. La struttura così definita si discosta dalle soluzioni fuel based in particolare per il grado di complessità. La soluzione proposta è caratterizzata da 3 variabili (μ , $penalty$ ed $Eq.Factor$) che hanno richiesto la definizione di un ciclo di calibrazione al fine di ricercare la soluzione ottimale. I risultati ottenuti se paragonati con il ciclo ottimale valutato per mezzo della DP, mostrano un risultato meno costante sui primi valori di trade off factor, condizione

che diventa peggiorativa se si considera che all'interno di questo range è presente il punto per cui si ottiene il simultaneo abbattimento degli inquinanti, per poi stabilizzarsi a valori che rientrano in una emissione totale contenuta in un +10% (Figura 4.6).

La creazione di una strategia A-ECMS ha permesso di svincolare il sistema da cicli di navigazione noti a priori; partendo da un valore del fattore di equivalenza, non uguale a quello ottimale della missione, si è mostrata la capacità del nuovo modello di ricondursi alla condizione ottimale, a seguito di una opportuna messa a punto del guadagno, permettendo inoltre di rispettare l'ipotesi charge sustaining imposta. Sebbene il comportamento del SOC risulti diverso durante la missione, la performance ottenuta in termini di emissioni è comparabile a quella valutata con il modello ECMS; la controparte adattiva ha quindi generato un risultato analogo, sulla base degli obiettivi fissati, dimostrando una ottima applicabilità nel caso preso in esame. La variazione pressoché nulla dei risultati è anche imputabile alla notevole dimensione della batteria da 150 kWh, la quale permette di disaccoppiare i motori elettrici dalla loro controparte termica, che può quindi lavorare sempre sul punto di ottimo nella mappa motore riducendo quindi il divario fra i due modelli di gestione dell'energia.

Bibliografia

- [1] Jonson, J E et al. “*Impact of Excess NO_x Emissions from Diesel Cars on Air Quality, Public Health and Eutrophication in Europe.*” Environmental research letters 12.9 (2017): 094017-. Web.
- [2] «*Europe’s air quality status 2024*» <https://www.eea.europa.eu/publications/europes-air-quality-status-2024>
- [3] «*Premature deaths in the EU-27 due to PM_{2.5} levels above the 2021 WHO guidelines and distance to the zero pollution target, 2005-2020*» <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/maps-and-charts/premature-deaths-in-the-eu-1?activeTab=265e2bee-7de3-46e8-b6ee-76005f3f434f>
- [4] «*Regulation (EU) 2016/1628 of the European Parliament and of the Council of 14 September 2016 on requirements relating to gaseous and particulate pollutant emission limits and type-approval for internal combustion engines for non-road mobile machinery, amending Regulations (EU) No 1024/2012 and (EU) No 167/2013, and amending and repealing Directive 97/68/EC (Text with EEA relevance)*» <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32016R1628>
- [5] Prosdociimi, Ilaria, Mauro Masiol, and Giuseppe Tattara. “*Air Pollution in Venice and in Its Mainland: A First Assessment of Air Quality Control Policies.*” Environmental and ecological statistics 31.2 (2024): 273–295. Web.
- [6] *Stazioni di monitoraggio* <https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/aria/stazioni-di-monitoraggio>
- [7] *Rapporti sulla qualità dell’aria* <https://www.comune.venezia.it/it/content/stato-qualit-dellaria>
- [8] Gobbato T (2014/2015) *Il Trasporto passeggeri Nella Laguna Di Venezia: studio per un’imbarcazione di nuova generazione a ridotto impatto ambientali*, University of Trieste, 2014/2015
- [9] Peiyong Ni and Xiangli Wang and Hu Li. *A review on regulations, current status, effects and reduction strategies of emissions for marine diesel engines* issn: 0016-2361, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118477>, url <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236120314733>

- [10] Spiridon I. Raptotasios, Nikolaos F. Sakellaridis, Roussos G. Papagiannakis, Dimitrios T. Hountalas. *Application of a multi-zone combustion model to investigate the NOx reduction potential of two-stroke marine diesel engines using EGR*. Applied Energy, Volume 157, 2015, Pages 814-823, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.041>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914012987>
- [11] Usman Asad, Ming Zheng. *Exhaust gas recirculation for advanced diesel combustion cycles*, Applied Energy, Volume 123, 2014, Pages 242-252, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.073>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914002189>)
- [12] Roel Verschaeren, Wouter Schaepdryver, Thomas Serruys, Marc Bastiaen, Lieven Vervaeke, Sebastian Verhelst. *Experimental study of NOx reduction on a medium speed heavy duty diesel engine by the application of EGR (exhaust gas recirculation) and Miller timing*, Energy, Volume 76, 2014, Pages 614-621, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.08.059>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214009955>
- [13] R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman *Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments*, Applied Energy, Volume 194, 2017, Pages 30-54, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.060>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917301940>
- [14] Layman report *Zero.Emission.Ships* <https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/project/LIFE06-ENV-D-000465/zeroemissionships>
- [15] *MV Catriona* <https://www.cmassets.co.uk/ferry/mv-catriona/>
- [16] Flavio Balsamo, Clemente Capasso, Davide Lauria, Ottorino Veneri, *Optimal design and energy management of hybrid storage systems for marine propulsion applications*, Applied Energy, Volume 278, 2020, 115629, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115629>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920311326>
- [17] M. Guarnieri, M. Morandin, A. Ferrari, P. Campostrini and S. Bolognani, "Electrifying Water Buses: A Case Study on Diesel-to-Electric Conversion in Venice," in IEEE Industry Applications Magazine, vol. 24, no. 1, pp. 71-83, Jan.-Feb. 2018, doi: 10.1109/MIAS.2017.2739998.
- [18] Miretti, Federico et al. "Hybridizing Waterborne Transport: Modeling and Simulation of Low-Emissions Hybrid Waterbuses for the City of Venice." Energy (Oxford) 244 (2022): 123183-. Web.
- [19] "Modeling and optimal energy management strategy of a hybrid ferry for the city of Venice." Autore: Alberto Nicolotti; Relatore: Daniela Anna Misul; Corelatore: Federico Miretti.
- [20] Gregory L.Plett *Battery management system*, Volume 1, Battery Modeling
- [21] DynaProg: Deterministic Dynamic Programming solver for finite horizon multi-stage decision problems / Miretti, Federico; Misul, Daniela; Spessa,

- Ezio. - In: SOFTWAREX. - ISSN 2352-7110. - ELETTRONICO. - 14:(2021). [10.1016/j.softx.2021.100690]
- [22] Bellman, R.E. (2003) [1957]. Dynamic Programming. Dover. ISBN 0-486-42809-5.
- [23] Simona Onori, Lorenzo Serrao, and Giorgio Rizzoni. «*Hybrid electric vehicles: Energy management strategies*». In: SpringerBriefs in Control, Automation and Robotics (9781447167792 2016). issn: 21926794.
- [24] Enang, Wisdom, and Chris Bannister. “*Robust Proportional ECMS Control of a Parallel Hybrid Electric Vehicle.*” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D, Journal of automobile engineering 231.1 (2017): 99–119. Web.
- [25] Onori, Simona, Lorenzo Serrao, and Giorgio Rizzoni. “*Adaptive Equivalent Consumption Minimization Strategy for Hybrid Electric Vehicles.*” ASME 2010 Dynamic Systems and Control Conference, Volume 1. ASMEDC, 2010. 499–505. Web.