

POLITECNICO DI TORINO



CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA MECCANICA

Tesi di Laurea Magistrale

**SVILUPPO DI UN MODELLO PER LA SIMULAZIONE DI
UN VAPORETTO ACTV IN ARCHITETTURA IBRIDA:
IMPLEMENTAZIONE DI UNA STRATEGIA DI CONTROLLO
RULE-BASED**

Relatore

Prof. Daniela Misul

Correlatore

Ing. Antonio Ferrari

Candidato

Giulio Gennaro

A Leonardo

PREFAZIONE

In questi anni il tema delle emissioni inquinanti e della riduzione di utilizzo di combustibili fossili è molto discusso. Nel mondo dell'automotive assistiamo ad un cambiamento delle normative che di anno in anno diventano sempre più restrittive costringendo i costruttori ad investire molto nella ricerca di nuove tecnologie capaci di rendere i veicoli omologabili. In particolare, l'intero settore volge verso un processo di elettrificazione dei powertrain, dovendo però fronteggiare dei limiti tecnologici che impediscono di rendere il motore a combustione interna completamente sostituibile.

Di fatto, il mondo dei trasporti è ancora dominato dal petrolio: il 55% della domanda globale di quest'ultimo viene dal settore dei trasporti del suo insieme e il trend tende ad aumentare.

Per analizzare la reale convenienza in termini di efficienza dell'utilizzo di nuove tecnologie elettriche o di combustibili alternativi a quelli fossili, bisogna usare un approccio che consideri non solo le emissioni effettive del motore, ma è necessario considerare anche la spesa compiuta per produrre il powertrain, che sia alimentato da un pacco batterie o necessiti la raffinazione di un particolare combustibile, dividendo l'analisi di efficienza energetica da Tank to Wheel (TTW), letteralmente dal serbatoio alla ruota, a Well to Tank (WTT), dal bene primario al serbatoio. Per esempio, in un veicolo puramente elettrico, la TTW risulta nulla ma non lo è la WTT. Sommandole, riusciamo a considerare l'impatto complessivo della spesa energetica, sempre in termini di emissioni di inquinanti e di CO₂, ed è stato confermato che al momento non esiste una risorsa nettamente vantaggiosa rispetto al petrolio.

Il mondo dell'automotive è stato spesso oggetto di discussioni, ma cosa sta succedendo negli altri settori? Come vengono regolamentati i motori di grossa cilindrata, quali ad esempio i motori navali? Queste domande sono state l'input del seguente elaborato, che mi ha spinto a studiare materie a me poco note, quali la propulsione e l'architettura navale. Sono partito da un'analisi generale del settore per poi concentrarmi su un caso studio specifico ed unico nel suo genere: il trasporto navale a Venezia, in particolare la rete di collegamento servita da imbarcazioni chiamate *vaporetti*, che svolgono una funzione paragonabile a quella degli autobus o dei tram. Nessun'altra città al mondo presenta un traffico urbano navale così intenso. La taglia e la tipologia dei motori

utilizzati per equipaggiare questi battelli sono molto simili a quelli dell'autotrazione, spesso sono derivati direttamente da essi e "marinizzati", oppure sono dei derivati dei motori industriali; il numero limitato degli esemplari (si pensi a quanti autobus esistono nel mondo e quanti sono i *waterbus* veneziani) che non rende possibile una reale e forte ingegnerizzazione del prodotto; la necessità di un ingente investimento per costruire un vaporetto (si parla di circa 1.000.000 € contro i 300.000 € necessari per la realizzazione di un bus) e la lunga vita del mezzo una volta realizzato (alcuni vaporetto ancora perfettamente funzionanti risalgono al 1978), sono tutti fattori che rendono questo caso particolarmente interessante dal punto di vista ingegneristico.

Ho cercato di capire al meglio tutti i vincoli che la città stessa pone sullo sviluppo tecnologico, il perché il combustibile diesel resta ancora la colonna portante della propulsione e quali sono le possibilità di un'ibridizzazione elettrica in questo campo, applicando tutte le conoscenze acquisite durante il mio corso di studi.

Ringrazio la Prof.ssa Daniela Misul per avermi dato la possibilità di addentrarmi in questo mondo, per avermi supportato durante tutti i mesi di lavoro, con interesse e disponibilità e soprattutto per aver creduto in me, e l'Ing. Antonio Ferrari, per avermi accolto a braccia aperte, corretto con la sua esperienza quando le mie lacune di ingegneria navale emergevano e per avermi trasmesso un po' di fantastica cultura veneta.

SOMMARIO

Prefazione	3
1. Introduzione	9
1.1 Le emissioni	11
1.1.1 Le emissioni nei motori Diesel	11
1.1.2 Ossidi di azoto NO _x	14
1.1.3 Idrocarburi incombusti HC e monossido di carbonio CO.....	15
1.1.4 Ossidi di zolfo SO _x	15
1.1.5 Particolato PM	16
1.1.6 Gas serra.....	17
1.2 Le normative	19
1.2.1 Aree ECAs	20
1.2.2 Normative IMO – Marpol	21
1.2.3 Normative US – EPA.....	25
1.2.4 Normativa EMEA.....	26
1.3 Venezia	28
1.3.1 ACTV.....	29
1.3.2 Cos'è un vaporetto.....	30
2. Modello: Simulazioni in architettura convenzionale	33
2.1 Principi generali della propulsione nel campo navale	35
2.2 Schema architettura convenzionale	38
2.2.1 Propulsore	39
2.2.2 Invertitore-riduttore	41
2.2.3 Elica.....	42
2.3 Ciclo Guida	46
2.4 Richiesta di potenza	50
2.4.1 Analisi deviazione standard.....	53
2.4.2 Velocità di rotazione	56
2.5 Approssimazione dati di input	58
3. Modello: Simulazioni in architettura ibrida	59
3.1 Principali architetture ibride	60
3.1.1 Ibrido serie	60
3.1.2 Ibrido parallelo.....	61
3.1.3 Ibrido complesso.....	62
3.1.4 Ibrido Plug-In	64
3.2 Vantaggi ibrido serie	65
3.2.1 Motore termico	67
3.2.2 Motori elettrici.....	68
3.2.3 Batteria.....	69
3.3 Modellizzazione	70

3.4	Rule Based Control	72
4.	Conclusioni	75
4.1	Simulazioni	75
4.1.1	Simulazione architettura convenzionale	75
4.1.2	Simulazione architettura ibrida	79
4.1.3	Mappa rule based control	80
4.2	Risultati	82
4.2.1	Prova 1	83
4.2.2	Prova 2	84
4.2.3	Prova 3	85
4.2.4	Prova 4	86
4.2.5	Prova 5	87
4.2.6	Prova 6	88
4.2.7	Prova 7	89
4.2.8	Prova 8	90
4.2.9	Prova 9	92
4.3	Conclusioni e applicazioni future	93
	Bibliografia.....	95
	Appendice	96
	Ringraziamenti.....	99

INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 1 – EMISSIONE DI INQUINANTI [1]	10
FIGURA 2 – EVOLUZIONE DELL’EVENTO DI COMBUSTIONE ANALIZZATA IN UN GETTO DI COMBUSTIBILE DIESEL	12
FIGURA 3 – ANALISI DELLE CURVE DI PRESSIONE, RILASCIO DI CALORE, FRAZIONE DI COMBUSTIBILE BRUCIATA CON ATTENZIONE AL PUNTO DI ANTICIPO DI INIEZIONE RISPETTO AL PMS	13
FIGURA 4 – VARIAZIONE DELLA COMPOSIZIONE DEL PARTICOLATO IN FUNZIONE DEL CARICO	17
FIGURA 5 - AREE ECA ATTUALI E POSSIBILI AREE FUTURE	21
FIGURA 6 – QUANTITATIVO DEI LIMITI PERMESSI DI NOX IN FUNZIONE DEL REGIME DI ROTAZIONE	23
FIGURA 7 – CONTENUTO DI ZOLFO PERMESSO NEI CARBURANTI	24
FIGURA 8 – DETTAGLIO DEL CANAL GRANDE. IN PRIMO PIANO SULLA SINISTRA UN VAPORETTO ACTV	29
FIGURA 9 – FLOTTA NAVALE ACTV	30
FIGURA 10 – DISEGNO IN SCALA DI UN VAPORETTO SERIE 90	31
FIGURA 11 – DETTAGLIO APPRODI DEI VAPORETTI. SULLA SINISTRA, UN VAPORETTO CHE INIZIA LA FASE DI APPRODO	32
FIGURA 12 – PER PERMETTERE L’AVANZAMENTO, LA FORZA DI SPINTA F DEVE ESSERE MAGGIORE DI R	35
FIGURA 13 – CURVA DI RESISTENZA TOTALE, SOMMA DELLE RESISTENZE D’ATTRITO, VISCOSA E D’ONDA.	37
FIGURA 14 – SCHEMATIZZAZIONE SEMPLICE DI UN’ARCHITETTURA CONVENZIONALE	39
FIGURA 15 – CURVE DI POTENZA, DI CONSUMO E DI COPPIA DI UN CURSOR 9 A PIENA POTENZA	40
FIGURA 16 – CURVA DI COPPIA DEL MOTORE UTILIZZATO PER LE SIMULAZIONI	41
FIGURA 17 – DIAGRAMMA DI KT, KM E RENDIMENTO DI UN’ELICA	44
FIGURA 18 – PUNTO DI FUNZIONAMENTO DELL’ELICA TROVATO CON L’ INCROCIO TRA LE CURVE KTS E KT	45
FIGURA 19 – TRACCIA GPS DEL CICLO GUIDA DEL VAPORETTO	46
FIGURA 20 – PROFILO DELLA VELOCITÀ CALCOLATO MEDIANTE GPS DURANTE LA LINEA 1	47
FIGURA 21 – DETTAGLIO DELLA PRIMA FASE DELLA LINEA 1, $400 < T < 730$ S	48
FIGURA 22 – DETTAGLIO SECONDA FASE DELLA LINEA 1, $3640 < T < 3960$ S	49
FIGURA 23 – PARTICOLARE APPRODO REALE	51
FIGURA 24 – PARTICOLARE APPRODO SIMULATO	52
FIGURA 25 – RICHIESTE DI POTENZA	56
FIGURA 26 – CURVA DI CARICO DI UN’ELICA 1000X1000 A 3 PALE (IN ROSSO) E A 4 PALE (IN NERO)	57
FIGURA 27 – SCHEMA DI FUNZIONAMENTO ARCHITETTURA IBRIDA SERIE ERRORE. IL SEGNALIBRO NON È DEFINITO.	
FIGURA 28 - SCHEMA DI FUNZIONAMENTO ARCHITETTURA IBRIDA PARALLELO	62
FIGURA 29 - SCHEMA DI FUNZIONAMENTO ARCHITETTURA IBRIDO COMPLESSO	63
FIGURA 30 – DETTAGLIO RICARICA IBRIDO PLUG-IN NEL CASO DI UN’AUTOVETTURA	65
FIGURA 31 - PUNTO DI FUNZIONAMENTO DELL’ELICA TROVATO CON L’ INCROCIO TRA LE CURVE KTS E KT	66
FIGURA 32 – SCHEMA IBRIDO SERIE	66
FIGURA 33 – SPETTRO EMISSIONI DI PM DI UN MOTORE DI 125KW	67
FIGURA 34 – MODALITÀ DI FUNZIONAMENTO CHARGE SUSTAINING E CHARGE DEPLETING	71
FIGURA 35 – SCHEMA DI FUNZIONAMENTO RULE BASED. IN ORDINATA LA POTENZA RICHIESTA, IN ASCISSA LO STATO DI CARICA DELLA BATTERIA	73
FIGURA 36 – MAPPA ICE, A SX, MAPPA EM1 A DX. CONOSCENDO IL PUNTO DI FUNZIONAMENTO ICE RICAVIAMO IL PUNTO DI FUNZIONAMENTO EM1	74
FIGURA 37 – CURVE ISORENDIMENTO	74
FIGURA 38 – RISULTATI SIMULAZIONE IN ARCHITETTURA CONVENZIONALE. SONO INDICATI LA POTENZA RICHIESTA IN ROSSO, IL CONSUMO ISTANTANEO DI FC IN VERDE, LA VELOCITÀ DI AVANZAMENTO LINEA TRATTEGGIATA NERA, VELOCITÀ DI ROTAZIONE DELL’ELICA IN BLU	76
FIGURA 39 – DETTAGLIO SIMULAZIONE $0 < T < 1500$ S	76
FIGURA 40 – DETTAGLIO SIMULAZIONE $1500 < T < 3000$ S	77

FIGURA 41 – DETTAGLIO SIMULAZIONE 3000 < T < 4000 S	77
FIGURA 42 – RISULTATI PROVA IN TERMINI DI CO ₂	78
FIGURA 43 – MAPPA SELEZIONATA PER LE SIMULAZIONI FINALI	82
FIGURA 44 – RISULTATI PROVA 1	83
FIGURA 45 - RISULTATI PROVA 2	84
FIGURA 46 - RISULTATI PROVA 3	85
FIGURA 47 - RISULTATI PROVA 4	86
FIGURA 48 - RISULTATI PROVA 5	87
FIGURA 49 - RISULTATI PROVA 6	88
FIGURA 50 - RISULTATI PROVA 7	89
FIGURA 51 - RISULTATI PROVA 8	90
FIGURA 52 - RISULTATI PROVA 9	92

1. INTRODUZIONE

Il problema dell'inquinamento atmosferico dovuto al traffico dei veicoli terrestri è un tema che viene affrontato e studiato già dagli anni Sessanta, con particolare riguardo al traffico urbano, che con l'aumentare della numerosità della popolazione ha visto una crescita esponenziale del numero di autoveicoli in circolazione. L'attenzione al traffico marino è stata invece più che altro incentrata su vicende legate all'inquinamento del mare dovuto sia all'esercizio delle navi (sversamento in mare di acque di sentina o di lavaggio cisterne) sia a tragici eventi quali, ad esempio, il naufragio di grandi petroliere, eventi rari e poco frequenti ma gravosissimi nei confronti dell'ambiente e di grande impatto emotivo sull'opinione pubblica, il che ha spinto le Organizzazioni Internazionali verso la ricerca di sistemi di sicurezza e prevenzione di inquinamento dell'acqua. Soltanto in tempi abbastanza recenti si è avvertita la necessità di preoccuparsi del problema dell'inquinamento dell'aria. Si è ormai maturata la consapevolezza che bisogna affrontare il problema a livello globale e non pensare che quello che viene emesso in mare aperto non produca nessun effetto sul nostro pianeta. Inoltre, c'è il rischio che il tipo di inquinamento generato in mare non sia meno preoccupante o meno importante di quello generato a terra: ad esempio nei grandi porti, vicini ai centri cittadini, la presenza di grandi navi mercantili o da crociera, può dar luogo ad un'elevatissima concentrazione di composti tossici rilasciati dai gas di scarico sia dei motori principali, che in fase di manovra sono chiamati ad elevatissime richieste di potenza, sia dei gruppi elettrogeni utilizzati in fase continuativa, anche a nave ormeggiata in porto, per garantire i servizi della nave. In molte città si sta sviluppando sempre più l'idea di decentrare il traffico urbano utilizzando linee marittime costiere o intercittadine. In città come New York o Londra, in un futuro non troppo lontano, gran parte del servizio urbano di trasporto svolto da mezzi terrestri quali autobus o tram verrà svolto da imbarcazioni che dovranno essere pensate appositamente per non aggravare il bilancio delle emissioni inquinanti.

Rispetto ai motori terrestri, i motori marini sono pensati per funzionare con variazioni di carico nettamente meno frequenti: questo ci fa capire perché non sono equipaggiati con scatole di cambio, data la differenza della trasmissione del moto e della "strada" da percorrere. L'ambiente marino differisce molto da quello terrestre, quindi possono non essere sempre valide le tecniche di controllo delle emissioni adottate sui veicoli terrestri, tuttavia per studiare questi sistemi si è

iniziato utilizzando tutto il background e le conoscenze acquisite in campo terrestre, in termini di approccio, tecniche di misurazione, standard di misura, strumentazioni di analisi. Soprattutto in città come Venezia, caratterizzate da un traffico marino a stretto contatto con la città, le differenze tra terrestre e navale tendono ad attenuarsi: infatti l'esercizio dei waterbus, *vaporetti* nel caso veneziano, somiglia molto a quello degli autobus, in termini di missioni giornaliere con frequentissimi transitori, condizioni di crociera raggiungibili solo in alcuni tratti lontano dal centro, l'impiego di un combustibile che è uguale a quello dell'autotrazione (gasolio a bassissimo tenore di zolfo).

In virtù di tali considerazioni, sono state emanate delle normative restrittive adattate all'ambito marino, considerando le differenti tipologie di motori (i motori Heavy Duty marini presentano un range di funzionamento che va da 40 a 100.000 kW, molto più elevato di un Heavy Duty stradale) e le differenti tipologie di rotte e di imbarcazioni. Le restrizioni più severe si sono avute dapprima nelle aree a densità commerciale più elevata e ad elevata densità abitativa, zone come la città di Venezia appunto, che sarà il caso studio del seguente elaborato. I limiti attualmente imposti sono comunque più ragionevoli dei vincoli terrestri, e molte normative devono ancora entrare in vigore, ma aziende come ACTV, di cui parleremo in seguito, hanno già provveduto alla motorizzazione della propria flotta in rispetto a normative future.



Figura 1 – Emissione di inquinanti [1]

1.1 LE EMISSIONI

Le emissioni che verranno trattate sono di due tipologie: *emissioni inquinanti*, che sono direttamente nocive alla salute dell'uomo e sono formate da *inquinanti primari*, tra cui idrocarburi incombusti (HC), ossidi di azoto (NO_x), monossido di carbonio (CO), particolato (PM), ossidi di zolfo (SO_x), e *inquinanti secondari*, dovute alla reazione dei primari con l'atmosfera e formate da piogge acide, smog fotochimico e ozono a livello del terreno, e le *emissioni di gas serra*.

1.1.1 LE EMISSIONI NEI MOTORI DIESEL

I motori Diesel utilizzati per la propulsione navale sono di svariate tipologie in termini di numero cicli di funzionamento e di cilindrata: possiamo avere motori a 2T o a 4T, dai 2l a 1.820.000 l (il motore più grande al mondo, Wärtsilä-Sulzer RTA96C). Questi motori non possono essere studiati e analizzati allo stesso modo perché molto diversi tra di loro; l'attenzione si concentrerà su motori di piccola – media cilindrata, propulsori spesso derivati da quelli terrestri e marinizzati, ad esempio con sistemi di raffreddamento dei collettori di scarico.

Per capire come ridurre le emissioni di un motore diesel bisogna prima analizzare come avviene la combustione all'interno della camera di combustione e quali sono le varie fasi, in modo da attuare strategie efficaci.

Il processo di combustione è stato studiato attraverso tecniche laser che hanno permesso di osservare la propagazione del fronte di fiamma all'interno della camera di combustione. I combustibili utilizzati sono ad alta reattività, quindi non vi è una fase di pre-miscelazione comburente - combustibile, ma quest'ultimo viene iniettato in camera ad elevatissima velocità e pressione nel momento in cui il pistone si trova prossimo al PMS (Punto Morto Superiore). L'elevata pressione a cui è soggetto il combustibile (fino a 3000 bar) fa sì che questo venga frazionato in un finissimo spray formato da goccioline di combustibile. La dimensione di queste è uno dei parametri di calibrazione. Dal momento in cui viene iniettato, il getto di combustibile si "scontra" con una parete di aria ad elevata densità e qui inizia l'autoaccensione, dapprima nelle parti esterne del getto, propagandosi e coinvolgendo successivamente tutto il getto di combustibile.

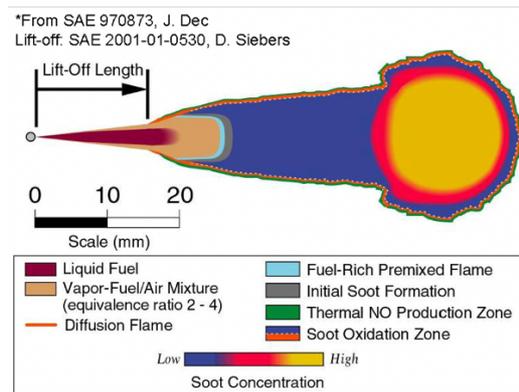


Figura 2 – Evoluzione dell'evento di combustione analizzata in un getto di combustibile Diesel

La combustione è di tipo *diffusiva* ed il combustibile richiede una determinata quantità di aria (rapporto aria /combustibile) solo a livello locale e non in tutta la camera. Questo permette a questa tipologia di motore di poter lavorare costantemente in eccesso di aria e regolare il carico solo variando il quantitativo di combustibile iniettato.

Dopo una prima fase di accensione della fiamma, i valori di pressione e temperatura in camera salgono bruscamente, come se il combustibile esplodesse. E' questa la fase più importante della combustione. Infine, quando il pistone è ormai prossimo al PMI e in fase di risalita, avviene un rimescolamento, dovuto ai vari moti vorticosi presenti in camera, tra i gas combusti e alcune particelle che devono ancora completare il fenomeno di ossidazione, fase importante per evitare l'espulsione di idrocarburi incombusti o particolato. [2]

Sintetizzando il processo di combustione è possibile distinguere quattro fasi:

1. *Ignition Delay AB*: è la frazione di tempo che intercorre tra l'inizio dell'evento di iniezione (SOI: Start of Injection) e la prima accensione del combustibile (SOC: Start of Combustion). Questo ritardo è dovuto a fenomeni fisici (tempo necessario al combustibile per riscaldarsi e mescolarsi con l'aria) e fenomeni chimici (preazioni e formazione di composti intermedi che porteranno successivamente all'autoaccensione)
2. *Premixed phase BC*: questa fase inizia con l'accensione dei primi nuclei (SOC) e termina quando si è completata la combustione dell'accumulo di combustibile. In questo intervallo di tempo si assiste ad un notevole incremento della pressione e del rilascio di calore termico, segnale che l'accumulo di combustibile brucia molto rapidamente (6-8% di combustibile in 1° di angolo di manovella). La rapidità di questo processo è ottima dal

punto di vista del rendimento ma crea un problema di *rumorosità* e di forte sollecitazione degli organi meccanici, problemi tipici dei motori diesel.

3. *Mixing controlled phase CD*: è l'intervallo di tempo tra la fine della combustione dell'accumulo e la fine dell'evento di iniezione. Le temperature e le pressioni decrescono rispetto alla fase precedente. Il problema di questa fase è far sì che tutto il combustibile trovi l'ossigeno necessario a completare il processo di ossidazione. Se così non avviene, si formano degli scheletri carboniosi (soot) che saranno la base per la formazione del particolato.
4. *Late combustion phase DE*: è la fase di completamento della combustione. L'iniezione è terminata ma vi sono ancora in atto processi di ossidazione che si esauriscono gradualmente. Questa fase è governata dai moti turbolenti presenti in camera (moti di *swish, squish, tumble*) e permette ad alcuni scheletri carboniosi formati nella fase precedente, di terminare la combustione.

Per avere una combustione efficiente è fondamentale che essa avvenga tutta in prossimità del PMS.

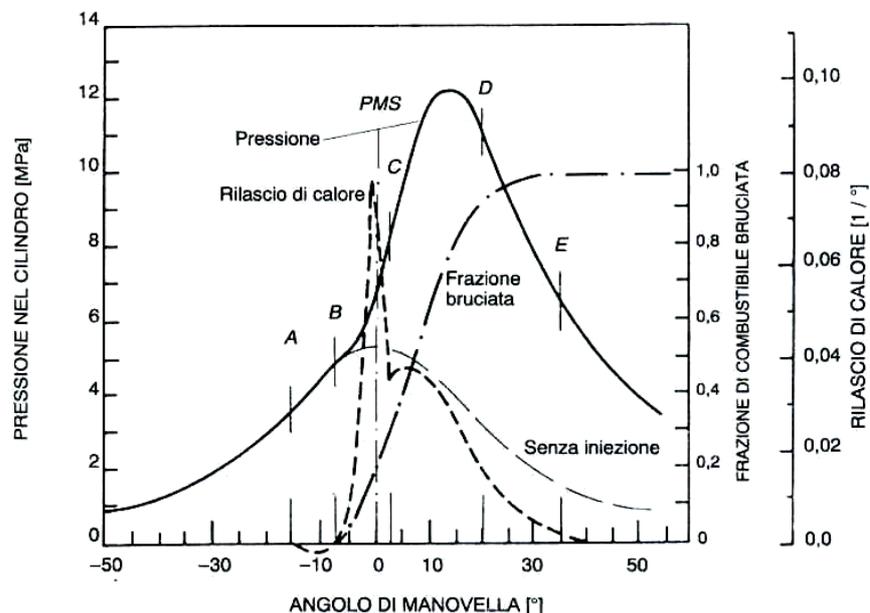


Figura 3 – Analisi delle curve di pressione, rilascio di calore, frazione di combustibile bruciata con attenzione al punto di anticipo di iniezione rispetto al PMS

Allo scarico, ritroveremo dei gas incombusti formati da diversi inquinanti primari.

1.1.2 OSSIDI DI AZOTO NO_x

Sono costituiti per circa il 95% di ossido nitrico NO e per il restante 5% di ossido nitroso NO_2 che si forma a partire da NO con processi che avvengono anche post immissione dei gas incombusti nell'atmosfera. L'NO è un gas incolore, non tossico, mentre l' NO_2 presenta un colore rossastro in forma gassosa, che tende al giallastro quando questo inizia a condensare. Gli NO_x producono sull'uomo affezioni alle vie respiratorie e sono responsabili, insieme all'acido solforico, del fenomeno delle piogge acide; sono inoltre i principali responsabili dello smog fotochimico che trae origine dalla riduzione dell' NO_2 in NO e ossigeno atomico in atmosfera: l'ossigeno atomico si combina con quello molecolare formando molecole di ozono O_3 che è benefico per l'atmosfera perché capace di filtrare i raggi ultravioletti, ma un potente inquinante a livello del suolo in quanto si attacca a vernici, gomme e plastiche ed è inoltre irritante a livello degli occhi. Gli NO_x si formano in camera di combustione e il loro processo di formazione è favorito dalle elevate temperature ($\cong 1500$ K) e dalla presenza di una miscela povera (ricca di ossigeno); avviene prevalentemente in quella fase precedentemente descritta come *premixed phase* e in particolare nelle primissime fasi di propagazione del fronte di fiamma, quando il rilascio di calore è al suo picco e la presenza di ossigeno a contatto con il combustibile è elevata. Per cercare di ridurre la formazione di tale inquinante si cerca di ridurre i picchi di rilascio esotermici del processo, nonché di creare una temperatura di combustione meno elevata evitando picchi a temperature elevatissime: questo si attua frazionando il fenomeno di iniezione in più eventi, ovvero introducendo prima dell'iniezione principale una pre-iniezione detta *iniezione pilota*, nella quale si inietta circa il 5% del combustibile totale in anticipo rispetto al PMS, favorendo le prime fasi di combustione e creando la temperatura ideale affinché il combustibile iniettato successivamente possa bruciare fin da subito senza accumularsi e poi "esplodere", evitando di creare quei picchi di rilascio termico visti nel grafico precedente.

1.1.3 IDROCARBURI INCOMBUSTI HC E MONOSSIDO DI CARBONIO CO

Le particelle di HC e di CO sono potenzialmente cancerogene e sono generate da una combustione incompleta del combustibile e dalla presenza di olio lubrificante. Questi fenomeni avvengono per svariati motivi, i principali sono la presenza di interstizi nella camera di combustione, i quali vengono occupati dal combustibile ma in carenza di ossigeno, non permettendo quindi un'ossidazione completa; o zone della camera di combustione troppo fredde nelle quali i processi di combustione si "congelano", bloccando le reazioni chimiche prima che possano essere completate; o ancora da getti di combustibile che penetrano nel film di olio lubrificante presente sulle pareti della camera e non prendono parte al processo di combustione, per poi essere rilasciate successivamente quando il pistone si trova ormai lontano dal PMS. Tuttavia, i motori diesel odierni, lavorando costantemente in eccesso di aria e con rendimenti di combustione sempre più elevati, hanno ridotto notevolmente questi fenomeni, che sono quindi difficilmente sensibili ad ulteriori riduzioni.

1.1.4 OSSIDI DI ZOLFO SO_x

Sono costituiti per circa il 95% da anidride solforosa SO₂ e per il restante 5% da anidride solforica SO₃. Sono irritanti per le mucose, hanno un odore sgradevole, reagiscono con l'acqua provocando il fenomeno delle piogge acide, le quali esercitano un'azione corrosiva su monumenti e costruzioni in genere, danneggiando inoltre anche la vegetazione. Tali effetti nocivi sono particolarmente pericolosi se le emissioni avvengono in prossimità delle coste, meno se avvengono in mare aperto dove gli SO_x entrano facilmente in contatto con l'acqua del mare e quindi vengono neutralizzati, data l'elevata alcalinità di quest'ultima. In ogni caso, gli SO_x compromettono il funzionamento di un eventuale sistema di post trattamento: sono responsabili del cosiddetto "avvelenamento" degli agenti catalitici, compromettendo definitivamente il funzionamento di questi. La formazione di SO_x avviene in camera di combustione dall'ossidazione dello zolfo presente nei combustibili. Se nel mondo della trazione terrestre i combustibili sono ormai privi di zolfo, nel campo navale questo processo è avvenuto in differita soprattutto per i motori *low speed* di grossa cilindrata 2T: lo zolfo è infatti un agente lubrificante molto importante e sostituire i combustibili senza prendere provvedimenti è un'azione pericolosa in quanto porterebbe al grippaggio e alla conseguente

rottura dei motori. I motori *medium-high speed* funzionano ormai con combustibili quasi identici al gasolio utilizzato per la propulsione terrestre, quindi praticamente privi di zolfo.

La regolamentazione delle emissioni tiene conto dei fattori sopra elencati. Come vedremo successivamente nel dettaglio, sono state delineate delle aree geografiche denominate aree *SECAs* (*Sulphur Emission Control Areas*) nelle quali le limitazioni sono particolarmente restrittive.

1.1.5 PARTICOLATO PM

E' una complessa unione di particelle carboniose con diametro minore di $1\mu\text{m}$, denominate *soot*, la cui formazione ha origine in quelle zone della camera dove la combustione avviene con miscele troppo ricche (povere di ossigeno) che non permette l'ossidazione dell'intero getto di combustibile. La pericolosità di questo elemento risiede proprio nella dimensione ridotta delle particelle, capaci di penetrare nelle vie respiratorie e raggiungere i polmoni, dove causano danni soprattutto negli anziani e nei bambini. E' composto da una frazione solida (SOL), costituita dagli elementi carboniosi e le ceneri, da una parte solubile (SOF) costituita da composti organici che possono derivare dal combustibile o dall'olio lubrificante, ed infine dai solfati (SO₄) che possono derivare dall'acqua o dagli acidi solforici.

La composizione del particolato è qualcosa che varia al variare delle condizioni operative del motore (carico e velocità di rotazione) e risulta impossibile conoscere a priori le percentuali di SOL, SOF o SO₄ o il diametro delle particelle. Ad esempio, la formazione di *soot* può ritenersi trascurabile agli alti e medi carichi mentre non lo è a basso carico. A bassi carichi infatti vi è una turbolenza poco accentuata e una minore pressione di iniezione (non se il motore è fornito di *common rail*), condizioni sfavorevoli al combustibile al fine di completare i processi di ossidazione (favorito dal contatto e il mescolamento tra le molecole di aria e quelle di combustibile) formando così scheletri carboniosi; è un problema rilevante perché è ciò che avviene nelle fasi di manovra di una nave, all'interno di aree portuali vicino alle zone urbane dove il problema dell'inquinamento è grave, quando il motore è spesso costretto a lavorare ai bassi carichi.

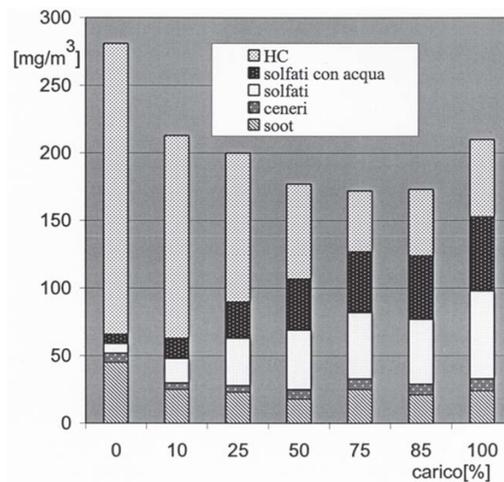


Figura 4 – Variazione della composizione del particolato in funzione del carico [2]

Un'altra fase gravosa nella formazione del particolato è l'avviamento a freddo, dove le temperature raggiunte non sono sufficienti per favorire la combustione.

Per quanto riguarda la quantificazione del particolato, vi sono diverse metodologie di misurazione: le principali sono la misurazione del numero di fumo attraverso il *fumimetro*, dove un quantitativo di gas di scarico viene fatto passare attraverso un filtro cartaceo e viene misurata la differenza di intensità di luce riflessa dal foglio prima e dopo la misurazione; l'*opacimetro*, il quale stima la massa di particolato partendo dall'intensità luminosa di una sorgente e misurando il grado di opacità dei gas di scarico; altri metodi più sofisticati come il *CPC (condensation particle counter)*, l'*ELPI (electrical low pressure impactor)* o l'*SMPS (scanning mobility particle sizer)*, questi ultimi in grado di misurare le dimensioni delle particelle di particolato e non solo la massa, importanti per le ultime normative che normano anche le particelle di diametro inferiore a 0,4 µm.

1.1.6 GAS SERRA

Si tratta dei Greenhouse gas (GHG), intervengono nel bilancio fra la radiazione solare incidente riflessa e assorbita. Il nostro pianeta assorbe radiazioni solari, portandosi ad una certa temperatura, e a sua volta emette radiazioni, come un corpo nero. L'effetto negativo dei gas serra avviene proprio in questa fase di "riflessione": parte della radiazione emessa dalla terra può tornare indietro per effetto di questi gas, causando un ulteriore incremento di temperatura del

pianeta. L'effetto serra è sempre esistito ed ha permesso lo sviluppo della vita sul pianeta, ma variando la concentrazione di questi gas si altera un equilibrio delicato, causando un riscaldamento globale. A differenza degli inquinanti, non è importante in che zone del pianeta i gas serra vengano emessi, perché si disperderanno in ogni caso nell'atmosfera. I principali gas serra sono l'anidride carbonica CO₂, il metano, e l'ossido di diazoto N₂O, quest'ultimo provoca un effetto diretto sul riscaldamento globale.

Non è semplice calcolare il potere di una sostanza in termini di *effetto serra* poiché somma di tanti fattori causati direttamente o indirettamente, per l'inerzia dei fenomeni primari, dai gas serra. È stato appositamente introdotto un *Climate Forcing*, ovvero una misura della capacità di una sostanza di produrre un effetto radiattivo, misurato in W/m². Attraverso il *GWP (Global Warming Potential)* si misura la potenzialità dell'effetto di riscaldamento confrontandolo ad un quantitativo analogo di CO₂: per esempio il metano a un GWP = 21, equivale a dire che un grammo di metano ha lo stesso effetto di 21g di CO₂. L'N₂O ha un GWP di 310. Questo è il motivo per cui bisogna far attenzione quando si parla di motori a metano capaci di emissioni vantaggiose, poiché è vero che vengono emessi meno fattori inquinanti, ma il metano utilizzato è un gas serra più potente dell'anidride carbonica.

La CO₂ è un prodotto naturale della combustione, non un fattore inquinante, e l'unico modo per produrne di meno è consumare meno combustibile: si parla quindi di *fuel economy*. Ecco perché si cercano di introdurre sistemi di propulsione alternativi, come gli ibridi diesel – elettrici, dove combinando motori elettrici e a combustione interna si cerca di far funzionare quest'ultimi in punti di miglior rendimento termodinamico, evitando sprechi di combustibile.

1.2 LE NORMATIVE

La regolamentazione degli inquinanti nel campo della propulsione navale deve tenere conto di diversi aspetti che non esistono nella trazione terrestre: non si può non considerare, ad esempio, che il campo di esistenza dei motori installati a bordo è molto più esteso in termini di potenza o che il traffico marino copre un'area superficiale molto più estesa o ancora che le tipologie di rotte da percorrere sono diversissime tra di loro. Consideriamo ad esempio le cosiddette *bulk carriers* (in italiano portarinfuse), navi usate per il trasporto di carichi non-liquidi e non unitarizzati in container, dotate di motori diesel 2T *low speed*, le quali percorrono rotte oceaniche di cui il 90% si svolge in mare aperto. Volendo limitare le emissioni di NO_x o di SO_x in un determinato continente, o in una sola regione (come accade per l'autotrazione), bisogna tenere conto che queste navi dovranno rispettare le limitazioni di entrambi i porti in cui approdano. O nel caso più specifico dell'SO_x, che si limita eliminando lo zolfo dal carburante, bisogna tener conto che in mare aperto le emissioni di SO_x sono molto meno pericolose e sarebbe inutile rivoluzionare completamente le tipologie di motore in modo da adattare ad un combustibile senza zolfo (come detto in precedenza, lo zolfo è un importante lubrificante ed eliminarlo vorrebbe dire dover inserire ulteriori organi di lubrificazione esterni, operazione non sempre facile per motori di cilindrata di migliaia di litri). Le navi che non attraversano gli oceani, come i traghetti passeggeri o i vaporetto veneziani (veicoli che analizzeremo nel dettaglio), svolgono il loro servizio costantemente nei pressi della costa, o passando tra i canali della città, in aree ad elevata densità urbana. Queste imbarcazioni sono dotate generalmente con motori Diesel 4T *medium-high speed*, simili ai propulsori terrestri (ad esempio i vaporetto sono equipaggiati con motori di circa 9l, con una potenza ridotta 200kW), dovrebbero quindi essere soggette a norme restrittive più stringenti (le normative ad oggi non fanno nessun riferimento alla similitudine a motori terrestri, ma ACTV sapendo di lavorare in ambito prettamente urbano ha deciso di far rispettare le normative più severe attualmente in vigore come le norme sulle acque interne, anche se non ne sarebbe soggetta). Tali limitazioni possono anche essere differenti da una nazione all'altra, data l'unicità del servizio di queste navi (un vaporetto non farà mai servizio in una città diversa da Venezia poiché è stato progettato per funzionare lì, e così tanti altri esempi in città differenti).

L'organismo internazionale responsabile di regolamentare tutti i fattori esposti in precedenza e di emanare le normative prende il nome di *International Marine Organization* (IMO). Fondato nel 1948 a Ginevra, inizialmente con il nome di *Inter-Governmental Consultative Organization*, è ufficialmente riconosciuto in tutti i paesi dotati di flotte mercantili e si occupa di emanare direttive non solo per l'inquinamento *lato aria* e *lato acqua*, ma anche per la regolamentazione della sicurezza di navigazione. Vedremo nei paragrafi successivi le normative attualmente in vigore note fino al 2021 [3]. Non sono ancora noti ufficialmente quali saranno i successivi valori di limitazione, ma il panorama mondiale non può che far pensare ad un trend sempre più restrittivo, per questo molti fondi vengono investiti nella ricerca di nuove tecnologie.

1.2.1 AREE ECAS

Le *Emission Control Areas*, dette anche aree *SECAs* (*Sulphur Emission Control Areas*) sono delle zone marittime nelle quali vigono norme restrittive più rigorose per ridurre al minimo le emissioni atmosferiche delle navi. Le emissioni includono in maniera specifica l' NO_x , l' SO_x , l'ODS (ozone-depleting sustancens, ovvero quelle sostanze che provocano un aumento dei livelli di ozono) e le VOCs (volatic organic compounds, sostanze chimiche organiche con temperature e pressione superiori a quelle ambiente). Le normative sono entrate in vigore a Maggio del 2005[4], anche se decise nel 1997 quando a Londra fu emanato l'*annesso VI*. Gli obiettivi di quest'ultimo possono sintetizzarsi in:

- ridurre emissioni allo scarico di NO_x ;
- ridurre la presenza in percentuale di zolfo nei combustibili al fine di ridurre l'emissione di SO_x ;
- proibire l'immissione nell'ambiente di sostanze HFC (idrofluoro carburi) che impoveriscono lo strato di ozono

Nel Luglio 2010 è stato emanato un nuovo *Annesso VI*, rivisto e più rigoroso nei valori limite. Inoltre, le aree ECA stanno aumentando e se fino al 2011 ne facevano parte solo il Mar Baltico, il Mare del Nord, le aree ECA del nord America che includono gran parte degli Stati Uniti e della costa Canadese, e l'ECA dei Caraibi statunitensi, adesso anche il Mediterraneo potrebbe diventare un'area ECA.

E' intuitivo capire che queste decisioni hanno una significativa importanza sui commerci, basti pensare ad una nave che può approdare nelle coste africane ma non può farlo in Sicilia, ad esempio: le compagnie preferirebbero commerciare con stati diversi piuttosto che rivoluzionare la propria flotta (ingenti investimenti).

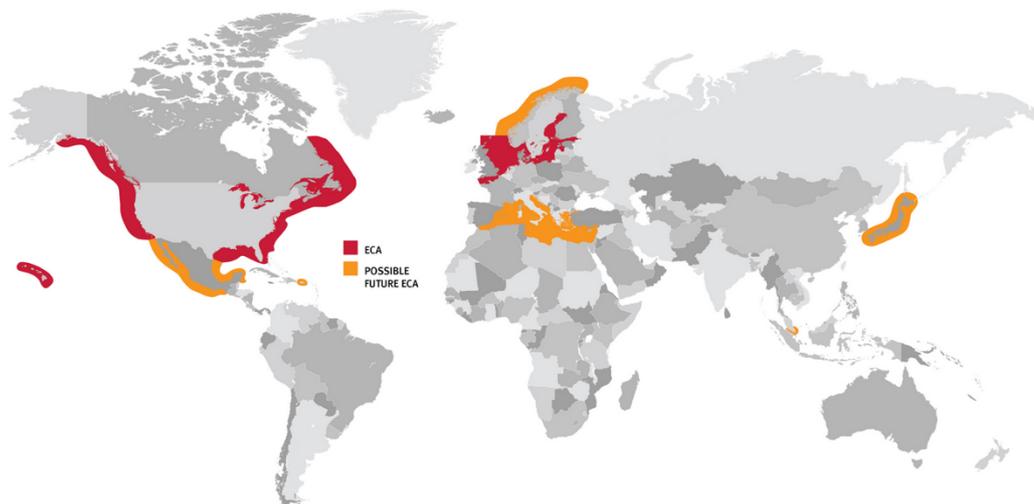


Figura 5 - Aree ECA attuali e possibili aree future

In caso di superamento dei limiti (o di mancanza del certificato adeguato) in alcuni stati è stata imposta una tassa ecologica. In Norvegia, per esempio, da questa tassa è stato creato un fondo per la ricerca [4].

1.2.2 *NORMATIVE IMO – MARPOL*

La convenzione *Marpol*, acronimo che sta per *Marine Pollution*, è nata con lo scopo di ridurre al minimo l'inquinamento del mare derivante da rifiuti marittimi, gas di scarico e idrocarburi. E' entrata in vigore il 2 Ottobre del 1983 [3] e al 31 Dicembre 2001 ben 161 paesi, rappresentanti il

98% del tonnellaggio mondiale, hanno aderito alla convenzione. Tutte le navi battenti bandiera di uno stato firmatario di tale convenzione e costruite successivamente alla sua entrata in vigore, sono soggette a relative prescrizioni a prescindere dal luogo dove navigano e ogni stato è responsabile per le navi iscritte ai propri porti. La convenzione è composta da 20 articoli, 3 protocolli e 6 annessi. In particolare, verrà analizzato l' *annesso VI* – Norme per la prevenzione dell'inquinamento atmosferico da SO_x e NO_x da scarichi dei motori.

Quest'ultimo, come accennato in precedenza, è stato adottato nel 1997 ma è entrato in vigore il 19.05.2005 [3] ovvero 12 mesi dopo il raggiungimento delle condizioni che erano state prefissate per la sua entrata in vigore, ovvero la ratifica da parte di almeno 15 stati che rappresentassero almeno il 50% della stazza mondiale.

Nel 2010 è stato revisionato, in particolare sono state attuate modifiche nella regolamentazione degli NO_x e SO_x e tutte quelle sostanze cosiddette "ozone depleting substances". Le normative prendono il nome di *Tier*.

In termini di NO_x, sono tabellate di seguito le limitazioni vigenti attualmente:

Tabella 1 – Valori del Tier I, II, III [4]

Tier	Date	NO _x Limit, g/kWh		
		n < 130	130 ≤ n < 2000	n ≥ 2000
Tier I	2000	17.0	45 · n ^{-0.2}	9.8
Tier II	2011	14.4	44 · n ^{-0.23}	7.7
Tier III	2016†	3.4	9 · n ^{-0.2}	1.96

† In NO_x Emission Control Areas (Tier II standards apply outside ECAs).

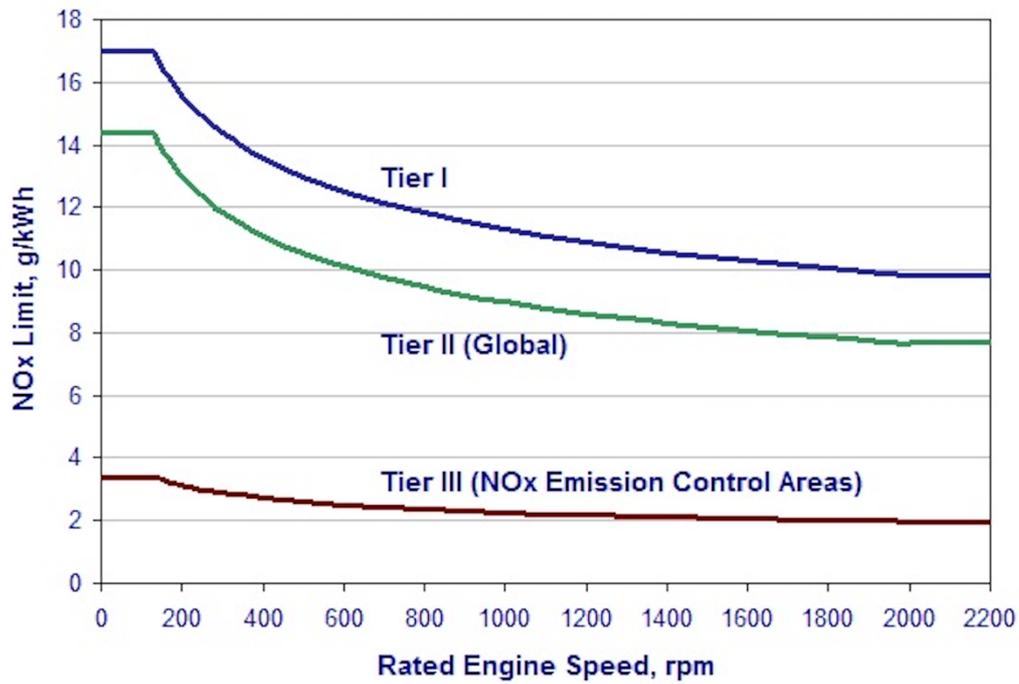


Figura 6 – Quantitativo dei limiti permessi di NOx in funzione del regime di rotazione

Tabella 2

Motori con potenza > 130 kW															
rpm Range	2000 ...	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
	Tier I				Tier II					Tier III					
rpm < 130	NOx = 17,0 g/kWh				NOx = 14,4 g/kWh					NOx = 3,4 g/kWh					
130 < rpm < 2000	NOx = 45 * rpm ^{-0,2} g/kWh				NOx = 44 * rpm ^{-0,23} g/kWh					NOx = 9 * rpm ^{-0,2} g/kWh					
rpm > 2000	NOx = 9,8 g/kWh				NOx = 7,7 g/kWh					NOx = 2,0 g/kWh					
Tenore di Zolfo															
4,50% m/m					3,50% m/m					0,50% m/m					

Tier III è applicabile solo nelle aree ECA. Nei mari dove non è applicato, resta in vigore il *Tier II*. Inoltre, *Tier III* non si applica sui motori di propulsione di navi di lunghezza inferiore a 24m quando sono destinate ad uso diporto.

Per quanto riguarda gli SO_x , le modifiche attuate nel 2010 all'annesso prevedono limitazioni ancora più severe. La vecchia normativa prevedeva fuori dalle aree SECA l'uso di combustibili con un tenore di zolfo non superiore al 4,5% in massa mentre all'interno delle suddette aree il contenuto non doveva superare l'1,5%, con la possibilità di utilizzare in questi casi i cosiddetti *scrubbers*, sistemi di abbattimento degli SO_x che utilizzano l'acqua del mare per ridurre sensibilmente le emissioni non superiori a 6 g/kWh [5]). La normativa approvata riduce il quantitativo a 3,5% fuori dalle aree SECA a partire dal 01 Gennaio 2012 e a 0,5% a partire al 01 Gennaio 2020. Entro le SECA il quantitativo verrà ridotto dapprima all' 1,0% per poi ridursi allo 0,1% a partire dal 01 Gennaio 2015. Questi limiti sono molto restrittivi e l'industria petrolifera si è inizialmente mostrata dubbiosa di poter fornire quantitativi di olio BTZ (Basso Tenore di Zolfo) necessari per soddisfare le esigenze di tutto il trasporto marino. Un'altra via percorribile per l'abbattimento delle emissioni potrebbe essere quella dei sistemi di post trattamento, *SCR* (*Selective Catalyzed Reduction*) per l'abbattimento degli NO_x , e di *scrubbers* per l'abbattimento degli SO_x . [5]

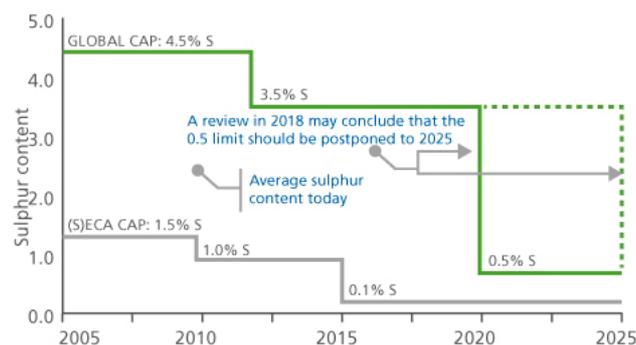


Figura 7 – Contenuto di zolfo permesso nei carburanti [14]

1.2.3 NORMATIVE US – EPA

US -EPA: United States Environmental Protection Agency: è un’agenzia indipendente del governo federale degli Stati Uniti che si occupa della protezione dell’ambiente. Nella tabella seguente vengono riportate le limitazioni che riguardano ogni tipo di motore in termini di cilindrata ed utilizzo.

Tabella 3

Cylinder Displacement	Power Range	Application	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
L < 0,9 kW/L ≤ 35	kW ≥ 37	Commercial		7,5 / 0,4 / 5,0																
		Recreational		7,5 / 0,4 / 5,0																
	kW < 19	All						7,5 / 0,4 / 6,6						4,7 / 0,3 / 5,0						
								7,5 / 0,3 / 5,0												
L < 0,9 kW/L > 35	kW ≥ 75	Commercial														5,4 / 0,14 / 5,0				
	kW ≥ 75	Commercial												5,8 / 0,15 / 5,0						
0,9 ≤ L < 1,2	All	Commercial	7,2 / 0,3 / 5,0											5,4 / 0,12 / 5,0						
		Recreational		7,2 / 0,3 / 5,0											5,8 / 0,14 / 5,0					
1,2 ≤ L < 2,5	All	Commercial	7,2 / 0,2 / 5,0											5,6 / 0,11 / 5,0			5,6 / 0,10 / 5,0			
		Recreational		7,2 / 0,2 / 5,0											5,8 / 0,12 / 5,0					
	kW < 600	Commercial												5,6 / 0,11 / 5,0						
2,5 ≤ L < 5	All	Commercial		7,2 / 0,2 / 5,0																
		Recreational		7,2 / 0,2 / 5,0																
2,5 ≤ L < 3,5	kW < 600	Commercial												5,6 / 0,11 / 5,0			5,6 / 0,10 / 5,0			
		Recreational												5,8 / 0,12 / 5,0						
	kW ≥ 600	All											5,8 / 0,12 / 5,0							
3,5 ≤ L < 7	kW < 600	Commercial												5,8 / 0,11 / 5,0			5,8 / 0,10 / 5,0			
		Recreational												5,8 / 0,11 / 5,0						
	kW ≥ 600	All											5,8 / 0,11 / 5,0							

TIER 2
 TIER 3
 TIER 3+

Valori emissivi [g/kWh]
NOx+HC / PM / CO

Ai fini delle normative sulle emissioni i motori marini sono suddivisi in tre categorie in base alla cilindrata unitaria. Ciascuna categoria rappresenta una diversa tecnologia dei motori. Le categorie 1 e 2 sono suddivise in sottocategorie a seconda dello spostamento e della potenza netta.

Tabella 4

Maximum Engine Power\l	Displacement [l/cyl]	Model Year	PM	NOx	HC	CO
			[g/kW-h]	[g/kW-h]	[g/kW-h]	[g/kW-h]
600 ≤ kW < 1400	All	2017 +	0,04	1,8	0,19	5,0
1400 ≤ kW < 2000		2016 +				
2000 ≤ kW < 3700		2014 +				
kW > 3700	displ. < 15	2014 - 2015	0,12	1,8	0,19	5,0
	15 ≤ displ. < 30	2014 - 2015	0,25			
	All	2016 +	0,06			

PER MOTORI COMMERCIALI AVENTI POTENZA SUPERIORE A 600kW TIER4
 Categoria 1 = motori con cilindrata inferiore a 7 L per cilindro
 Categoria 2 = motori con cilindrata compresa tra 7 e 30 L per cilindro
 Categoria 3 = motori con cilindrata maggiore o uguale a 30 L per cilindro

1.2.4 *NORMATIVA EMEA*

Riguardano le normative per la regolamentazione della navigazione interna e dividono i motori in motori a giri variabili o motori a giri costanti (gruppi elettrogeni) e sono qui di seguito riassunte:

Per motori a giri variabili:

Tabella 5

Range for Stage IIIA		2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Range for Stage V
Cylinder Displacement	Power Range	Stage IIIA													(*) Stage V	Power Range		
L < 0,9	kW > 37	NOx+HC = 7,5 g/kWh CO= 5,0 g/kWh PM =0,4 g/kWh														37 ≤ kW < 75		
0,9 ≤ L < 1,2		NOx+HC = 7,2 g/kWh CO= 5,0 g/kWh PM =0,3 g/kWh														75 ≤ kW < 130		
1,2 ≤ L < 2,5		NOx+HC = 7,2 g/kWh CO= 5,0 g/kWh PM =0,2 g/kWh														130 ≤ kW < 300		
2,5 ≤ L < 5,0	kW < 3300	NOx+HC = 7,2 g/kWh CO= 5,0 g/kWh PM =0,2 g/kWh														300 ≤ kW < 1000		
5,0 ≤ L < 15		NOx+HC = 8,7 g/kWh CO= 5,0 g/kWh PM =0,5 g/kWh														kW ≥ 1000		
15 ≤ L < 20		NOx+HC = 9,8 g/kWh CO= 5,0 g/kWh PM =0,5 g/kWh																
15 ≤ L < 20	NOx+HC = 9,8 g/kWh PM =0,5 g/kWh																	
20 ≤ L < 25	kW > 3300	NOx+HC = 9,8 g/kWh CO= 5,0 g/kWh PM =0,5 g/kWh																
25 ≤ L < 30		NOx+HC = 11 g/kWh CO= 5,0 g/kWh PM =0,5 g/kWh																

(*) Stage V emission values are provision

NOx	HC	CO	PM	PN	Power Range
[g/kW-h]	[g/kW-h]	[g/kW-h]	[g/kW-h]	[#/kW-h]	[kW]
≤ 4,7	5,0	0,30			37 ≤ kW < 75
≤ 5,4	5,0	0,14			75 ≤ kW < 130
2,1	1,0	3,5	0,11		130 ≤ kW < 300
1,2	0,19	3,5	0,015	1x10 ⁻¹²	300 ≤ kW < 1000
0,4	0,19	3,5	0,015	1x10 ⁻¹²	kW ≥ 1000

Per motori a giri costanti:

Tabella 6

Power Range	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Power Range
	Stage II				Stage IIIA						Stage V						
18 ≤ kW < 37	8 / 1,5 / 0,8 / 5,5				7,5 / 0,6 / 5,5												
37 ≤ kW < 75	7 / 1,3 / 0,4 / 5					4,7 / 0,4 / 5									37 ≤ kW < 75		
75 ≤ kW < 130	6 / 1 / 0,3 / 5					4 / 0,3 / 5									75 ≤ kW < 130		
130 ≤ kW < 560	6 / 1 / 0,2 / 3,5					4 / 0,2 / 3,5									130 ≤ kW < 300		
kW > 560	No limits above 560 kW																300 ≤ kW < 1000
																	kW ≥ 1000

Stage II Limit Values [g/kWh]	NOx / HC / PM / CO	Stage IIIA Limit Values [g/kWh]	NOx+HC / PM / CO
≤ 4,7	5,0 / 0,30	≤ 5,4	5,0 / 0,14
2,1	1,0 / 3,5 / 0,11	1,2	0,19 / 3,5 / 0,015
0,4	0,19 / 3,5 / 0,015	0,4	0,19 / 3,5 / 0,015

NOx	HC	CO	PM	PN	Power Range
[g/kW-h]	[g/kW-h]	[g/kW-h]	[g/kW-h]	[# / kW-h]	[kW]
≤ 4,7	5,0	0,30			37 ≤ kW < 75
≤ 5,4	5,0	0,14			75 ≤ kW < 130
2,1	1,0	3,5	0,11		130 ≤ kW < 300
1,2	0,19	3,5	0,015	1x10 ¹⁵	300 ≤ kW < 1000
0,4	0,19	3,5	0,015	1x10 ¹²	kW ≥ 1000

E' importante notare che tutte le limitazioni note terminano nel 2021 e ad oggi non è ancora noto quali saranno i prossimi passi. Il trend sarà sicuramente quello di rendere queste norme più severe, sia in termini di emissioni inquinanti, sia in termini di *fuel consumption*.

La diminuzione di *fuel consumption*, direttamente proporzionale alla diminuzione dei gas serra quindi di CO₂ in particolare, è un tema che viene già affrontato da tempo.

Nel mondo navale sono state attuate diverse contromisure: in fase di design, la ricerca si è concentrata non solo sui propulsori, ma anche in termini di studi di carena, per produrre scafi sempre più performanti capaci di resistere in modo minore all'avanzamento, nello studio dell'accoppiamento carena-motore, al fine di scegliere il motore più efficiente, nell'utilizzo di vernici siliconiche, utilizzate sugli scafi veloci come antivegetative; in fase operativa, invece, si provvede ad una più frequente pulizia delle carene e delle eliche, ad una riduzione della velocità di navigazione e ad una ottimizzazione delle rotte. Ma tutti questi accorgimenti sono limitati e presto non basteranno a soddisfare i limiti che verranno imposti. Per questo, anche nel mondo navale, si parla già di elettrificazione ed ibridazione dei motori. Sempre più progetti prevedono ormai l'utilizzo di propulsori elettrici, o in modalità *full electric*, o in modalità ibride. In questi casi, si dovrà provvedere ad uno studio accurato per capire se l'utilizzo di queste tecnologie porta un beneficio globale in termini di emissioni di CO₂ o soltanto "locale", in altre parole, bisognerà capire se la produzione e lo smaltimento delle batterie e dei componenti di un powertrain elettrico, ciclo

che prende il nome di life cycle assessment, nonché la necessità di manutenzioni più accurate, non comporti uno spreco di energia ancora maggiore di quello legato ai motori a combustione interna

1.3 VENEZIA

“Venezia non è una città come tutte le altre”. Le sue peculiarità urbanistiche ne hanno fatto una delle città più visitate al mondo. La città è adagiata su 100 piccole isole all’interno di una laguna nel mare Adriatico, dove le costruzioni poggiano le loro fondamenta su palizzate di legni atti a trattenere il fango. Nel centro storico della città non esistono strade percorribili in auto, ma il via vai dei trasporti avviene nei canali interni che si intersecano e collegano tutta la città. Bus, taxi, tram, ambulanze, smaltisci rifiuti, le semplici auto, mezzi necessari a tutte le città, a Venezia sono sostituiti da imbarcazioni di svariate dimensioni, ognuna di queste progettata per poter funzionare tra quelle acque uniche al mondo. Progetti unici appunto, che considerano come vincoli progettuali non solo quelli tecnologici inerenti al mezzo in sé, ma anche l’ambiente e le infrastrutture circostanti. E’ difficile infatti attuare cambiamenti architettonici alla città di Venezia, patrimonio dell’UNESCO dal 1987, e si rende quindi necessario adattare tutto il sistema di trasporti. Un esempio è quello dei “waterbus”, che prendono il nome di *vaporetti*, costruiti appositamente per svolgere servizio tra i canali veneziani e il cui gran parte del know-how progettuale è posseduto dalla principale azienda di trasporti, l’ACTV.



Figura 8 – Dettaglio del Canal Grande. In primo piano sulla sinistra un vaporetto ACTV

1.3.1 ACTV

L'Azienda del Consorzio Trasporti Veneziano prende vita nel 1978 raccogliendo l'eredità dei predecessori che dal 1881, anno in cui viene inaugurato il primo vaporetto Regina Margherita, fino a quel momento avevano gestito i servizi di trasporti (ferroviari e marini). L'01 Gennaio 2001 diventa una società per azioni e ad oggi possiede una flotta che comprende circa 580 autobus, 20 tram, 160 imbarcazioni e 150 stazioni galleggianti. Trasporta ogni anno oltre 190 milioni di passeggeri sia nelle zone urbane che in quelle extra-urbane.

Il servizio di navigazione è la parte più interessante dell'azienda, rendendola per alcune peculiarità unica nel suo genere: nessuna azienda nel mondo vanta infatti una numerosità così elevata di ore di navigazione e di passeggeri trasportati. Alcuni dati utili alla comprensione:

- 520.457 ore di navigazione all'anno
- 27 linee che si estendono per una lunghezza totale di 230 km
- 147 milioni di passeggeri trasportati all'anno [6]

Negli ultimi anni l'ACTV ha sviluppato una forte attenzione alle problematiche ambientaliste e la conseguente tutela, rispetto e valorizzazione del patrimonio artistico e monumentale. La flotta

navale infatti non solo rispetta le attuali norme vigenti sulla laguna veneta, ovvero l'IMO Tier 2, ma l'azienda si è imposta limitazioni più severe, motorizzando il 70% delle imbarcazioni minori con nuovi motori common rail, con emissioni paragonabili all'EURO 6 dei motori di autotrazione.

La flotta navale è composta da:

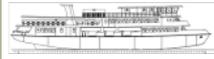
La flotta						
Tipo	Dimensioni [mt]	Stazza [ton]	Passeggeri	Membri Equipaggio	N° Mezzi	
	Ferry-boats	40-70	200-1000	350-1000	6	7
	Motonavi	33-38	170-290	800-1300	5	7
	Motobattelli foranei	21-31	65-130	330-400	2	19
	"Vaporetto"	21	24-25	200-220	2	62
	Motoscafi	19-23	20-25	150-190	2	50
	Motoscafi ad agente unico	8-10	4-5	20	1	8

Figura 9 – Flotta navale ACTV

In questo elaborato, è stato approfondito lo studio del *vaporetto*.

1.3.2 COS'È UN VAPORETTO

Un vaporetto è un'imbarcazione che svolge la funzione di "waterbus" tra le acque dei canali veneziani.

Il primo vaporetto fu introdotto nel 1881 dalla società francese Compagnie des bateaux Omnibus francese, con il nome di Regina Margherita, e da questo evento nacque il trasporto pubblico a Venezia. Il nome *vaporetto* è rimasto intatto da quando queste imbarcazioni viaggiavano a vapore, nonostante le motorizzazioni di adesso siano Diesel. Si caratterizzano per essere imbarcazioni a ponte unico, alcuni aperti a prua, con plancia nel corpo centrale, in posizione lievemente o totalmente appruata. La flotta attuale è composta da vaporetti della *Serie 80* (risalenti al 1978, è la serie più numerosa), *Serie 90* (9 barche del 2000), *Serie 100* (5 barche del 2004) e infine *Serie 110* (10 barche del 2011). Tra una serie e l'altra, l'attenzione è stata focalizzata su un attento studio di carena, sempre più performanti in termini di resistenza d'onda. Questo significa sia un minor moto

urbanistiche della città di Venezia, necessario a progettare mezzi funzionali e adatti alle missioni giornaliere.

Un esempio dell'unicità di questi mezzi è data dalla misura della distanza tra l'estrema prua e la bitta di ormeggio, misura che non ha alcun senso nell'architettura navale ma che in questi mezzi deve avere un'esatta distanza: gli approdi (*waterbus station*) sono fatti in modo tale da permettere l'approdo contemporaneo di vaporetto che navigano in sensi opposti e se questa misura non fosse rispettata, questi colliderebbero tra di loro.



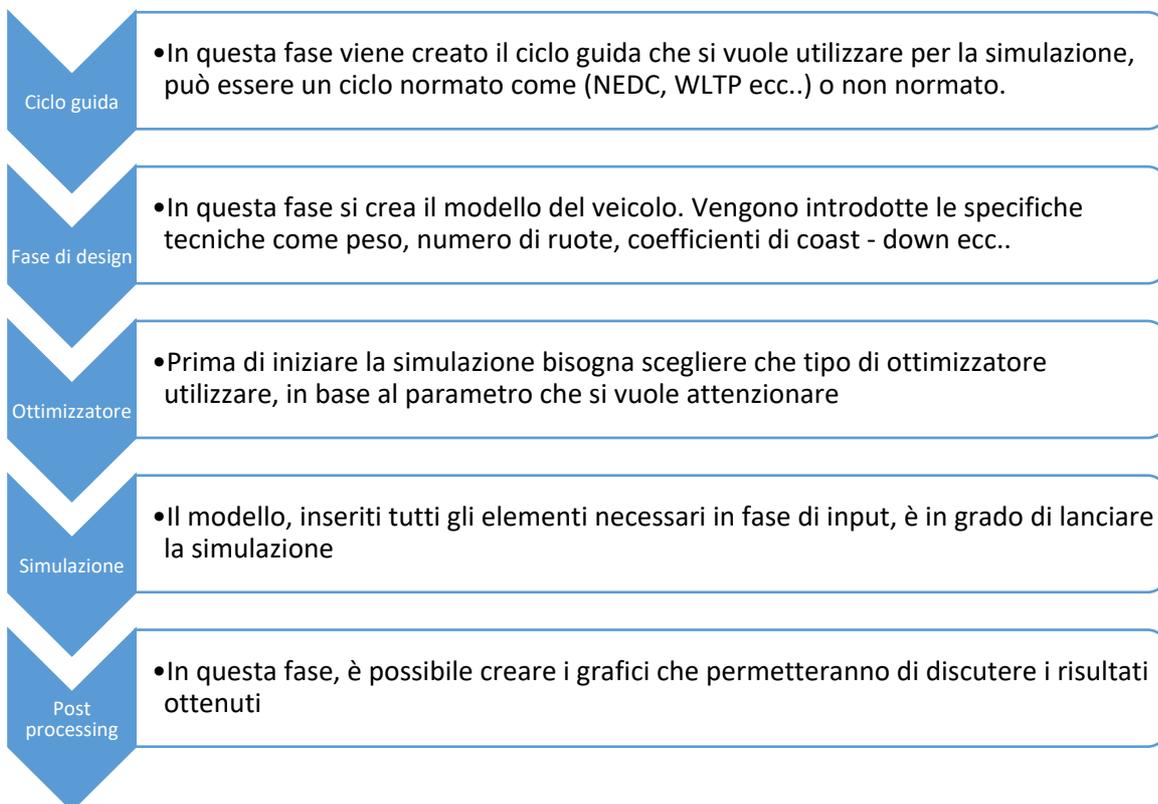
Figura 11 – Dettaglio approdi dei vaporetto. Sulla sinistra, un vaporetto che inizia la fase di approdo

La linea più utilizzata, soprattutto dai turisti è la *Linea 1*, che attraversa l'intero Canal Grande e fa capolinea all'isola di Lido; su questa si è concentrato lo studio, come vedremo successivamente, poiché è quella più interessante a livello di stress dei propulsori, dato il numero di fermate ravvicinate, ed anche in termini di emissioni inquinanti dato che, passando nel cuore della città, la presenza di palazzi di altezza notevole non permette un ricircolo dell'aria come avviene in altre zone, con conseguente aumento locale dei livelli di emissioni.

2. MODELLO: SIMULAZIONI IN ARCHITETTURA CONVENZIONALE

L'oggetto di questo lavoro è stato lo sviluppo di un codice, creato in ambiente Matlab, che possa simulare la percorrenza di un ciclo guida creato appositamente per il caso studio e che permetta l'ottimizzazione di alcuni fattori determinanti come l'emissione di CO₂, la fuel consumption, l'emissione di NO_x o di particolato.

Il codice di partenza è un modello in grado di simulare i veicoli terrestri ed è possibile suddividere il suo funzionamento in 5 fasi:



Verrà analizzato brevemente il modello di partenza.

Per funzionare, il modello necessita di una serie di **variabili di input**: queste sono la *velocità del veicolo*, la *pendenza della strada*.

Vengono poi introdotte delle **variabili di controllo**: sono variabili che devono essere scelte correttamente durante il ciclo guida per minimizzare la funzione obiettivo e sono il *gear number* (i veicoli sono equipaggiati con cambi multimarce) e *i power flow*. Con power flow si intende la

suddivisione della potenza richiesta tra tutte le fonti di energia presenti nell'architettura selezionata (nel caso ibrido, per esempio, come si suddivide la potenza tra motore termico ed elettrico).

Infine vengono introdotte le **variabili di stato**: esse sono essenziali per definire lo stato dei principali componenti dell'architettura e sono composte da *state engine* (il motore termico può essere spento o acceso) e *SOC (State of Charge, ovvero lo stato di carica della batteria)*.

Le **variabili di punteggio** sono invece i parametri che devono essere calcolati per definire la funzione obiettivo da minimizzare, come ad esempio la fuel consumption o le emissioni di NOx. Le variabili intermedie, come la velocità e la potenza richiesta ad ogni componente, devono essere calcolate per ricavare le variabili di punteggio.

L'asse del tempo viene discretizzato in una griglia di intervalli e ogni variabile assume un valore specifico all'inizio e alla fine di ogni intervallo.

Vengono definite le possibili configurazioni, composte da GN, power flow ed engine state. Infine, viene generata una matrice con tutte le possibili configurazioni. Sarà compito dell'ottimizzatore qual è l'insieme di configurazione migliore istante per istante.

Per adattare il modello alla simulazione di un vaporetto, è stato necessario apportare modifiche sostanziali soprattutto nella fase di design, che saranno analizzate nel dettaglio in seguito.

Anche in configurazione "vaporetto", il modello permette il confronto tra una simulazione dell'imbarcazione in architettura convenzionale (*CV* sta per *conventional vehicle*) e quella in architettura ibrida. L'ibrido simulato in questo caso è in architettura *serie*, ovvero il motore collegato meccanicamente all'elica è soltanto quello elettrico (*EM1*), il motore termico (*ICE internal combustion engine*) svolge soltanto il ruolo di ricaricare la batteria. I motivi di questa scelta saranno discussi in seguito. In output, sarà possibile confrontare le due configurazioni in termini di fuel consumption e di emissioni di CO₂. Inoltre, per quanto riguarda l'architettura ibrida, sarà possibile dare una previsione del dimensionamento corretto di tutti gli organi che compongono la driveline, quindi la cilindrata del motore termico, le potenze dei motori elettrici, la dimensione delle batterie, il rapporto di riduzione del riduttore. In sviluppi futuri del modello, verrà verificato se la scelta dell'architettura serie è effettivamente la più conveniente, confrontando i risultati a simulazioni in architettura parallelo.

2.1 PRINCIPI GENERALI DELLA PROPULSIONE NEL CAMPO NAVALE

Prima di introdurre nel dettaglio il modello, è opportuno fare alcune precisazioni che ci permetteranno di capire le differenze sostanziali da un modello in grado di simulare veicoli terrestri da uno sviluppato al fine di simulare il percorso giornaliero di un vaporetto.

La differenza più significativa consiste nella trasmissione del moto: nel caso terrestre il contatto ruota-asfalto permette lo spostamento del veicolo, in ambito navale è invece l'elica (o l'idrogetto, ma non ci occuperemo di questa tipologia di imbarcazioni) a garantire l'avanzamento dell'imbarcazione.

Dalla dinamica, sappiamo che se per un tempo dt applichiamo una forza F ad un elemento di massa dm si produce un aumento di velocità dv :

$$F * dt = dm * (vf - v) \quad (1)$$

Essendo dm/dt uguale alla portata massica possiamo dire che

$$F = \dot{m} * (vf - v) \quad (2)$$

All'azione della forza F esercitata sul fluido, generalmente da un propulsore ad elica, corrisponde una spinta S eguale e contraria, che corrisponde alla spinta trasmessa allo scafo determinandone l'avanzamento. In condizioni di moto stazionario la spinta S eguaglia la resistenza globale R incontrata dallo scafo nell'avanzamento [5]. La potenza necessaria ad una nave per l'avanzamento è determinata da

$$P = S * v = R * v \quad [W] \quad (3)$$

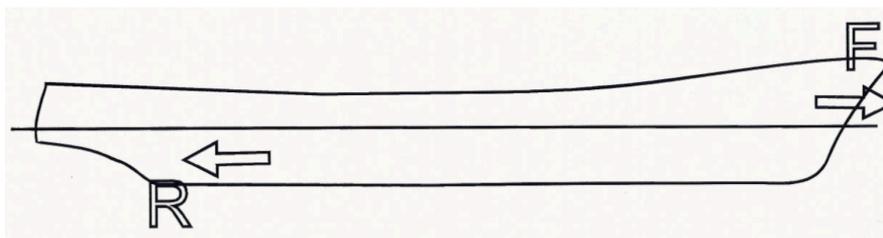


Figura 12 – Per permettere l'avanzamento, la forza di spinta F deve essere maggiore di R

La determinazione della resistenza globale all'avanzamento è influenzata da numerosissimi fenomeni e non è facile ottenere un valore per via analitica [8]. Confrontando con i metodi utilizzati per calcolare la resistenza nei veicoli terrestri, noteremo una numerosità più elevata di variabili.

Nei veicoli terrestri, la resistenza totale all'avanzamento viene determinata con diversi metodi:

Metodo coast – down:

$$F_{res}[N] = F_0 + F_1 v + F_2 v^2 \quad (4)$$

Dove F_0 , F_1 e F_2 sono i coefficienti di coast - down calcolati mediante prove di decelerazione

Metodo dynamic:

$$F_{res} = F_{roll} + F_{grade} + F_{drag} \quad (5)$$

Calcolata la resistenza totale come contributo di una resistenza al rotolamento F_{roll} , una resistenza alla pendenza F_{grade} ed una resistenza aerodinamica F_{drag} .

Tornando all'ambito navale, nel calcolo della resistenza totale di un'imbarcazione possiamo distinguere tre termini:

- *Resistenza d'attrito:* è la risultante orizzontale delle forze tangenziali che nascono nel moto relativo dello scafo rispetto all'acqua.
- *Resistenza viscosa:* il moto altera la distribuzione delle velocità nei contorni dello scafo, con aumento di velocità sui fianchi e successivo rallentamento per attrito negli strati più vicini. Le particelle più lontane sono meno influenzate da questo fenomeno e sopravanzano le prime dando luogo a poppa della nave a intensi moti vorticosi, diminuzione della pressione e nascita di un'ulteriore forza che si oppone al moto della nave
- *Resistenza d'onda:* l'avanzamento di una nave crea a prua e a poppa due sistemi di onde divergenti e trasversali. L'energia spesa per la formazione di questi moti ondosi è fornita dallo scafo all'acqua. [7]

Le prime due variano all'incirca con la velocità con legge quadratica, mentre da dati sperimentali si evince che la resistenza d'onda è proporzionale al dislocamento ed alla quarta potenza della velocità.

$$R_t = R_a + R_v + R_o \quad (6)$$

Riportando l'andamento in funzione della velocità d'avanzamento, si nota che superato un certo valore di velocità la resistenza d'onda assume un'importanza rilevante rispetto alle altre. Si ricordi che 1 nodo = 1,852 km/h.

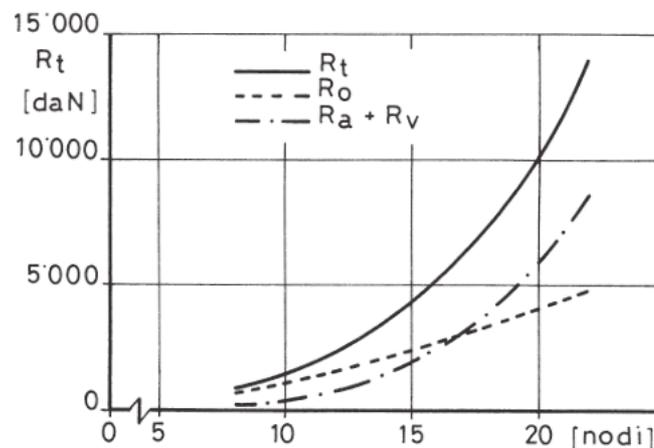


Figura 13 – Curva di resistenza totale, somma delle resistenze d'attrito, viscosa e d'onda.

La maggior parte delle prove per calcolare il valore della resistenza globale è condotta mediante prove sperimentale “in vasca”. Vengono costruiti dei modelli in scala dello scafo che si vuole simulare, e vengono trainati a diverse velocità al fine di determinare la curva di resistenza. Si parla di *serie sistematiche di carena*; i modelli in scala vengono costruiti rispettando parametri di similitudine quali lunghezza L, larghezza B e immersione T. Vengono introdotti dei *coefficienti di finezza*, su cui non ci soffermeremo in un'analisi approfondita, basti sapere che servono a tenere inalterate le forme della carena dal passaggio del modello allo scafo. Per esempio, consideriamo di esaminare una carena di cui conosciamo linee, forme e coefficienti, e questi ultimi hanno valori prossimi ad una carena di una serie sistematica, se i rapporti B/T e L/B cadono negli intervalli della serie, possiamo utilizzare i dati di resistenza globale per la nostra carena in esame. I risultati sperimentali ottenuti con prove su modelli fanno parte di un know-how proprio dell'ingegneria navale, e non sono di difficile reperibilità per i “non addetti ai lavori”.

Immaginando di conoscere la curva di resistenza globale propria del vaporetto, utilizzando per esempio la curva calcolata e pubblicata dal *Prof. Zotti* dell'Università di Trieste [Appendice 1], nella creazione di un modello cinematico che ha il fine di risalire, partendo dalla velocità d'avanzamento dello scafo, alla potenza necessaria all'avanzamento, si avrebbe un problema notevole di sottostima del valore di potenza. Infatti, il valore di potenza trovato si riferirebbe alla velocità di crociera, ma non sarebbero considerate le fasi di transitorio, come ad es. la fase di fermata della nave, fase in cui il vaporetto lavora per la maggior parte del suo percorso. Per fermare lo scafo, è necessario invertire il verso della spinta, passando da un valore positivo di S , con verso contrario alla resistenza globale d'avanzamento R , ad un valore che chiameremo S_i negativo dello stesso verso della resistenza a cui si viene a sommare. Facendo un bilancio avremo:

$$\frac{1}{2}mv^2 = (S_i + R_{att})s \quad (7)$$

Con m che indica la massa del veicolo e v la velocità d'avanzamento; s sarà lo spazio d'arresto, facilmente ricavabile da formula inversa [5]. Bisogna anche dire che la velocità d'avanzamento decrescerà da v a 0, quindi anche il valore della resistenza decrescerà con essa.

$$s = \frac{mv^2}{2(S_i + R_{att})} \quad (8)$$

Per avere un valore accettabile di s , che renda sicura la navigazione, avremo bisogno di un valore S_i notevole, funzione della massa della velocità d'avanzamento. Di questo fattore, sarebbe difficile tenere conto in un modello che ricrea la simulazione di un veicolo terrestre nel quale le fasi di frenata sono gestite da organi meccanici e non da picchi di potenza richiesti al motore. Questo spiegherà alcune scelte, che vedremo successivamente.

2.2 SCHEMA ARCHITETTURA CONVENZIONALE

Per architettura convenzionale si intende quell'architettura che prevede l'utilizzo esclusivamente di un motore termico. In uno schema molto semplificato, rappresentiamo il motore termico ICE, la linea d'assi, l'invertitore-riduttore T ed infine l'elica. Il motore termico trasforma l'energia rilasciata dalla combustione in energia meccanica e la trasmette alla linea d'assi attraverso un

accoppiamento. Durante la trasmissione, una parte dell'energia viene dissipata. Indicando con P_D la potenza disponibile all'elica e con P_B la potenza al freno motore, avremo che

$$P_D = \eta_{ass} P_B \quad (9)$$

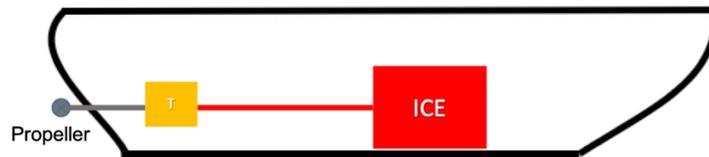


Figura 14 – Schematizzazione semplice di un'architettura convenzionale

Con η_{ass} rendimento della linea d'assi. Quest'ultima può essere formata da diversi alberi (o tronchi) consecutivi e accoppiati tra loro mediante giunti (dipende dal tipo di imbarcazione) ma bisogna avere sempre un rendimento della linea elevato per non dissipare troppa energia.

L'equazione (9) può essere scritta considerando momenti torcenti:

$$2\pi n * M_D = \eta_{ass} * 2\pi n * M_B \quad (10)$$

La linea d'assi è quindi soggetta ad uno sforzo torcente. Ma non è l'unica componente che influisce, infatti la linea d'assi è soggetta a compressione, durante la marcia avanti dove l'elica spinge sul cuscinetto reggispinta, a trazione durante la marcia indietro per via dell'inversione del moto e infine ad una flessione dovuta al peso del proprio albero.

2.2.1 PROPULSORE

Il primo passo per la costruzione del modello è stato reperire le specifiche tecniche di un vaporetto. Come accennato nell'introduzione, il know-how appartiene quasi interamente all'ACTV e senza una collaborazione sarebbe stato impossibile conoscere alcuni dettagli tecnici. I vaporetti di ultima generazione sono equipaggiati con un motore Cursor 9, prodotto da FPT.

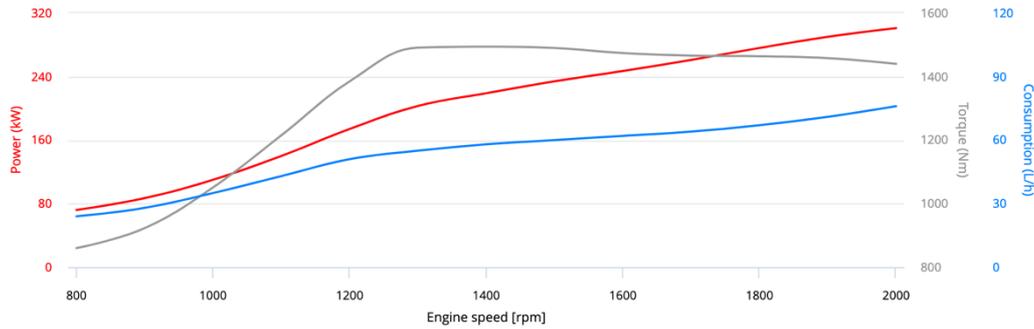


Figura 15 – Curve di potenza, di consumo e di coppia di un Cursor 9 a piena potenza [9]

- Massima potenza: 301 kW
- Massimo valore di coppia: 1494 Nm
- Massimo valore di consumo: 76 l/h [il consumo dei motori navali è generalmente calcolato in litri per ore di navigazione] [9]

La curva raffigurata di sopra è quella di un Cursor 9 normalmente venduto da FPT, e rispetta le normative *IMO MARPOL Tier2*, *IMO MARPOL CHINA*, *EU-IWV Stage IIIA*, *EU-CCNR Stage I*. I vaporetta invece dispongono di gruppi motopropulsori Cursor 9 appositamente calibrati per erogare 200 CV a 2000 giri/min, in conformità con lo standard Rina, con la Direttiva 2004/26 CE *Stage III/A*, sulla navigazione in acque interne e con le norme internazionali più stringenti sulle emissioni inquinanti. Questi motori sono stati scelti per il basso livello di emissioni e le ottime prestazioni.

Tuttavia, non essendo in possesso delle mappe motore di tali motori, per le simulazioni è stato utilizzato un motore Iveco di cilindrata inferiore, scalato appositamente alla cilindrata di 8,7l. Questa è un'importante approssimazione, in primis perché parliamo di un motore stradale, concepito per funzionare in punti completamente differenti rispetto ad un motore marino, in secondo luogo perché è un'operazione di "upsizing" di una mappa pre-esistente, quindi i valori di consumi e di emissioni di inquinanti non saranno precisi.

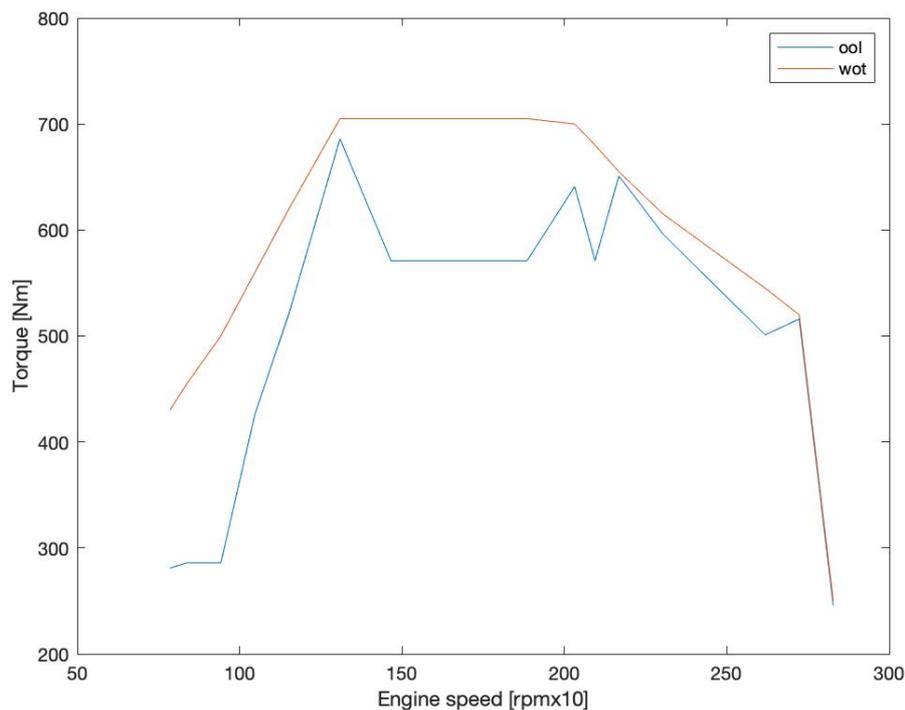


Figura 16 – Curva di coppia del motore utilizzato per le simulazioni

OOL = optimal operating line, si riferisce alla curva che racchiude i punti a minor consumo specifico;

WOT = wide open throttle, indica la curva in condizioni di pieno carico del motore;

In questa configurazione il motore presenta una potenza di picco di 150kW, inferiore ai 200kW del motore realmente equipaggiato. Avremo quindi valori sovrastimati dei consumi e delle emissioni rispetto a quelle reali, ma l'importante è poter confronta l'architettura convenzionale a quella ibrida in termini di riduzione percentuale dei consumi.

2.2.2 INVERTITORE-RIDUTTORE

Tra il motore e l'elica, fa parte della linea d'assi un componente fondamentale: l'*invertitore – riduttore*. Questo componente può essere paragonato in qualche modo alla scatola cambio presente negli autoveicoli, con la differenza che questi ultimi sono equipaggiati di un cambio multimarce capace di adattare la potenza richiesta alle condizioni operative del veicolo. Ad es. un cambio di pendenza genera una richiesta di potenza necessaria all'avanzamento più elevata e per

soddisfarla ingraniamo una marcia più “corta”, che si traduce nell’utilizzare un rapporto di riduzione maggiore tra le ruote e il motore in modo da permettere al motore di funzionare quasi istantaneamente a giri più elevati. In mare non vi sono ovviamente cambi di pendenza, e le variazioni di richiesta di potenza sono limitate ai transitori di manovra e alla necessità di fermare la nave. Per questo la maggioranza delle imbarcazioni non è equipaggiata di un cambio multimarca (in alcuni casi è possibile avere due rapporti di riduzione diversi, che equivalgono a prima e seconda marcia), ma ha un rapporto di riduzione fisso tra motore ed elica, e quest’organo prende il nome di riduttore. Nelle imbarcazioni di dimensioni contenute, questo funziona anche da invertitore del moto, ovvero permette di far ruotare l’elica in senso orario o antiorario, permettendo di invertire il senso della spinta, da cui il nome invertitore. Permette anche di mettere il motore in folle, ovvero di scollegare la linea d’assi dall’elica, per esempio nelle fasi di accensione. Si intuisce che il dimensionamento di quest’organo non è un problema banale. Bisogna capire bene la tipologia di missione che svolgerà l’imbarcazione durante la sua fase operativa. In particolare, si ricordi che un vaporetto è soggetto a circa 600.000 inversioni di marcia in un anno di navigazione, quindi il dimensionamento di quest’organo è di fondamentale importanza per non incorrere in rotture precoci con conseguenti ingenti danni economici dovuti allo stop del servizio.

I vaporetto sono equipaggiati con un invertitore-riduttore con rapporto di riduzione τ uguale a 4.

2.2.3 ELICA

L’ultimo organo meccanico nella catena cinematica è l’*elica*. Un’elica è in grado di trasformare la potenza meccanica di un albero rotante in variazione della quantità di moto di un fluido, al fine di generare una spinta propulsiva. L’elica è formata da *pale*, calettate su un mozzo e collegate all’albero rotante. Le caratteristiche geometriche delle pale definiscono quelle che saranno le caratteristiche tecniche del propulsore. I parametri fisici che ci permettono di intuire il comportamento dell’elica sono:

- *Passo P*: esprime la distanza percorsa dall’elica in un giro
- *Diametro D*: lunghezza tra due estremi delle pale

- *Rendimento elica isolata* η : rapporto tra potenza utile prodotta dal sistema e la potenza assorbita

La scelta dell'elica adatta è di fondamentale importanza per il funzionamento corretto del propulsore. Motore ed elica sono collegati in serie, devono quindi essere accoppiati correttamente per non incorrere in problemi di velocità di navigazione, fasi di accelerazione e frenata e consumo di combustibile. Come visto in precedenza, la caratteristica di carico in termini di resistenza e velocità è di forma quadratica a basse velocità e si impenna fino a diventare una polinomiale di quarto grado per velocità più elevate (Figura 13). Per quanto riguarda l'elica, molte delle conoscenze della prestazione delle eliche sono state ottenute, un po' come gli studi di carena, mediante prove sperimentali in vasca su modelli. Solitamente, si è soliti provare solo l'elica modello, senza porle la carena davanti (in realtà durante la navigazione, la carena provocherà perturbazioni che faranno variare le condizioni operative dell'elica), ovvero in quelle condizioni che prendono il nome di "elica isolata". Si pone l'elica in testa ad una "barchetta" di prova, che reca a prora l'albero di azionamento dell'elica. La prova avviene facendo sì che l'elica "avanzi in un flusso indisturbato con velocità d'avanzo V_A nota" [5] Vengono registrati i valori della spinta S , il momento torcente M_D , e il numero di giri n . L'analisi dimensionale delle grandezze significative porta a definire dei coefficienti adimensionali:

- *Coeff. d'avanzo* J :
$$J = \frac{V_A}{nD} \quad (11)$$

- *Coeff. di spinta* K_T :
$$K_T = \frac{S}{\rho * n^2 * D^4} \quad (12)$$

- *Coeff. di momento* K_M :
$$K_M = \frac{M_D}{\rho * n^2 * D^5} \quad (13)$$

Con D diametro dell'elica. Dai risultati sperimentali si ottengono le curve $K_T(J)$ e $K_M(J)$. Il coefficiente d'avanzo viene mantenuto costante durante la prova e a parità di esso i coefficienti K_T e K_M sono uguali tra l'elica al vero e il modello. Si ottiene un rendimento d'elica che prende il nome "rendimento ad elica isolata" che indicheremo con η_o

$$\eta_o = \frac{K_T}{K_M} * \frac{J}{2\pi} \quad (14)$$

E' riportato un esempio di diagramma:

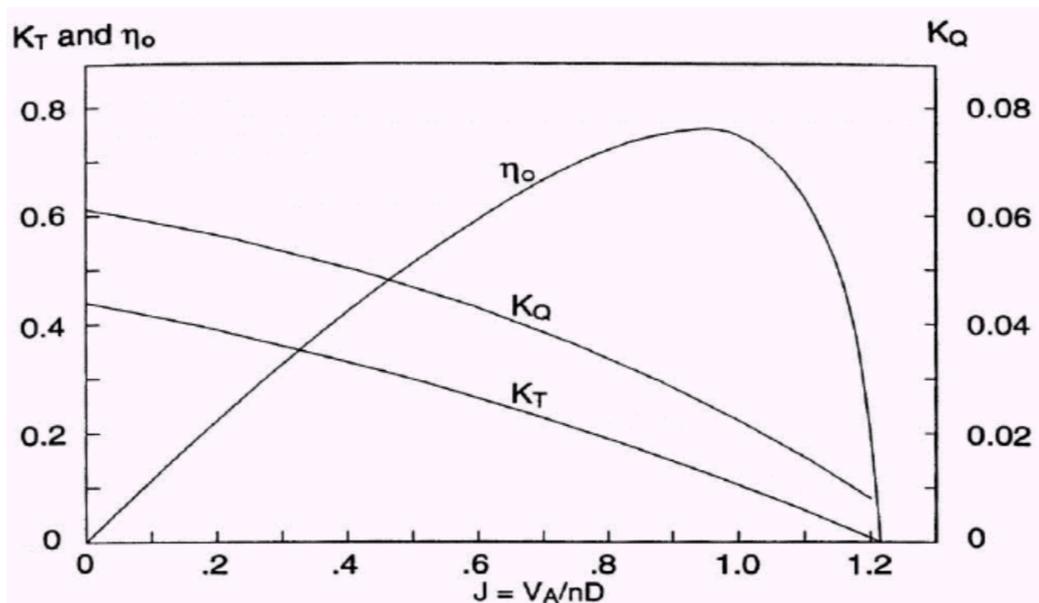


Figura 17 – Diagramma di K_T , K_M e rendimento di un'elica

Questo diagramma ci permette di collegare l'elica e la potenza richiesta al motore.

Senza entrare nel dettaglio dei passaggi matematici, partendo dalla curva di resistenza $R_T = f(v)$ dell'imbarcazione, introducendo opportuni fattori correttivi che tengono conto delle diverse condizioni operative della nave e della dipendenza non lineare tra resistenza e velocità, è possibile definire un fattore di spinta K_{TS} che è indicativo della spinta richiesta dalla nave e sarà anch'esso dipendente dal coefficiente d'avanzo J . Tracciando la curva $K_{TS}(J)$ sul grafico precedente, troveremo un punto di intersezione fra K_T e K_{TS} : quello sarà il punto dove l'elica è costretta a funzionare per soddisfare la richiesta di potenza. Partendo da questo punto si ricava K_M e, noti questi, sarà possibile definire tutte le restanti incognite.

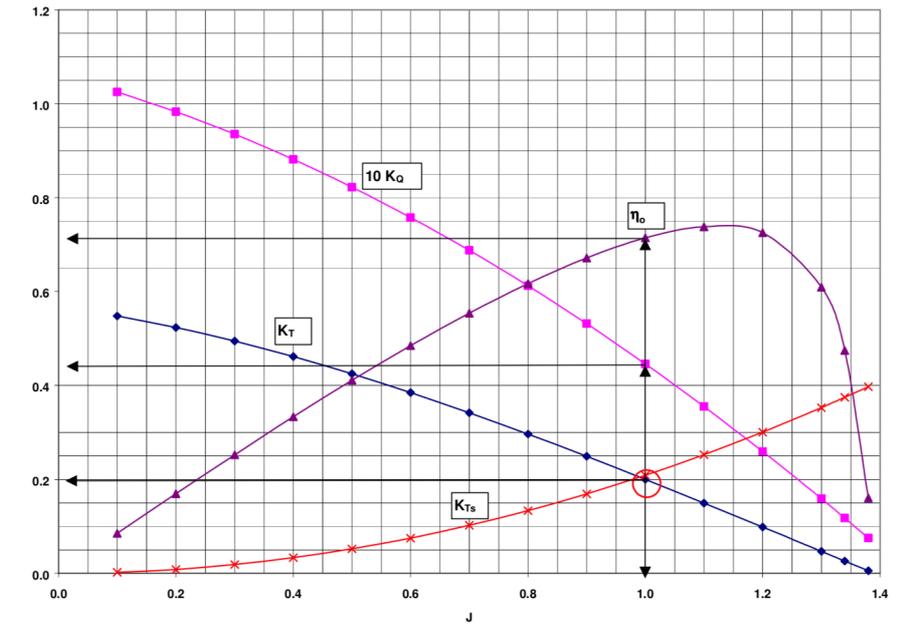


Figura 18 – Punto di funzionamento dell'elica trovato con l'incrocio tra le curve K_{Ts} e K_T

Questo serve a far capire che l'elica va scelta con accuratezza perché, in condizione operative di progetto, serve che il motore funzioni nei punti a massima efficienza. [11]

I vaporetta sono per la maggior parte equipaggiati con un'elica serie B5 1000x1000 dove il primo numero indica la serie di appartenenza, il secondo il passo e il terzo il diametro (in millimetri).

2.3 CICLO GUIDA

Ancora una volta è importante fare una premessa confrontando il caso navale a quello terrestre. In quest'ultimo ambito, esistono diversi cicli guida normati con i quali i veicoli vengono testati al fine di permettere l'omologazione. Diventa quindi interessante lanciare le simulazioni utilizzando questi cicli guida, perché danno un ottimo parametro di riferimento sugli effettivi benefici di un'architettura ibrida anche in fase di omologazione. In ambito navale invece, le omologazioni avvengono in maniera differente: lo scafo deve rispettare determinate norme imposte dai registri navali ma i motori vengono omologati mediante prove a banco nelle quali vengono testati smontati dall'imbarcazione. Quindi è stato ritenuto più interessante creare un ciclo guida apposito per testare il vaporetto. Il ciclo guida scelto è stata la Linea 1, che come detto in precedenza, è la più critica in termini di transitori e di numero di fermate.

Mediante un GPS, è stato tracciato il percorso del vaporetto durante la sua tratta giornaliera

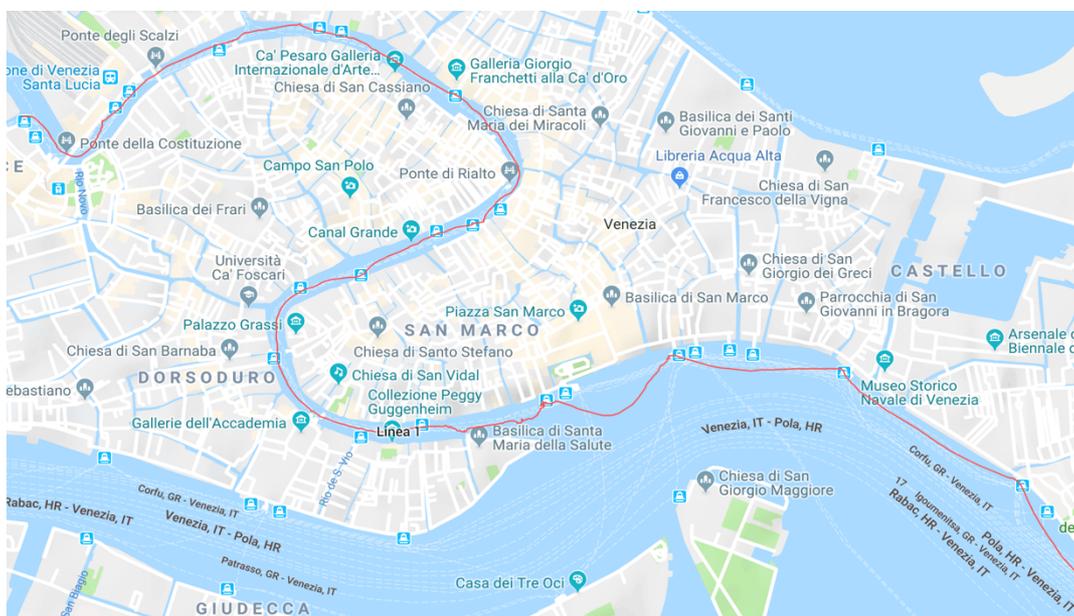


Figura 19 – Traccia GPS del ciclo guida del vaporetto

- **Durata:** 3962 s
- **Lunghezza:** 7,4 km
- **Numero stazioni:** 21

Il percorso in rosso indica la tratta percorsa. Il primo tratto avviene all'interno del Canal Grande, il cuore del centro veneziano, fino ad arrivare a Piazza San Marco, dove il vaporetto inizia un tratto di navigazione in uno spazio lagunare più aperto. Tutto questo si traduce in un grafico di velocità in funzione del tempo

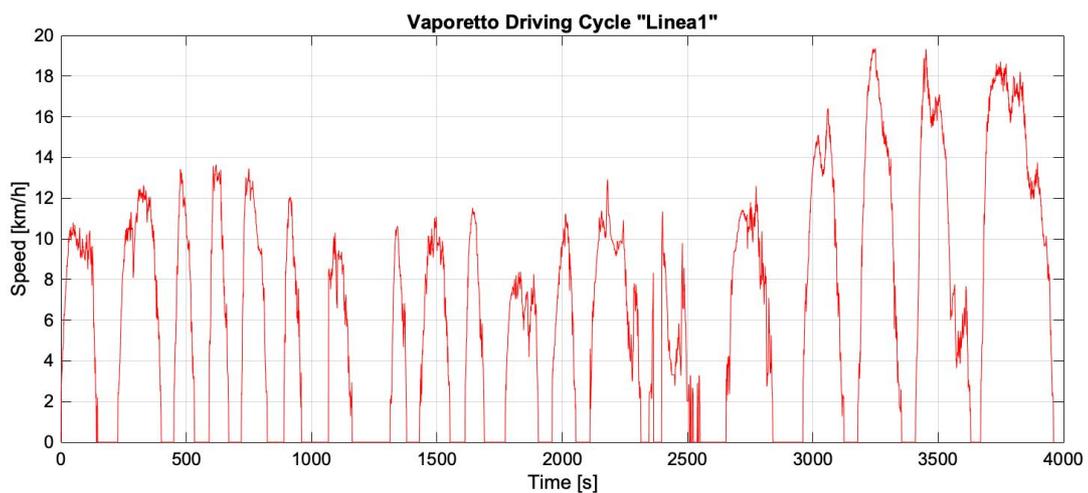


Figura 20 – Profilo della velocità calcolato mediante GPS durante la Linea 1

Il grafico evidenzia la divisione della Linea in due tratti abbastanza diversi tra loro.

Da 0 a $\cong 2750$ s: il vaporetto attraversa il Canal Grande, lo si evince dalle velocità di picco inferiori rispetto ai tratti successivi.

Da 2750s a 4000s: il vaporetto completa la tratta attraversando il tratto lagunare in spazi più aperti, come si nota dai picchi di velocità di $\cong 20$ km/h, limite consentito da normativa.

Si noti come il grafico non presenta lunghi tratti di crociera, in cui la velocità si può ritenere pressoché costante, ma si è continuamente in condizioni di transitorio, come si evince dai “picchi” che il grafico mostra.

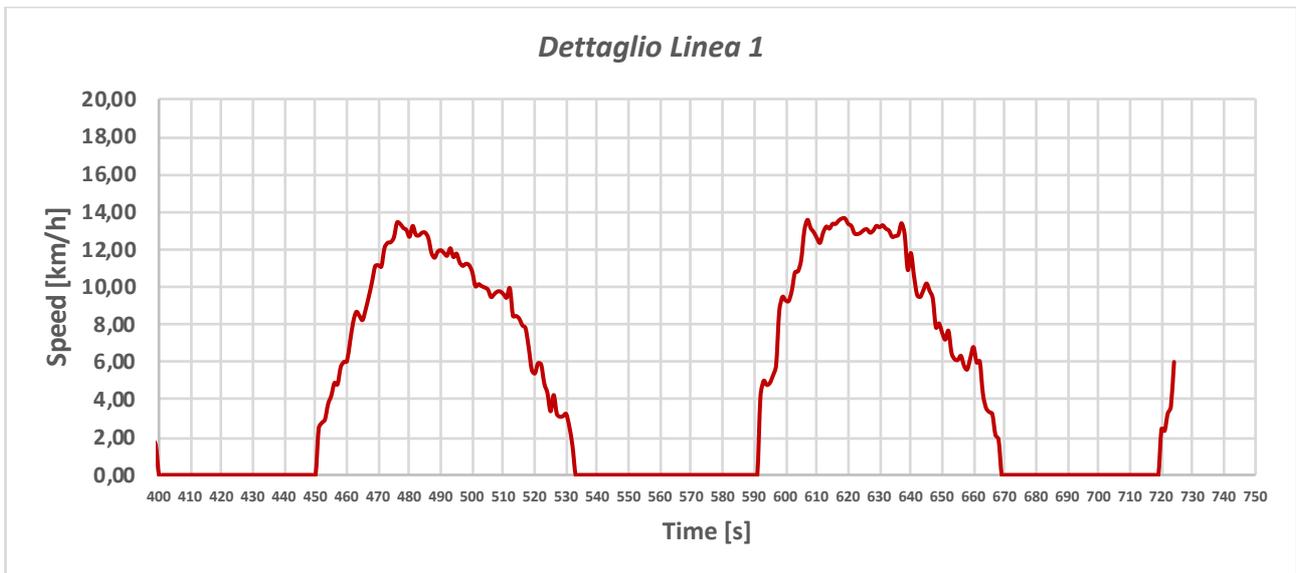


Figura 21 – Dettaglio della prima fase della Linea 1, $400 < t < 730$ s

Analizzando un dettaglio per capire meglio le fasi operative del vaporetto.

Fase di partenza: il vaporetto accelera da 0 a $\cong 7$ km/h in un intervallo di tempo dai 10 ai 20 secondi.

Fase di crociera: il vaporetto naviga ad una velocità media di circa 12 km/h. Questa fase è differente tra la prima parte del ciclo e la seconda. Nella prima, dura $\cong 30 - 40$ secondi e la velocità è ridotta, nella seconda fase del ciclo questa fase dura diversi minuti e richiede una maggiore potenza di navigazione

Fase di decelerazione: l'imbarcazione decelera bruscamente fino a fermarsi. Questa fase dura all'incirca 40 secondi.

Fase di stop: il vaporetto staziona a velocità nulla per circa 30 secondi. In altre parti del ciclo questa fase può durare fino a 2 minuti. E' la fase di discesa-salita dei passeggeri, ed è difficile prevedere a priori la durata poiché dipende dalla numerosità dei passeggeri.

Analizzando meglio la seconda fase di navigazione, quella che porta al capolinea della Linea

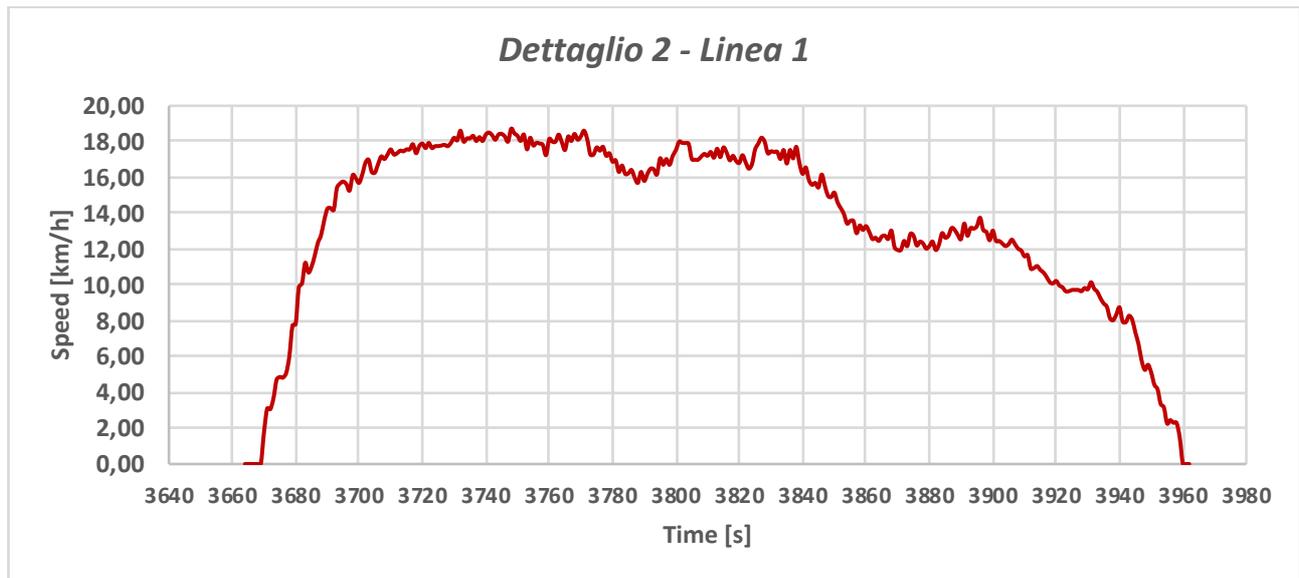


Figura 22 – Dettaglio seconda fase della Linea 1, $3640 < t < 3960$ s

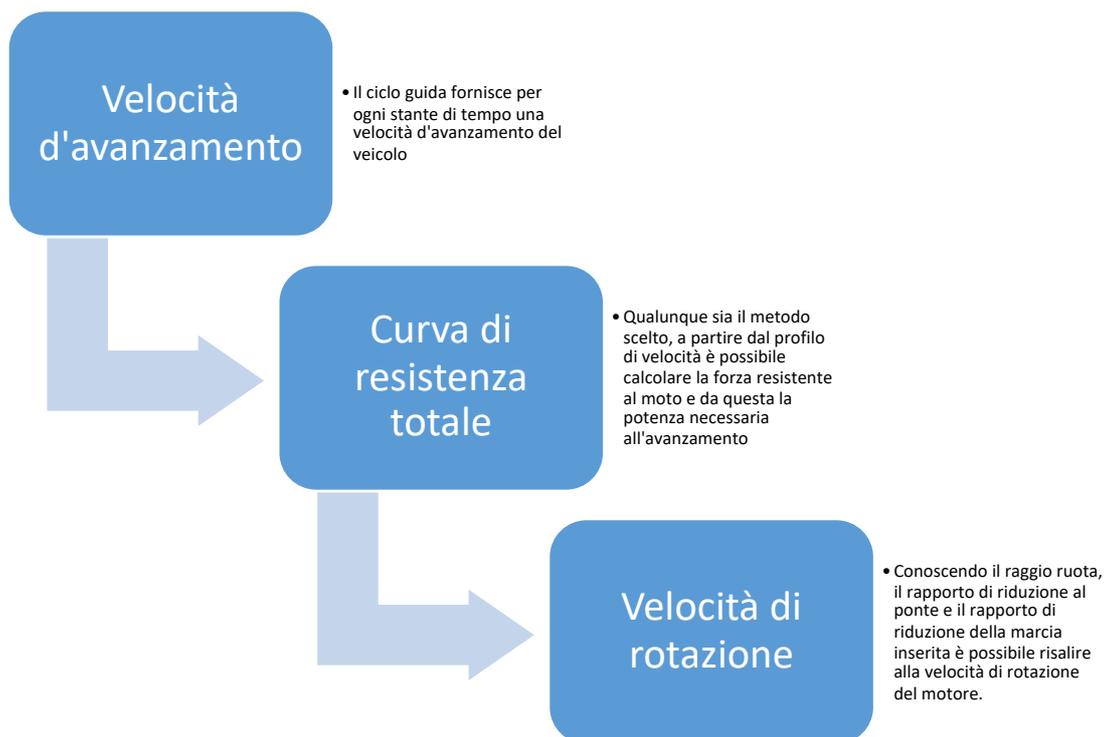
Si nota come la fase di navigazione ha una durata decisamente più importante. Inoltre le velocità di avanzamento sono intorno ai 20 km/h. Vi è una differenza di velocità di crociera rispetto al caso precedente di circa 12 km/h. Questa differenza può sembrare poco significativa, ma ricordando la pendenza della curva di resistenza totale all'avanzamento, per velocità più elevate la polinomiale della curva aumenta di grado, potendo arrivare fino al quarto grado, quindi la potenza necessaria per permettere l'avanzamento aumenterà notevolmente.

Ricapitolando, il ciclo guida può essere considerato composto da due fasi, in una prima fase la criticità è data dall'elevato numero di fermate e l'impossibilità di mantenere una velocità di crociera data la vicinanza tra gli eventi di fermata, nella seconda fase invece le fermate sono più lontane tra loro, la navigazione avviene per più tempo ad una velocità quasi costante ma più elevata della fase precedente, quindi la criticità è data da una maggiore richiesta di potenza per la navigazione.

2.4 RICHIESTA DI POTENZA

Per avviare la simulazione il modello necessita dei valori di potenza richiesti al propulsore per ogni istante del ciclo guida.

Nella simulazione di un veicolo terrestre, il calcolo della potenza veniva eseguito partendo dal profilo di velocità della missione.



Quindi i dati di input necessari sono: velocità istantanea, pendenza della strada, marcia inserita.

Nella simulazione di un vaporetto bisogna necessariamente utilizzare un approccio diverso. In questo caso non vi è ovviamente nessuna pendenza, e si ricordi che il rapporto di riduzione è fisso quindi la variabile di input della marcia inserita non esiste. Questi fattori semplificherebbero i calcoli che il modello dovrà svolgere: meno variabili di input significa una matrice di possibili combinazioni di dimensioni nettamente inferiori (come abbiamo visto, in base alle variabili di input viene creata una griglia di possibili combinazioni di power-flow). Tuttavia, per i motivi analizzati in precedenza, il calcolo della potenza partendo dal profilo di velocità risulta molto

complicato e soggetto a diversi errori di approssimazione. Infatti, non solo sarebbe complesso ricostruire la curva di resistenza esatta, ma risulterebbe difficile considerare richieste di potenza importanti come quelle che si hanno in fase di fermata. Inoltre, vi sono delle richieste di potenza impossibili da prevedere. L'esempio più significativo si ha durante le fasi di discesa-salita dei passeggeri. In queste fasi, la velocità d'avanzamento è zero, tuttavia la richiesta di potenza non è nulla. Il motore viene infatti tenuto "in tiro" per garantire che il vaporetto resti costantemente adiacente all'approdo e non si allontani per via della corrente o di un moto ondoso (sarebbe molto pericoloso per i passeggeri se l'imbarcazione si allontanasse bruscamente). Quindi, l'elica gira, il motore non è al minimo, ma l'imbarcazione è ferma. Non vi è un collegamento strettamente diretto tra la velocità d'avanzamento e la richiesta di potenza. L'unico modo per conoscere istante per istante la potenza, sarebbe registrare dalla centralina motore lo storico delle potenze erogate durante il suo funzionamento in un ciclo guida. In questo caso, si conoscerebbe con esattezza sia il carico che la velocità di rotazione, e sarebbe così determinato con esattezza il punto motore di funzionamento. Questi calcoli sono stati eseguiti da ACTV, ma sono di loro proprietà intellettuale e al momento non divulgabili pubblicamente. Tuttavia, la nostra collaborazione mi ha permesso di visionare alcuni dettagli dei questi calcoli sperimentali.

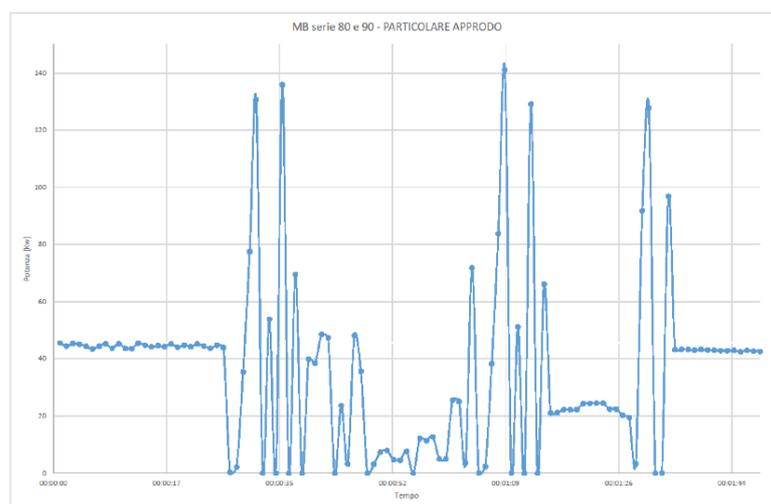


Figura 23 – Particolare approdo reale

In figura è rappresentato un momento particolare del ciclo, quello dell'approdo. L'intera fase dura all'incirca 90 secondi. Si nota subito la presenza di picchi di potenza praticamente istantanei. Sono i momenti di *inversione di marcia*, quando l'elica inverte il proprio senso di rotazione. E' una fase di manovra; confrontandola alla fermata di un autobus è più difficile da ricreare in un modello, perché piena di variabili imprevedibili (soggettività della bravura del capitano nel riuscire a fermare l'imbarcazione con il minor numero di inversioni di marcia possibili, moti ondosi, presenza di altre imbarcazioni in prossimità dell'approdo).

Per mantenere la dipendenza dal profilo di velocità del ciclo guida, ma lanciare una simulazione che non sottostimi la richiesta di potenza, l'idea è quella di ricreare la fase di approdo considerando l'eventualità più critica.

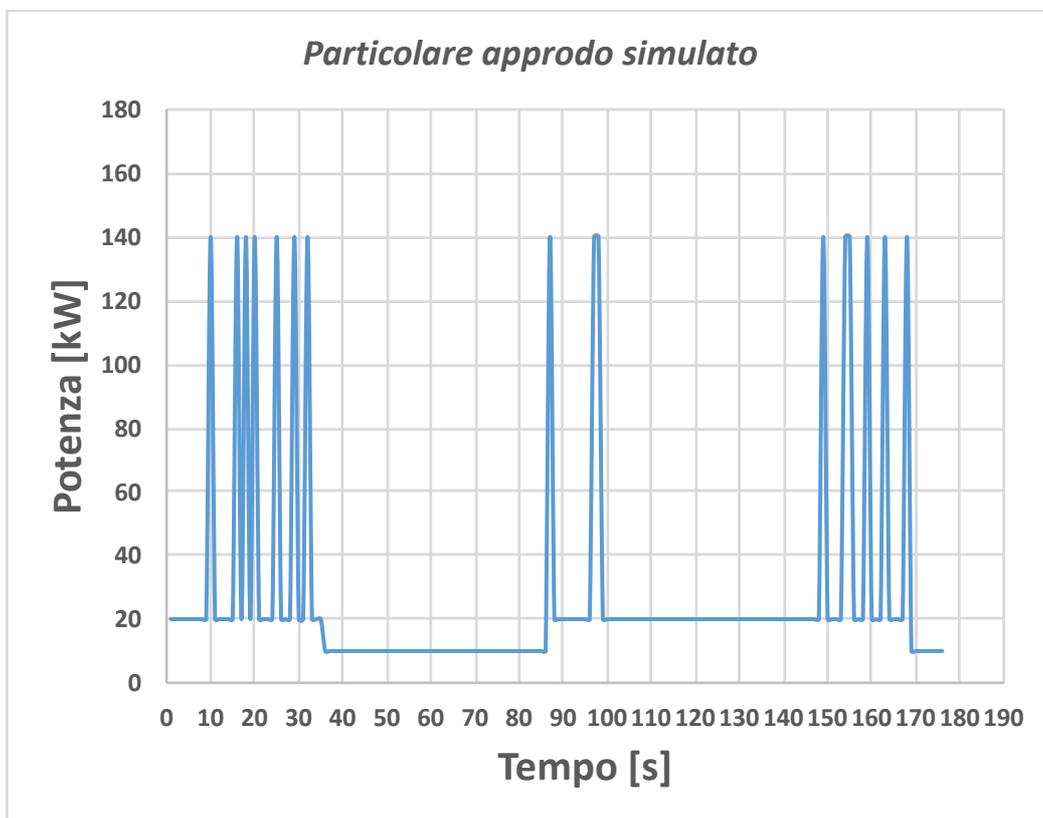


Figura 24 – Particolare approdo simulato

I picchi sono stati simulati di 140 kW, la navigazione 20kW e i momenti di fermo con una richiesta di 10 kW.

Quindi:

1. *Profilo di velocità*: il ciclo guida fornisce istante per istante i valori di velocità
2. *Analisi di deviazione standard*: è stato eseguito il calcolo della deviazione standard per tutti i tratti di navigazione, in modo da capire quale fosse un valore significativo di decelerazione o accelerazione in grado di distinguere i tratti di navigazione dalla fase di approdo
3. *Associazione richiesta di potenza*: non appena il modello percepisce una variazione di velocità significativa, associa un picco di potenza di 140kW, che indica un cambio di rotazione e simula il comportamento reale del vaporetto, sia in fase di fermata che di ripartenza.

2.4.1 ANALISI DEVIAZIONE STANDARD

La deviazione standard σ è un indicatore di dispersione statistico di una distribuzione di valori. E' anche detto scarto quadratico medio. Chiamata N una popolazione di valori avremo che:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (15)$$

$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ è la *media aritmetica* di N

Questo indicatore quanto i valori della popolazione N si allontanano dalla media. Se il valore è grande i valori sono dispersi, se è piccolo sono concentrati intorno alla media. Nel nostro caso le popolazioni sono formate dai momenti di navigazione del vaporetto tra una fermata e l'altra, e l'indicatore serve a capire quale potrebbe essere un valore di accelerazione significativo.

Sono state riportati i tratti più significativi dei tratti di navigazione analizzati. Dalla fermata 1 alla 16, rappresentati il primo tratto di navigazione in Canal Grande, la deviazione standard è inferiore ad uno. Nei tratti alla fine del ciclo invece la deviazione è maggiore di 2, questo perché si affrontano un range di valori molto più ampio, quindi verrà utilizzato un approccio leggermente diverso.

Per quanto riguarda il primo tratto, l'approccio è il seguente.

$$v(i + 1) - v(i) > 1 \quad \longrightarrow \quad P(i) = 140 \text{ kW}$$

$$v(i + 1) - v(i) < 1 \quad \longrightarrow \quad P(i) = 20 \text{ kW}$$

$$v(i + 1) - v(i) = 0 \quad \longrightarrow \quad P(i) = 10 \text{ kW}$$

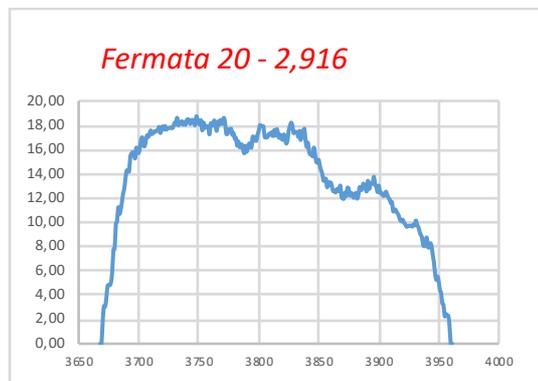
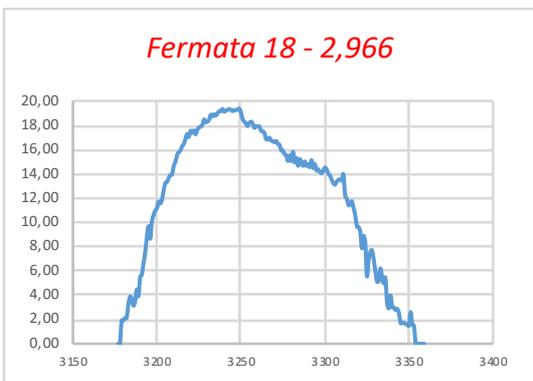
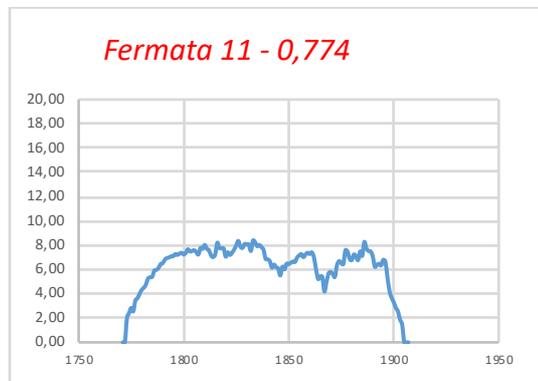
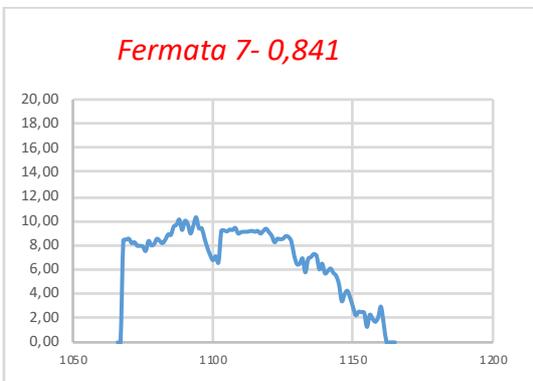
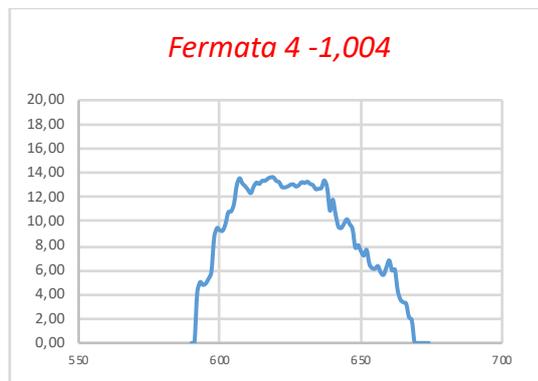
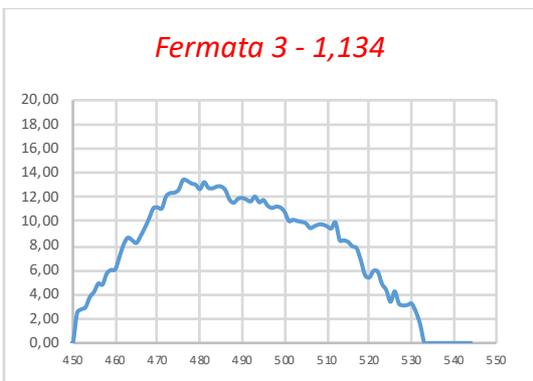
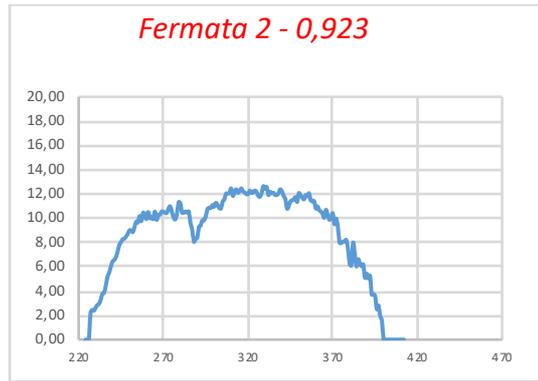
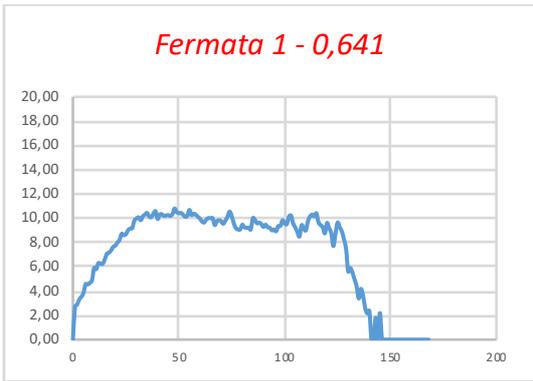
Nel secondo tratto invece, i tratti a navigazione con velocità $> 16 \text{ km/h}$ sono stati associati ad una richiesta di potenza di 120 kW e il valore discriminante non è 1 ma 3, studiato su un diverso intervallo di tempo ovvero:

$$v(i + 3) - v(i) > 3 \quad \longrightarrow \quad P(i) = 140 \text{ kW}$$

Questo procedimento è stato validato mediante un confronto con i dati reali dell'ACTV. Le indicazioni date consigliavano di considerare più o meno 8 cambi marcia per ogni approdo, tra fermata e ripartenza, ed è quello che mediamente si verificherà nella richiesta di potenza simulata.

Di seguito, sono riportati i grafici che riportano il calcolo dello squarto quadratico medio per i momenti di navigazione più significativi e successivamente l'intera richiesta di potenza calcolata.

Table 1



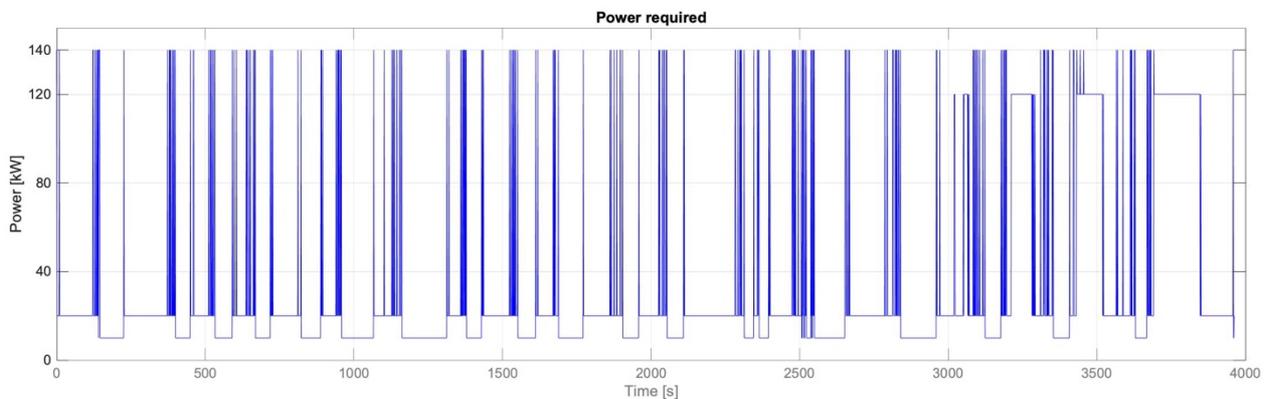


Figura 25 – Richieste di potenza

Si evince chiaramente da questo grafico quanto la condizione di prova analizzata sia molto stressante per un motore, con picchi di potenza richiesti che costringono il motore a funzionare a elevati carichi ma bassa velocità di rotazione, condizione particolarmente sfavorevole per un motore termico.

2.4.2 VELOCITÀ DI ROTAZIONE

Per lanciare la simulazione manca ancora un'informazione ovvero la velocità di rotazione del motore punto per punto. Il modello infatti ha bisogno di conoscere non solo il carico richiesto, ma anche il numero di giri in modo da definire esattamente il punto della mappa motore in cui sta lavorando.

Facendo ancora un confronto con il caso terrestre, questa informazione era di facile reperibilità a partire dalla velocità d'avanzamento del veicolo, noti il raggio ruota, il rapporto di riduzione finale (rapporto al ponte) e la marcia inserita (noti ovviamente i rapporti di riduzione di ogni marcia)

Nel caso analizzato, mancando la possibilità di eseguire un calcolo della velocità di rotazione dell'elica a partire dalla velocità d'avanzamento dell'imbarcazione, la soluzione è stata utilizzare la curva di carico dell'elica con cui il vaporetto è equipaggiato.

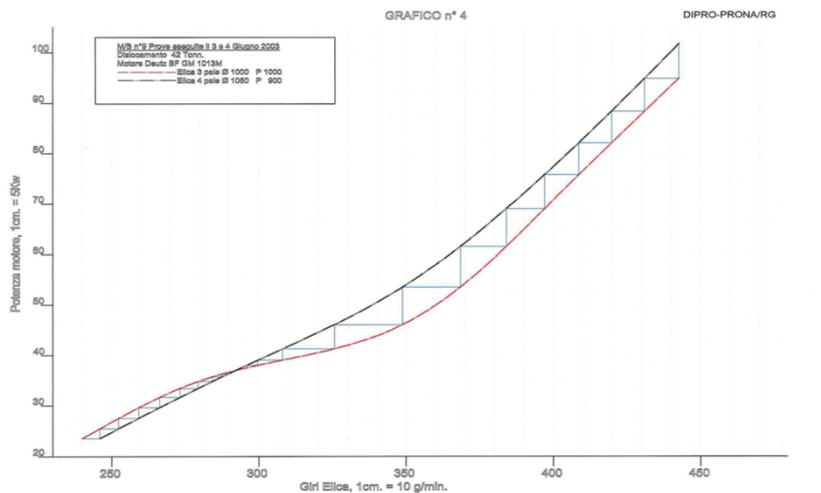


Figura 26 – Curva di carico di un’elica 1000x1000 a 3 pale (in rosso) e a 4 pale (in nero)

La curva è calcolata sperimentalmente durante delle prove, nelle quali si cercava di capire i vantaggi di un’elica 3 pale (in rosso) in confronto ad una 4 pale (in nero). La prova è stata eseguita in condizioni di *nave vacante*, ovvero pronta a salpare ma priva del carico (in questo caso i passeggeri). In ascissa troviamo i giri elica, in ordinata la potenza erogata. Attraverso questa curva possiamo ricavare, data una potenza richiesta, una velocità di rotazione dell’elica.

Quindi, entrando nel grafico attraverso la potenza nota, si incrocia la curva dell’elica 3 pale (in rosso), e si legge la velocità di rotazione dell’elica corrispondente. Noto il τ dell’invertitore – riduttore si risale facilmente ai giri motore.

E’ stato ricavato anche l’ultimo parametro di input, adesso la simulazione può essere lanciata.

2.5 APPROSSIMAZIONE DATI DI INPUT

E' corretto precisare che i dati di input racchiudono una serie di notevoli approssimazioni per cui i risultati di output non avranno una precisione ingegneristica accettabile. Tuttavia sarà interessante confrontare i risultati in termini di risparmio di consumo percentuale tra un'architettura convenzionale ed una ibrida. Inoltre, una volta validato il modello, inserendo i dati di input corretti il modello è un potente strumento che permette di analizzare una decisione come quella di equipaggiare l'imbarcazione con un'architettura ibrida serie piuttosto che con un'architettura in parallelo. Le approssimazioni di cui si parla riguardano principalmente:

- *Il propulsore*: la mappa motore non è quella del propulsore con cui il vaporetto è realmente equipaggiato. Questo non ci permette di definire con esattezza la fuel consumption, mancano inoltre le look-up table del consumo degli inquinanti, ovvero quel grafico che ci permette di stimare per ogni punto motore la quantità di NOx o PM che viene emessa
- *La richiesta di potenza*: per quanto ispirata ad un'analisi sperimentale reale, la richiesta di potenza è soltanto una stima.
- *La velocità di rotazione*: anch'essa è un approssimazione, poiché la curva di carico utilizzata è stata calcolata a nave vacante, mentre le condizioni di funzionamento analizzate nel ciclo guida sono a nave carica.

Tutte queste informazioni sono di proprietà intellettuale dell'ACTV, che si è dimostrata interessata al lavoro e disposta a collaborazioni future per far funzionare il modello con corretti dati di input e utilizzare l'effettivo potenziale.

3. MODELLO: SIMULAZIONI IN ARCHITETTURA IBRIDA

Lanciate le simulazioni in architettura convenzionale, si procede con l'implementazione del modello in architettura ibrida. Bisogna prima precisare cosa si intende per "ibrido". Un powertrain ibrido sfrutta la potenza fornita da un motore termico e da uno o più motori/generatori elettrici. Questo permette sia di poter eseguire un'operazione di "downsizing" del motore a combustione interna, sia di poter fare funzionare il motore termico in punti di massimo rendimento, in modo da avere vantaggi nel consumo energetico *ttw* (Tank to Well).

L'operazione di downsizing nel caso di vaporetto è possibile perché riusciamo a soddisfare le richieste di coppia attraverso il motore elettrico. La fase critica è infatti la fase di fermata: in questa fase il comandante inverte il senso del moto dell'elica attraverso la "manetta", costringendo il motore a dover fornire una coppia elevata a bassi regimi di rotazione. Questo è il motivo principale per cui, nonostante la richiesta media di potenza sia di 150kW, si utilizza un motore termico di 9l, cosa che in ambito terrestre farebbe pensare. In architettura ibrida, la richiesta di coppia sarebbe interamente soddisfatta dal motore elettrico di trazione, permettendo quindi un downsizing del motore termico. Tutti i ragionamenti che seguono, sono stati fatti in funzione del progetto vaporetto, un'applicazione con un'identità ben precisa e dei vincoli progettuali unici. Le scelte da fare nel processo di ibridizzazione sono molteplici, in questo caso la strada seguita tiene conto dell'esatta missione di questa imbarcazione, che spende il 97% della sua vita utile in fase di manovra.

Gli ibridi vengono classificati in base alla posizione delle macchine elettriche e al grado di elettrificazione, ovvero in base alle connessioni tra le varie fonti di potenza.

Nel modello verranno inserite delle variabili di input quali i *power flow*, introdotti all'inizio del capitolo 2. Ogni architettura sarà discretizzata da power flow proprio, che comprende una divisione dei flussi di potenza sia a livello energetico (quanta potenza percentuale verrà fornita all'organo di trasmissione dal motore termico e quanta dal motore elettrico, nel caso di un ibrido in architettura in parallelo) sia a livello di distribuzione tra i vari assi (energia ripartita tra asse front e rear). Nel modello vaporetto, abbiamo solo un asse quindi quest'ultima non sarà considerata; inoltre l'architettura considerata sarà un'architettura in serie, quindi il power flow relativo alla

divisione tra le potenze riguarderà la percentuale di energia utilizzata per ricaricare la batteria e quella fornita per alimentare direttamente il motore elettrico di trazione.

Inserite correttamente le variabili di input, il modello utilizzerà variabili di controllo quali SOC per fare un check dell'effettiva possibilità di realizzare il tipo di architettura selezionata per quel preciso veicolo. Ad es. immaginando di simulare un ciclo omologativo stradale ed utilizzare un'architettura ibrida, il modello verificherà istante per istante la capacità di soddisfare tutte le richieste di potenza in termini fisici del veicolo sperimentale, quindi la capacità del powertrain ibrido installato di erogare determinate potenze; in termini di SOC, si verifica la capacità di riuscire a terminare il ciclo mantenendo uno stato di carica della batteria desiderato [10]. Quest'ultimo aspetto in particolare è stato utilizzato nel modello vaporetto, come vedremo in seguito.

3.1 PRINCIPALI ARCHITETTURE IBRIDE

La nomenclatura degli ibridi, come accennato in precedenza, dipende dalla tipologia di connessione delle fonti di energia del powertrain. La nomenclatura attuale e dettagliata è utilizzata prettamente in campo automotive, per definire con esattezza la tipologia di ibrido. In campo navale è possibile rifarsi alla suddetta nomenclatura, ma con opportune specifiche tecniche.

La distinzione principale è sicuramente quella tra ibrido *serie* e ibrido *parallelo*.

3.1.1 IBRIDO SERIE

In questa configurazione la propulsione all'elica è garantita solo dal motore elettrico indicato con EM_R . Il motore termico non può fornire energia di trazione, ma è utilizzato per generare energia attraverso il collegamento con un generatore (EM_1) utilizzata per ricaricare la batteria. Il motore termico può essere spento o acceso, a seconda dello stato di carica della batteria. La potenza energetica richiesta per l'avanzamento del veicolo può essere fornita o dalla batteria (o pacco batteria, essendo spesso formata da più batterie collegate fra loro) o dal generatore, essendo entrambi collegati alla macchina elettrica attraverso un *inverter*, il cui compito è quello di gestire i flussi di potenza che provengono da EM_1 e dal pacco batteria. Nel caso di ibrido terrestre,

l'inverter viene utilizzato per gestire la frenata rigenerativa, ovvero quel flusso di potenza che si ricava dagli eventi di frenata e che viene utilizzato per ricaricare, ma nel caso navale non vi è questa possibilità. Il powertrain è schematizzato nei vari componenti che saranno analizzati nel dettaglio in seguito. In linea continua sono rappresentati i flussi di energia meccanica, in tratteggiata l'energia elettrica.

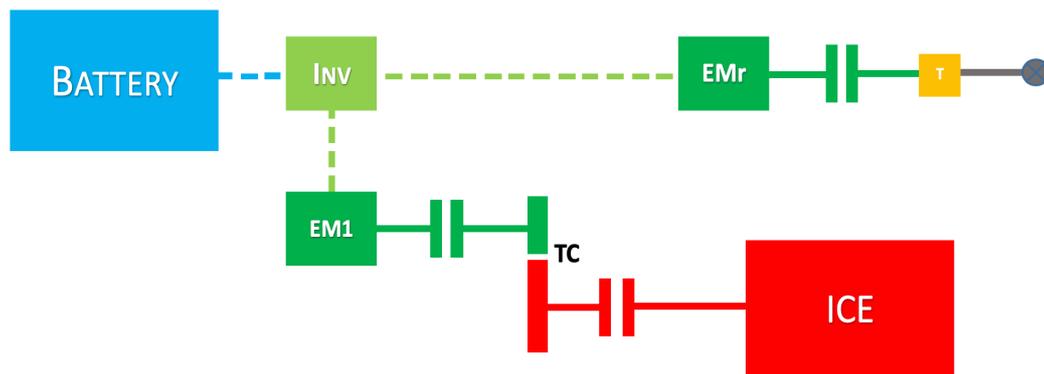


Figura 27 – Schema di funzionamento architettura serie

3.1.2 IBRIDO PARALLELO

Questa architettura permette ad entrambi i motori di essere collegati meccanicamente all'organo propulsivo, che sia l'elica come in questo caso o un asse di trasmissione alle ruote come negli autoveicoli. Il motore a combustione interna è la principale fonte energetica mentre il motore elettrico costituisce una riserva di energia da utilizzare a discapito dell'utilizzatore. In blu è indicato il collegamento meccanico tra EM e ICE (con G è stato indicato il gearbox, ovvero un cambio multimarce. Seppure non presente nelle imbarcazioni, sarebbe pensabile un'applicazione in questa tipologia di architettura poiché permetterebbe di spostare la curva di potenza del motore a seconda delle varie richieste di potenza).

Il vantaggio principale di questa soluzione consiste nel non dover convertire più volte l'energia fornita dal motore termico prima di arrivare all'elica, quindi non vi è necessità di un generatore, e questo si traduce in un rendimento energetico globale più alto. Tuttavia, il collegamento meccanico dell'elica con il motore termico è anche il principale svantaggio, poiché non dà la possibilità al motore termico di funzionare esattamente nel punto desiderato. Ad es. nelle fasi di approdo, quando il picco di potenza richiesta è massimo, il motore termico sarà costretto a funzionare ad un carico più elevato, cosa non necessaria in un serie.

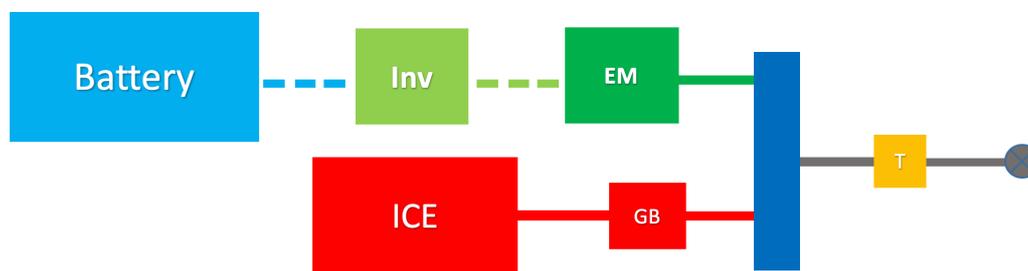


Figura 28 - Schema di funzionamento architettura ibrida parallelo

3.1.3 IBRIDO COMPLESSO

L'evoluzione tecnica di queste due architetture ha portato alla creazione di architetture "miste", ovvero di quelli che prendono il nome di ibridi complessi. Questa tipologia di ibrido sfrutta le potenzialità di entrambe le architetture attraverso la presenza di un accoppiamento doppio: il motore termico ha la possibilità di fornire energia di trazione quando richiesto attraverso un accoppiamento meccanico tra ICE, EM2 e trasmissione; quando la centralina di controllo reputa possibile soddisfare la richiesta di potenza soltanto con il motore elettrico EM2, l'ICE funziona da erogatore di energia di ricarica al pacco batteria mediante l'accoppiamento con un generatore

EM1 e in alcuni casi, quando lo stato di carica della batteria è ritenuto sufficiente, il motore termico può essere spento.

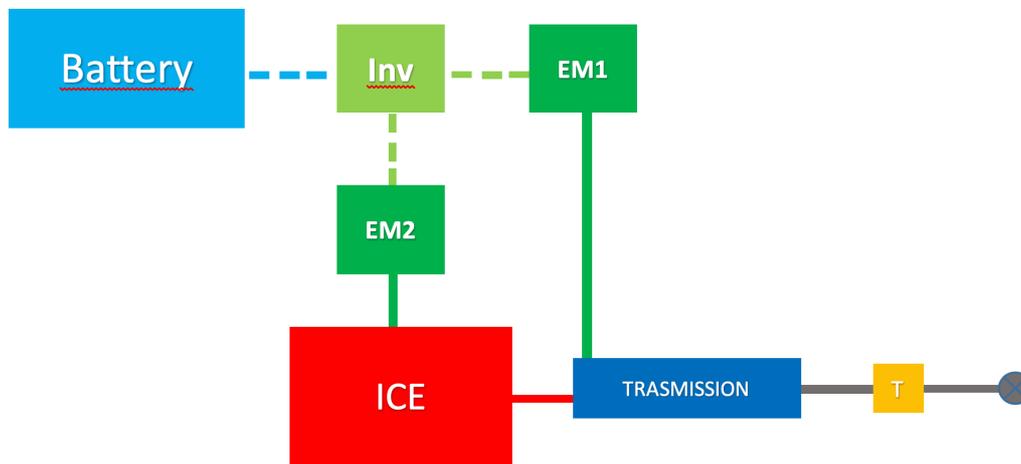


Figura 29 - Schema di funzionamento architettura ibrido complesso

Le possibilità di funzionamento di un ibrido complesso sono:

- *Pure electric*: il motore termico è spento e la potenza è fornita da EM2. Si utilizza nelle fasi critiche per il motore termico, come ad esempio le fasi di avviamento.
- *Pure thermal*: quando la richiesta di potenza è elevata, è soddisfatta interamente dal motore termico che utilizza l'accoppiamento meccanico dato dalla trasmissione
- *Serial mode*: il motore termico è acceso ma sfrutta l'accoppiamento con EM1 per produrre energia elettrica destinata alla batteria. La richiesta di potenza è soddisfatta da EM2
- *Parallel mode*: sia il motore termico che EM2 forniscono energia meccanica all'organo di propulsione mediante il collegamento di entrambe le macchine con la trasmissione, dividendosi in percentuale la potenza fornita.

Questa famiglia di ibridi è quella che ha le potenzialità più elevate in termini di prestazioni e rendimenti. Di contro, hanno una complessità notevole e presentano delle difficoltà soprattutto per quanto riguarda i costi e la successiva manutenzione del powertrain.

Nel settore automotive, gli ibridi complessi stanno prendendo piede velocemente, mentre l'applicazione in altri ambiti sembra ancora limitata alla necessità di uno sviluppo tecnologico più accurato, che sia in grado di riuscire a soddisfare richieste di potenza elevate senza avere ingombri troppo grandi (si pensi di dover sicuramente riprogettare e ridimensionare la sala macchine con eventuali ripercussioni sul disegno dello scafo)

3.1.4 IBRIDO PLUG-IN

Nel caso di *Plug-in*, l'architettura utilizzata può essere una di quelle elencate precedentemente, la diversità sta nella possibilità di poter ricaricare esternamente la batteria mediante una presa di corrente. Questa permette di sfruttare la rete elettrica per ricaricare, come uno smartphone, la batteria del powertrain. In questo modo è possibile aumentare la dimensione della batteria, ridurre quella del motore termico ed avere una maggiore capacità di viaggiare in puro elettrico. Questa sembrerebbe una possibilità vantaggiosa nel caso dei vaporetti. Sarebbe facile pensare di ricaricare le imbarcazioni durante la notte, quando il servizio di trasporto non è attivo.

Come accennato nell'introduzione, un progetto navale richiede l'analisi di tantissimi fattori che includono anche un'attenzione particolare all'ambiente in cui le imbarcazioni sono inserite per lo svolgimento delle loro missioni. Nel caso specifico dei vaporetti, ci troviamo in contesto unico come la città di Venezia. Bisogna prima di tutto analizzare la modalità con cui avviene attualmente il rifornimento del carburante dei vaporetti in servizio. Questi vengono ormeggiati nelle stazioni in cui fanno capolinea, dislocate per la città, ma non vi è una rimessa in cui vengono raggruppati come avviene nel caso degli autobus, non sarebbe logisticamente conveniente. Per rifornirli, un'apposita imbarcazione dotata di cisterna raggiunge i vaporetti nei loro ormeggi e il personale provvede al rifornimento. L'installazione di apposite torrette di ricarica dovrebbe avvenire negli ormeggi sparsi per tutta la città. Quest'operazione può apparire semplice, ma in un contesto come quello della città di Venezia, patrimonio dell'UNESCO e attentissima alla sua urbanistica, non lo è affatto. Il Comune si è infatti sempre dimostrato contrario a modificare in qualsiasi modo il centro storico con nuove costruzioni o installazioni che inciderebbero sulla bellezza storica della città. Per

questi motivi, la possibilità di un vaporetto dotato di un powertrain ibrido plug-in sembra poco efficace.



Figura 30 – Dettaglio ricarica ibrido Plug-In nel caso di un'autovettura

3.2 VANTAGGI IBRIDO SERIE

La scelta nello sviluppo del modello si è orientata verso l'utilizzo di un'architettura serie. Il motivo principale consiste nello scopo ultimo dell'ibridizzazione dei vaporetti. L'attenzione è infatti focalizzata sulla riduzione di emissioni inquinanti, principalmente nei tratti urbani.

L'architettura serie ci permette di scollegare la richiesta di potenza dell'elica dal motore termico. Come analizzato nel capitolo 2.2.3, l'elica ha una curva propria di funzionamento. Si richiama il grafico relativo alle curve K_{TS} e K_T .

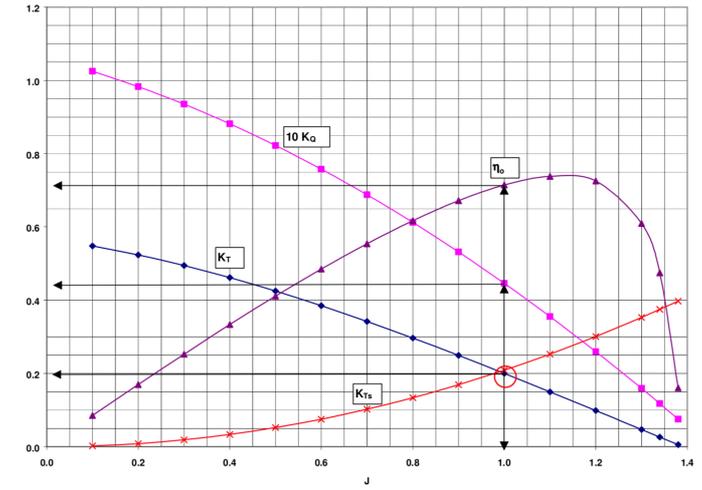


Figura 31 - Punto di funzionamento dell'elica trovato con l'incrocio tra le curve KTS e KT

In condizioni di fuori progetto, l'accoppiamento in serie elica-motore costringe il motore termico a lavorare in punti di scarsa efficienza ed elevato consumo specifico. Per esempio, nelle fasi di fermata, quando il moto dell'elica viene invertito, il motore funziona a bassa velocità di rotazione ed elevato carico, zone della mappa motore che favoriscono la formazione di inquinanti.

Eliminando il collegamento meccanico tra l'elica e il motore termico, è possibile far funzionare quest'ultimo nei punti a miglior rendimento, mentre il motore elettrico soddisferà le richieste di potenza all'elica.

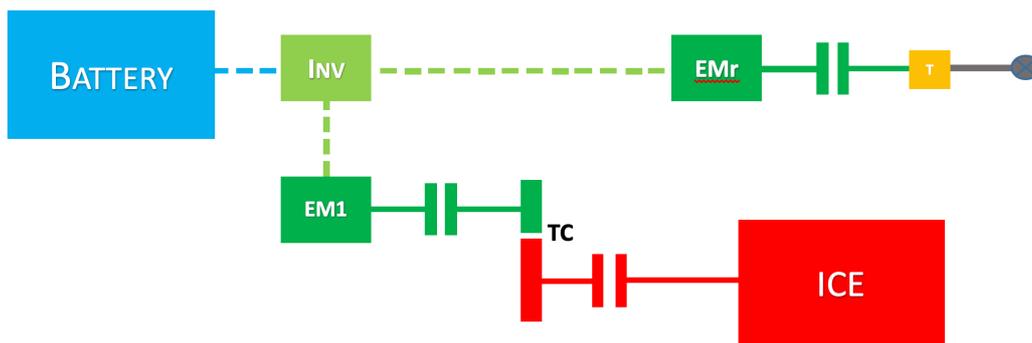


Figura 32 – Schema ibrido serie

3.2.1 MOTORE TERMICO

Il motore termico in questa architettura viene ridimensionato rispetto al caso convenzionale, ovvero viene utilizzato un motore di cilindrata inferiore. Questa operazione prende il nome di “downsizing” ed è uno dei principali vantaggi nell’utilizzo di un ibrido. L’idea, come accennato prima, è quella di “costringere” il motore in zone della mappa dove i livelli di emissioni sono ridotti.

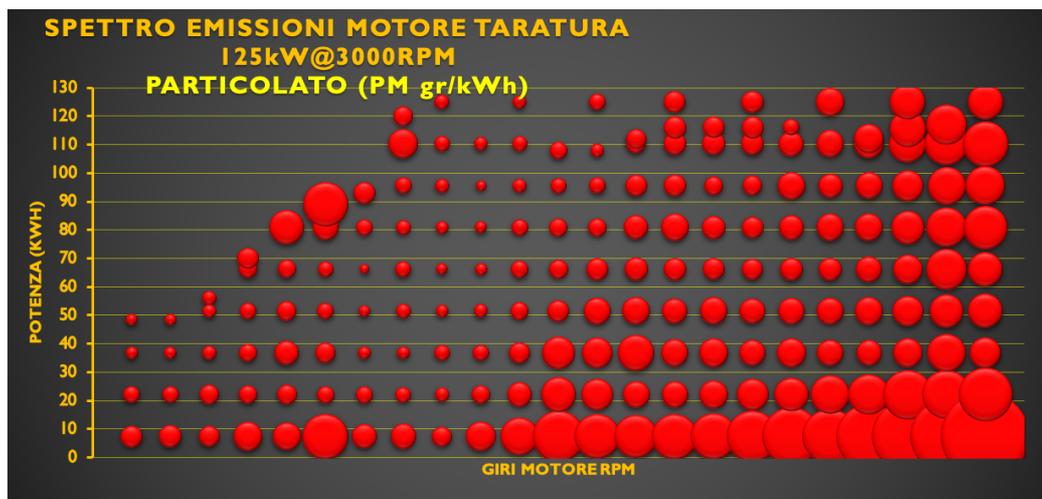


Figura 33 – Spettro emissioni di PM di un motore di 125kW

Ad esempio, è riportato uno spettro di emissioni di taratura di un motore a combustione interna. Non essendo il motore collegato in serie all’elica, è possibile fornire una potenza desiderata (consideriamo 120kW) a diversi numeri di giri. La centralina di controllo farà funzionare il motore termico nei punti dove la formazione di inquinanti è considerata inferiore. Lo spettro riportato riguarda il particolato, quindi i punti a minor formazione sono quelli ad elevata potenza ed elevato numero di giri, come si nota dalla dimensione dei cerchi in rosso.

Nel caso degli NOx sarebbe esattamente il contrario, essendo la formazione facilitata ad un basso regime di rotazione. Sarà quindi necessario scegliere il punto di funzionamento che soddisfi questo *trade off* tra la formazione dei due inquinanti. Sono state provate diverse cilindrate di motore termico durante le simulazioni. La mappa motore è stata inserita scalando la mappa del motore termico utilizzato per le simulazioni in architettura convenzionale, con lo stesso procedimento descritto al 2.2.1.

3.2.2 MOTORI ELETTRICI

Il sistema di propulsione elettrica è costituito da 3 elementi principali: le macchine elettriche, il convertitore di potenza e i controllori elettronici. In questo caso, la prima macchina elettrica EM1 converte l'energia meccanica in energia elettrica che verrà utilizzata per alimentare la batteria. La seconda macchina elettrica EMr invece è utilizzata come motore, ovvero converte l'energia elettrica in energia meccanica. Rispetto ai veicoli stradali, in questo modello non è prevista la frenata rigenerativa quindi EMr funzionerà solo e soltanto da motore e mai da generatore. L'inverter, o convertitore di potenza, garantirà i livelli di tensione corretti.

I veicoli elettrici ibridi sono equipaggiati quasi esclusivamente con macchine trifase. Le macchine più utilizzate sono Asincrono (ASM) o Permanent Magnet Synchronous (PSM). Il primo è un motore asincrono, ovvero la velocità angolare del rotore è inferiore a quella del campo magnetico generato dallo statore, nel secondo il campo magnetico rotante e il rotore sono sincroni. PSM garantisce maggiore efficienza a pieno carico e parziale. L'ASM mostra una migliore capacità di sovraccarico, cioè la capacità del motore elettrico di fornire, per un breve periodo, una coppia più elevata del valore nominale. [12]

Nelle simulazioni sono state considerate macchine elettriche motori / generatori a magnete permanente brushless. I dati sono stati presi dal sito web ufficiale di UQM Technologies.

Grazie all'utilizzo di magneti permanenti per l'eccitazione, che hanno il vantaggio di non consumare energia, e all'assenza di spazzole e di un commutatore meccanico, queste macchine generano una bassissima forza d'attrito e sono dotate di elevata efficienza. Le dimensioni sono compatte, grazie all'elevata densità di flussi d'energia gestibili mediante l'utilizzo di *rare-earth magnets*, ovvero potenti magneti costituiti da leghe di elementi di "terre rare" (secondo la definizione ufficiale viene indicato con terre rare un gruppo di 17 elementi della tavola periodica, precisamente scandio, ittrio e lantanoidi). Un ulteriore vantaggio è dato dalla semplicità di controllo e alla possibilità di raffreddamento non essendovi circolazione di corrente nel rotore. Garantiscono quindi alta affidabilità e poca manutenzione.

Gli svantaggi sono un elevato costo, un intervallo di potenza ed una velocità massima limitati.

Durante le simulazioni, verranno provate diverse taglie della batteria e macchine elettriche con potenze di picco differenti.

Il modello utilizza una mappa di efficienza della macchina elettrica, tenendo così conto delle perdite di energia nella conversione di energia meccanica in elettrica e viceversa, in base al punto di funzionamento. Per ogni potenza richiesta e velocità di rotazione, il modello entra nella mappa ed estrapola un valore di efficienza che utilizzerà per considerare la conversione di energia. Il modello verifica anche l'effettiva possibilità che la macchina elettrica possa soddisfare le potenze richieste, avendo come limite fisico la potenza di picco del motore elettrico di trazione [12].

3.2.3 BATTERIA

Le batterie agli ioni di litio sono sicuramente quelle con maggiori potenzialità. Vengono introdotte nel 1991 e da allora sono in continua evoluzione. Uno dei vantaggi principali è l'elevata densità di carica, che permette leggerezza e dimensioni ridotte; possono essere costruite di qualsiasi dimensione in modo da occupare perfettamente lo spazio a disposizione, vantaggio non di poco conto quando gli spazi disponibili sono ridotti; non soffrono dell'"effetto memoria" e presentano un tasso di auto – scarica ridotto rispetto ad altre tipologie di batterie. Il principale svantaggio è che il degrado progressivo anche in caso di non utilizzo della batteria.

La batteria agli ioni di litio a base nichel presenta:

- Tensione nominale di 4 V
- Energia specifica 120 Wh/kg
- Densità di energia di 200 Wh/l
- Potenza specifica 260 W/kg

Le altre tipologie sono a base cobalto o a base manganese: la prima presenta prestazioni migliori a discapito di un costo maggiore ed un più elevato tasso di auto-scarica, il secondo presenta un costo più basso e buone prestazioni in termini di densità energetica e potenza specifica e sarà soggetta ad importanti sviluppi futuri.

Nella costruzione del modello, le batterie agli ioni di litio rappresentano lo strumento di accumulo dell'energia. Lo stato di carica SOC della batteria sarà un'importante variabile di controllo. Partendo da una cella di riferimento, la capacità della batteria sarà definita in modo da soddisfare la richiesta di energia durante l'intero ciclo guida, garantendo le percentuali di carica richiesta. Vedremo in seguito come lo stato di carica sarà uno dei parametri utilizzato dall'ottimizzatore per definire la migliore strategia di controllo.

3.3 MODELLIZZAZIONE

Nota dal ciclo guida la potenza richiesta al propulsore per permettere l'avanzamento del veicolo, per costruire un modello ibrido bisogna che questa potenza sia fornita non più dal propulsore termico ma dal motore elettrico EMr. Il modello può decidere come gestire i diversi flussi di potenza tra motore termico, generatore e batteria e tra batteria e motore elettrico di trazione, e decidere istante per istante se prelevare energia dalla batteria o dal generatore, se ricaricare la batteria o spegnere il motore termico. Per fare chiarezza, bisogna introdurre le 4 possibili modalità di funzionamento di un ibrido serie:

- *Battery charging*: in questa modalità di funzionamento, il motore termico è acceso e l'energia elettrica fornita serve interamente a ricaricare la batteria. Il motore elettrico di trazione preleva energia elettrica ma il bilancio energetico totale consente alla batteria di ricaricarsi. Significa che la richiesta di potenza di EMr non è elevata e l'energia del motore termico può essere utilizzata per aumentare il grado di SOC
- *Charge depleting*: la richiesta di potenza di EMr è elevata, l'energia elettrica fornita dal generatore non va alla batteria ma alimenta direttamente il motore elettrico, che preleva energia anche dalla batteria. Si utilizza in fase di elevata richiesta di potenza (come può essere una fase di manovra) e porta una diminuzione del grado di SOC.
- *Charge sustaining*: l'energia elettrica fornita dal motore termico attraverso il generatore è interamente destinata al motore di trazione EMr, che riesce a soddisfare la richiesta di potenza prelevando energia dalla batteria. La SOC rimane quindi costante.

$$P_{ICE} = P_{REQ} \quad (16)$$

Dove con P_{ICE} è indicata la potenza erogata dal motore termico e P_{REQ} la richiesta di potenza.

- *Pure electric*: Il motore termico è spento, tutta l'energia è fornita dalla batteria. La SOC diminuisce notevolmente, essendo la batteria l'unica fonte di energia.

Per spiegare meglio la differenza tra charge sustaining e charge depleting, di seguito un grafico con in ordinata la SOC e in ascissa gli istanti di tempo del ciclo guida.

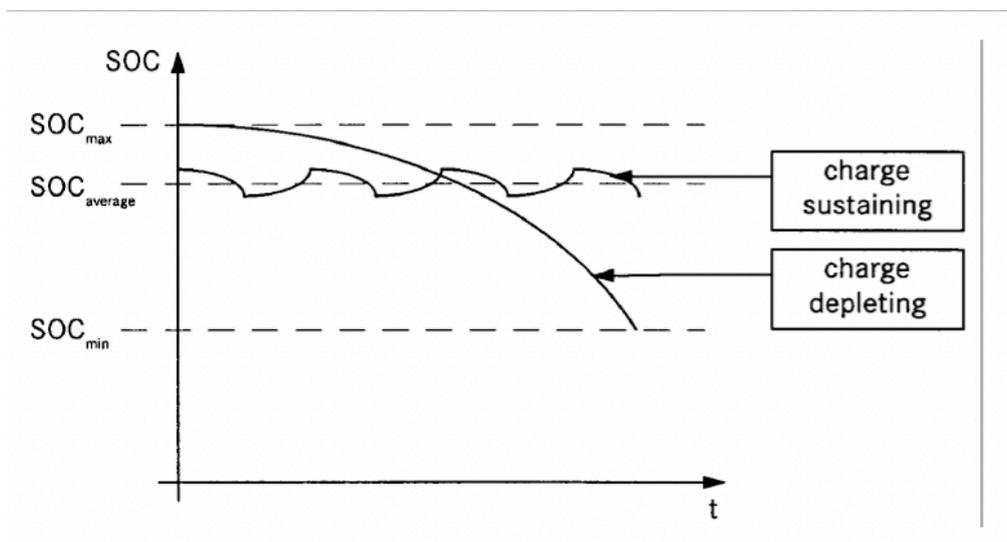
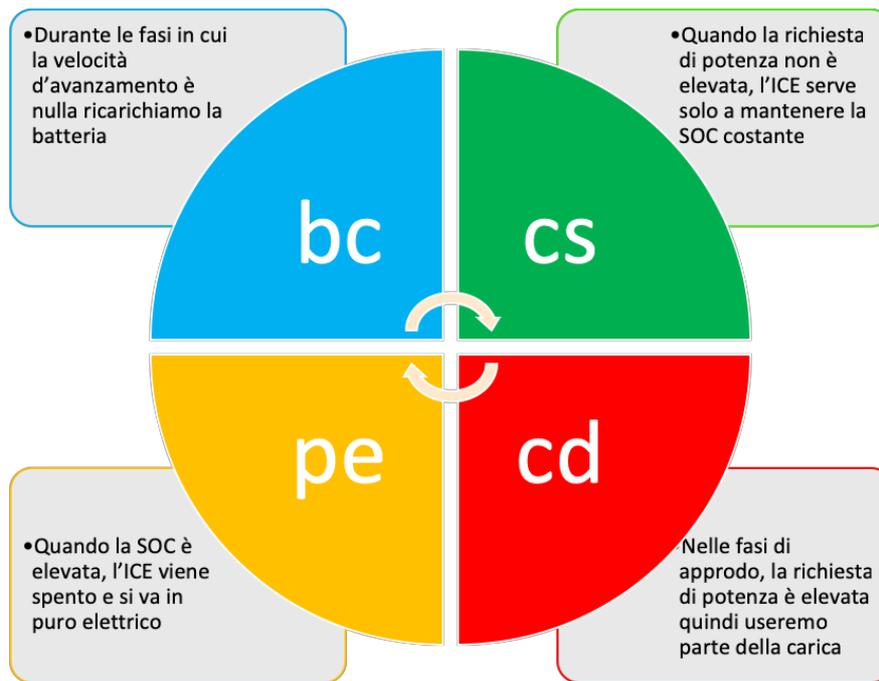


Figura 34 – Modalità di funzionamento charge sustaining e charge depleting

Per il modello vaporetto, è stato pensato di impostare delle regole di controllo dei power flow ben precise, in base ai diversi istanti di percorrenza del ciclo guida.



Queste regole di controllo prendono il nome di *Rule Based Control*.

3.4 RULE BASED CONTROL

Il modello è dotato di una logica di controllo per associare ad ogni istante del ciclo guida, quindi ad ogni richiesta di potenza, un powerflow che sia considerato il più adatto per quell'istante. Sono stati sviluppati, partendo da esempi precedenti utilizzati nella simulazione dei veicoli stradali, appositi schemi di gestione, ovvero una "mappa" che partendo dalla potenza richiesta e dalla SOC associa una modalità di funzionamento.

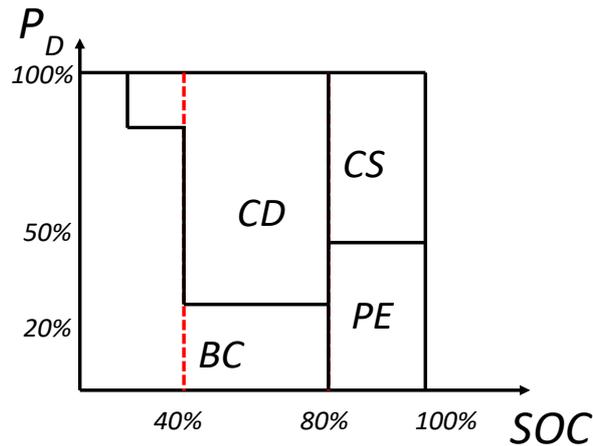


Figura 35 – Schema di funzionamento Rule Based. In ordinata la potenza richiesta, in ascissa lo stato di carica della batteria

Sono stati provati diversi schemi, fino a trovare quello ottimale.

A questo schema di utilizzo, è possibile ipotizzare di aggiungere un terzo asse, creando così una mappa tridimensionale. La terza informazione sarebbe relativa ai punti di funzionamento del motore termico in termini di emissioni, quindi l'ottimizzazione avverrebbe non solo partendo dalla SOC e dalla richiesta di potenza, ma anche utilizzando come regola di controllo l'emissione di inquinanti.

Il motore termico è costretto a lavorare in serie con il generatore. Questo significa che per un dato punto sulla mappa ICE corrisponde un punto sulla mappa del generatore elettrico EM1, secondo le equazioni

$$\omega_{EM} = \omega_{ICE} * \tau \quad T_{EM} = -T_{ICE}/\tau \quad (17)$$

Con ω si indica la velocità di rotazione e con T (Torque) la coppia erogata. Il rendimento globale del gruppo è dato dalla moltiplicazione dei rendimenti delle due macchine

$$\eta_{glob} = \eta_{ICE}\eta_{EM} \quad (18)$$

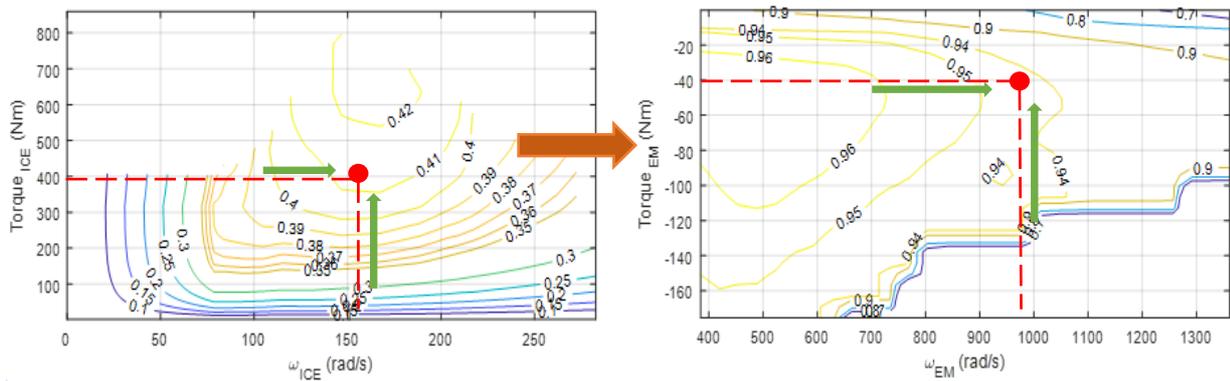


Figura 36 – Mappa ICE, a sx, mappa EM1 a dx. Conoscendo il punto di funzionamento ICE ricaviamo il punto di funzionamento EM1

Si forma così un grafico che racchiude le curve di iso-efficienza di tutti i punti di funzionamento

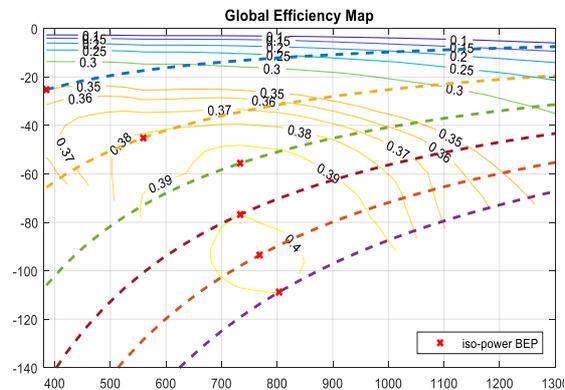


Figura 37 – Curve isorendimento

In ascissa la velocità di rotazione della macchina elettrica, in ordinata la coppia (negativa perché è il caso di un generatore).

Per ridurre la fuel consumption del motore termico, si cerca di utilizzare i power flow in modo da far funzionare il motore termico nei punti ad efficienza più elevata possibile.

Un'operazione simile potrebbe essere fatta utilizzando come parametro di ottimizzazione non il rendimento, ma un "rendimento emissivo", ovvero richiamando la figura (...quella della mappa di PM), creando delle curve di iso-emissioni e costringere l'ICE a lavorare nei punti di funzionamento più convenienti.

4. CONCLUSIONI

Dopo aver sviluppato il modello, il lavoro si è incentrato sul lancio di diverse simulazioni al fine di trovare l'ottima combinazione tra le variabili di input. La prima simulazione è stata lanciata in architettura convenzionale, per poi procedere con le simulazioni in architettura ibrido serie. Nelle pagine successive saranno commentati i risultati ottenuti e verranno tratte le conclusioni finali.

4.1 SIMULAZIONI

Il modello è in grado di funzionare in entrambe le versioni, stradale e vaporetto. I risultati di output mostrano nella legenda alcuni dati che in questo caso specifico non hanno senso pratico, come ad esempio il GN, ma che sono comunque implementate nel modello in quanto necessarie al funzionamento stradale.

4.1.1 *SIMULAZIONE ARCHITETTURA CONVENZIONALE*

I risultati delle simulazioni mostrano in una prima analisi quello che era stato introdotto in precedenza. In rosso, è evidente la richiesta di potenza del motore termico. In linea continua verde, la fuel consumption istantanea.

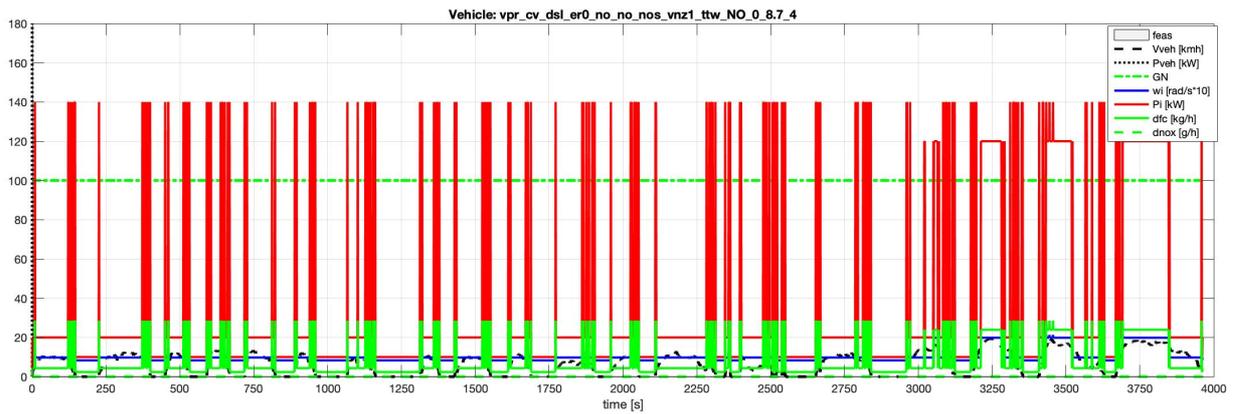


Figura 38 – Risultati simulazione in architettura convenzionale. Sono indicati la Potenza richiesta in rosso, il consumo istantaneo di FC in verde, la velocità di avanzamento linea tratteggiata nera, velocità di rotazione dell’elica in blu

Per analizzare con maggiore precisione dividiamo in il ciclo in più parti:

La prima parte del ciclo va da 0 a 3000 secondi, e comprende la fase di avanzamento nel Canal Grande. Il motore è costretto a soddisfare una richiesta di potenza che quasi istantaneamente va dai 20 kW ai 140 kW, dovuta alle fasi di fermata e ripartenza dell’imbarcazione.

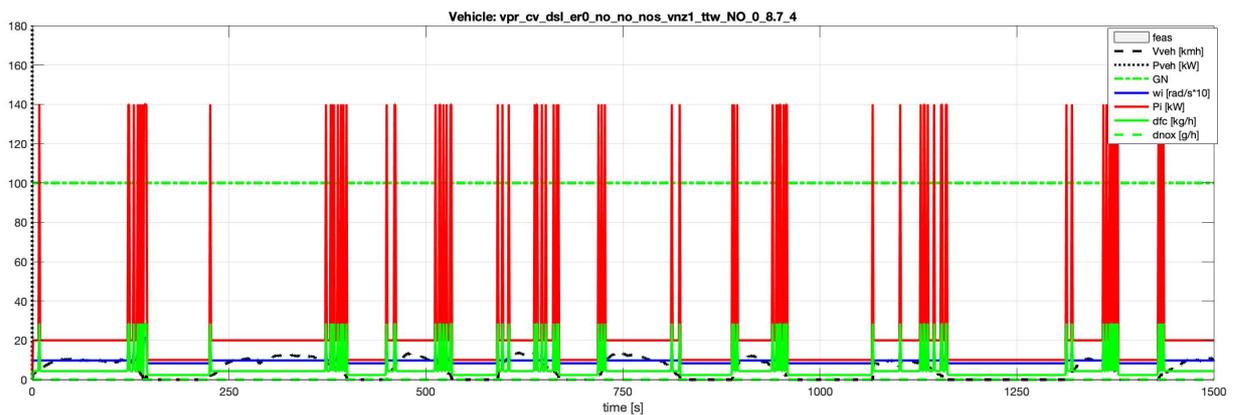


Figura 39 – Dettaglio simulazione $0 < t < 1500$ s

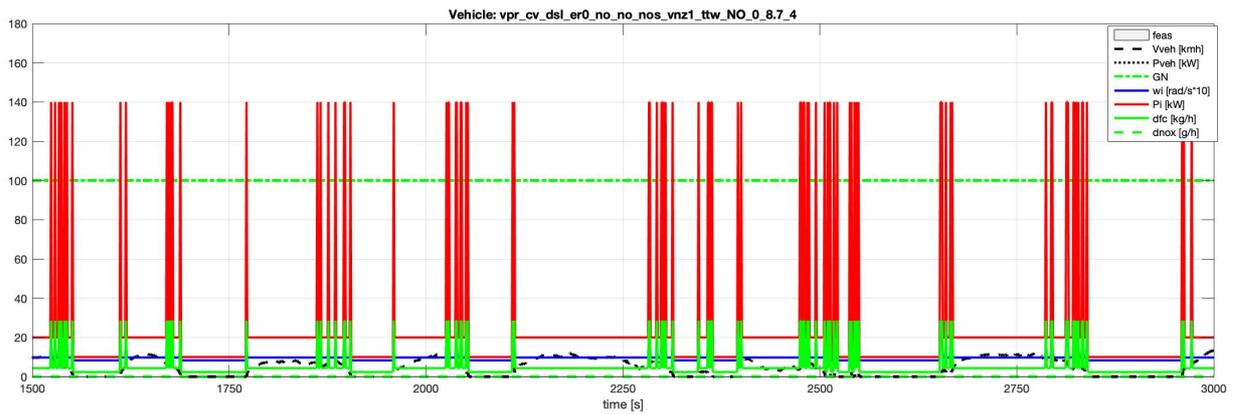


Figura 40 – Dettaglio simulazione 1500 < t < 3000 s

Durante la seconda parte del ciclo, il vaporetto può navigare ad una velocità di crociera per prolungati intervalli di tempo e lo si nota dalla lunghezza dei tratti a potenza 120 kW. Questa maggiore richiesta di potenza influirà molto sui risultati della seconda parte della simulazione.

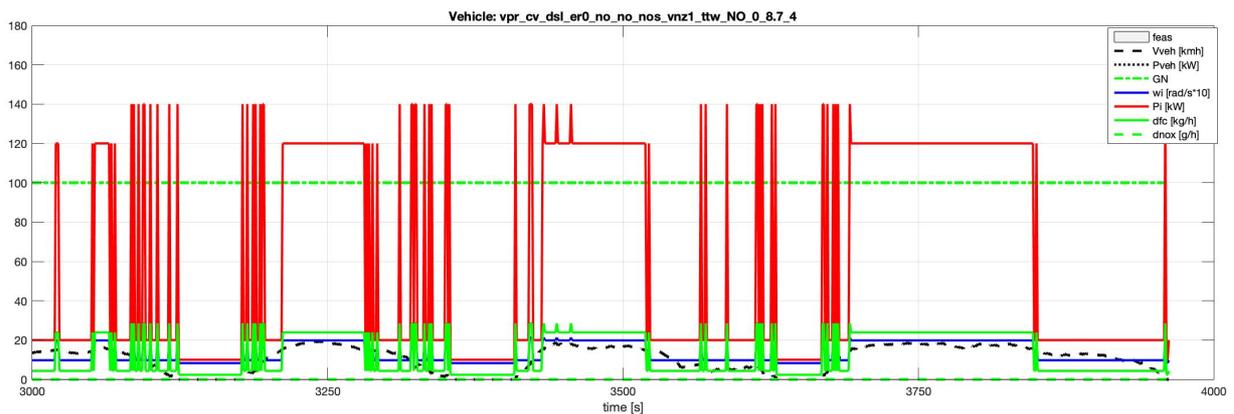


Figura 41 – Dettaglio simulazione 3000 < t < 4000 s

Alla fine della simulazione, avremo un consumo totale di CO2 in g/km. Ricordando tutte le approssimazioni elencate nel capitolo 2.5 il valore potrebbe essere sottostimato rispetto ai consumi reali a causa delle numerose fasi transitorie dei regimi di rotazione.

Ricordando che $1 \frac{g}{km} = 0,0431034 \frac{l}{100km}$ di combustibile Diesel, un consumo di 3239,05 g/km significa 139 l/100km. Ricordando che in ambito navale il consumo viene calcolato in l/h, l'imbarcazione in questa configurazione sta consumando 10,286 litri di gasolio per 3962 secondi di navigazione, ovvero 9,34 l/h.

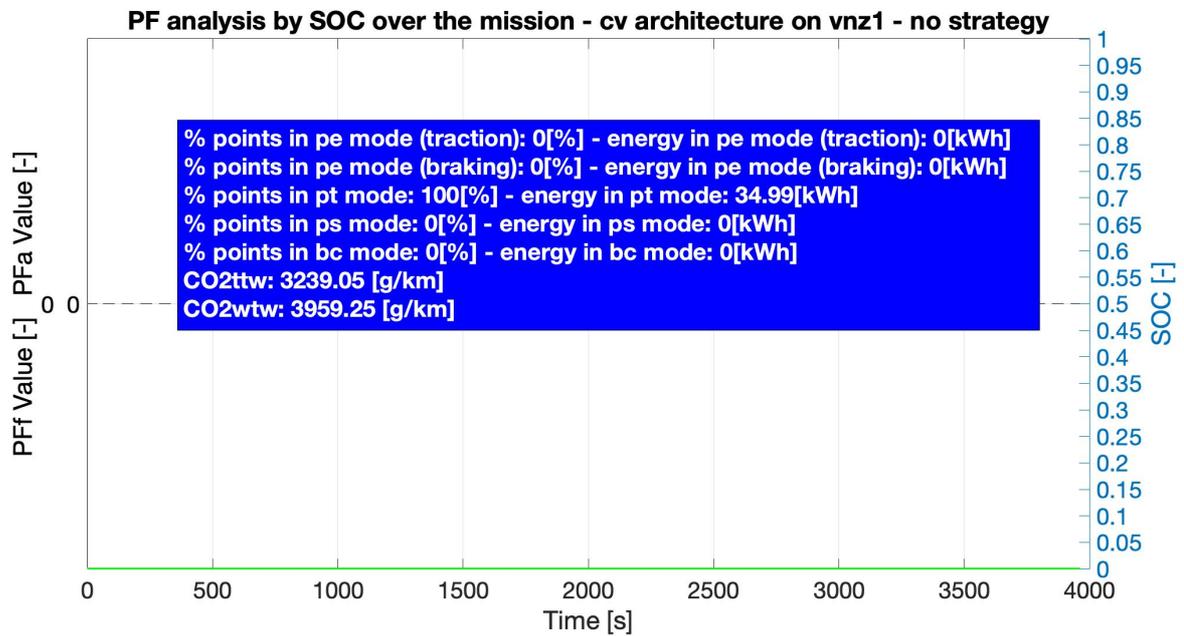
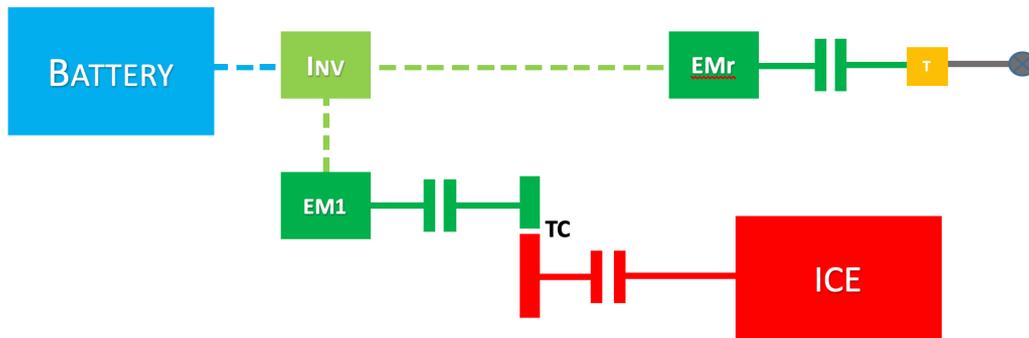


Figura 42 – Risultati prova in termini di CO₂

In architettura convenzionale la potenza è interamente fornita dal valore termico, da cui il 100% dei punti di funzionamento in *pure therma*.

4.1.2 SIMULAZIONE ARCHITETTURA IBRIDA



Viene riportata nuovamente la figura 27 raffigurante lo schema di funzionamento di un ibrido serie in modo da evidenziare i componenti e i parametri variati durante le diverse simulazioni.

I parametri principali sono:

- *ICE displacement [L]*: la cilindrata del motore termico è uno dei parametri decisivi in termini di fuel consumption finale. La cilindrata giusta non è a priori la più piccola, ma sarà obiettivo del modello verificare quale sarà il motore più adatto per queste richieste di potenza
- *Torque Couple Device Ratio*: il rapporto di riduzione tra la velocità di rotazione del motore termico e quella del generatore è un parametro da decidere in fase di design, tuttavia nelle seguenti prove è stato mantenuto fisso
- *EM1 Peak Power [kW]*: Potenza di picco fornita dal generatore
- *Power-to-energy ratio [W/Wh]*: Rapporto tra potenza massima disponibile dalle macchine elettriche e la massima energia che può essere immagazzinata in batteria. Più il rapporto è grande, più la taglia della batteria risulterà piccola
- *EMr Peak Power [kW]*: potenza di picco fornita dal motore elettrico
- *Rapporto di riduzione dell'invertitore-riduttore*: è un parametro importante ai fini dell'accoppiamento tra l'elica e il motore elettrico

Inoltre, è stato svolto un lavoro di prova anche in termini di valori discriminanti dei power flow. Sono state provate diverse configurazioni, pur trattandosi di un ibrido serie con un solo asse, quindi non vi è divisione di potenza in termini di assi. Ricordiamo che i possibili power flow sono:

- *Pure electric*: ha un valore fisso di 1, equivale a dire che il 100% dell'energia è fornita dal motore elettrico che preleva dalla batteria
- *Charge depleting*: il valore di prova indica quanta potenza erogata dal motore termico va, in termini percentuali, alla batteria e quanta va alle macchine elettriche.
- *Battery charging*: il valore di questo power flow indica il rapporto tra la potenza erogata dal motore e la potenza richiesta per mantenere invariato lo stato di carica. Più questo valore è alto, maggiore sarà la potenza da dover fornire per ricaricare la batteria.

Oltre ai vari parametri di design, sono state svolte prove per trovare lo schema di utilizzo che ottimizzasse il funzionamento del rule based control.

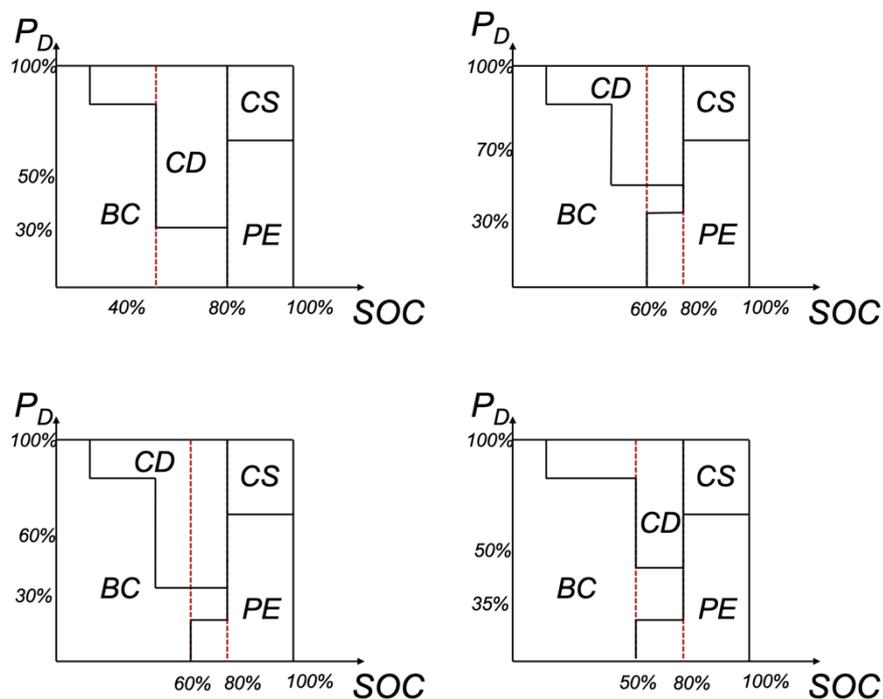
4.1.3 MAPPA RULE BASED CONTROL

Sono in seguito rappresentate alcune tra le mappe testate. In ascissa è indicato lo stato di carica della batteria SOC, in ordinata la potenza richiesta dal powertrain P_D . È stato inizialmente imposto un range di funzionamento della batteria tra il 40 e l'80%, per poi spostarci tra il 60-80, e infine tra il 50-80.

Tuttavia, al fine di prolungare la vita utile della batteria, non è conveniente compiere cicli di ricarica troppo "ampi", ovvero è ragionevole pensare di lavorare sempre tra il 70-80% di carica, in modo da avere in casi eccezionali, ampie riserve di energia.

Per quanto riguarda i powerflow, il lavoro principale è stato svolto nell'impostare la corretta percentuale di funzionamento in puro elettrico e in battery charging.

Table 2 – Mappe di controllo Rule Based. Da in alto a sinistra, Mappa 1, Mappa 2, Mappa 3, Mappa 4



Infine è stata scelta la mappa che meglio ottimizza il comportamento dei componenti in termini di rendimento. Lo stato di carica è mantenuto tra il 70 e il 90%. Durante le basse richieste di potenza, inferiori al 10 %, il motore termico ricarica la batteria in configurazione BC. Questo avviene durante le fasi di approdo, che come visto nel capitolo relativo al ciclo guida durano dai 30 secondi ai 3 minuti. In questo intervallo di tempo, immagazziniamo energia da sfruttare per le successive fasi di ripartenze e navigazione. Per le richieste di potenza più elevate, la modalità di funzionamento è quella di charge depleting. La parte della mappa che descrive le condizioni di SOC < del 50% è tutta in BC. Questa è una misura di sicurezza in quanto, solo in casi eccezionali, costringiamo la batteria a ricaricarsi a qualsiasi richiesta di potenza.

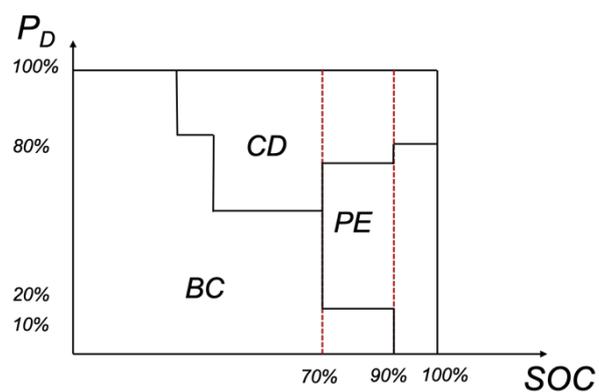


Figura 43 – Mappa selezionata per le simulazioni finali

4.2 RISULTATI

Nelle successive pagine vengono analizzate nel dettaglio le prove più significative. Lo studio si è concentrato principalmente sul consumo di CO₂ e sul mantenimento dello stato di carica della batteria in un range prefissato, al fine di trovare la migliore combinazione tra i due fattori.

Nonostante le varie approssimazioni dei dati di input, il modello ci permette di studiare come varia il comportamento del powertain al variare dei suoi componenti principali.

4.2.1 PROVA 1

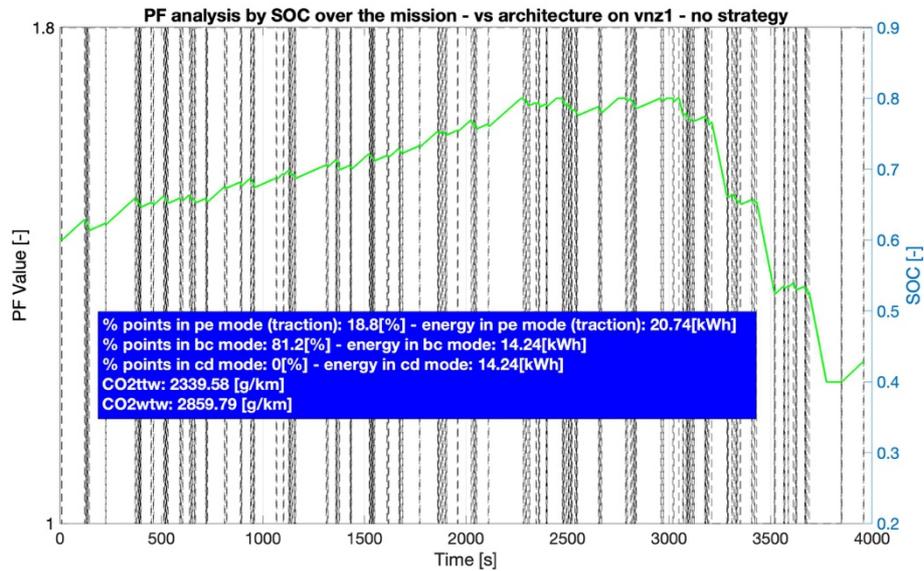


Figura 44 – Risultati prova 1

- ICE displacement [L]: 6
- Power-to-energy ratio [W/Wh]: 20
- EMr Peak Power [kW]: 210
- EM1 Peak Power [kW]: 200
- Rapporto di riduzione invertitore-riduttore: 4

COMMENTO:

In questa figurazione, nel quale viene utilizzata la mappa 1, è evidente come durante la prima parte del ciclo riusciamo a mantenere la batteria tra 0,6 e 0,8 di SOC ma nel secondo tratto vi è un crollo verso il livello finale di 0,4. Questo avviene perché la richiesta di potenza del secondo tratto del ciclo è più alta, dato l'aumento della velocità d'avanzamento dell'imbarcazione. La mappa utilizzata non è adatta perché nel secondo tratto tutta l'energia utilizzata dal motore elettrico di trazione proviene dalla batteria e non si attiva la modalità di charge depleting.

4.2.2 PROVA 2

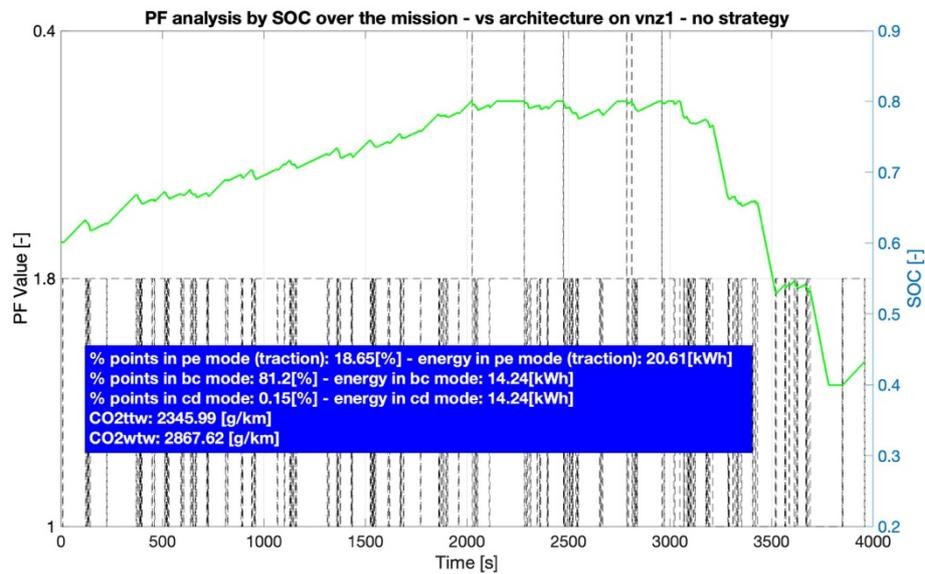


Figura 45 - Risultati prova 2

- ICE displacement [L]: 6
- Power-to-energy ratio [W/Wh]: 20
- EMr Peak Power [kW]: 200
- EM1 Peak Power [kW]: 210
- Rapporto di riduzione invertitore-riduttore: 4

COMMENTO:

In questa prova è stata utilizzata la mappa 2 e mantenuto il layout dell'architettura costante. Il problema è simile al precedente, con la differenza che lo 0,15 % del ciclo viene affrontato in charge depleting.

4.2.3 PROVA 3

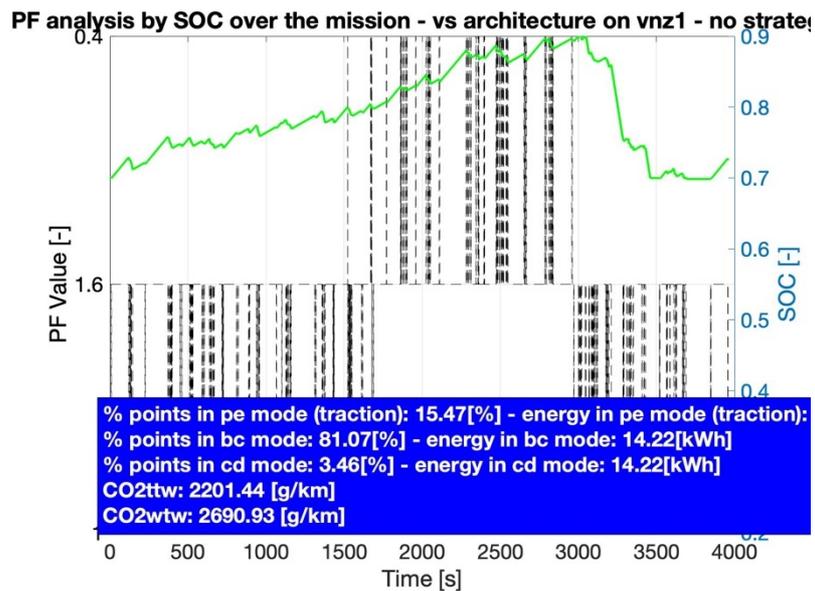


Figura 46 - Risultati prova 3

- ICE displacement [L]: 6
- Power-to-energy ratio [W/Wh]: 30
- EMr Peak Power [kW]: 250
- EM1 Peak Power [kW]: 250
- Rapporto di riduzione invertitore-riduttore: 6

COMMENTO:

Da questa prova in poi verrà utilizzata lo schema di controllo numero 5, considerato il più efficace. In questo caso è stata rivoluzionata l'architettura, mantenendo la potenza di picco delle macchine elettriche uguale alle prove precedenti, ma cambiando il fattore power-to-energy, il che equivale a modificare la dimensione della batteria in questo caso riducendole notevolmente. Questo si traduce in una fase di ricarica sicuramente più efficace che porta ad una SOC del 90%. Nel secondo tratto, si riscontra ancora una notevole propensione alla diminuzione dello stato di carica, che però si ferma al 70%, limite imposto dalla mappa e che il bilancio totale tra le potenze permette di rispettare (significa che il motore termico riesce a fornire abbastanza energia da terminare il ciclo). Tuttavia il rischio di montare una batteria troppo piccola è quello di incorrere in un sottodimensionamento del componente; inoltre ricaricare una batteria fino al 90% potrebbe

comportare uno spreco di energia data la diminuzione delle efficienze di ricarica ad elevati valori di SOC e lo si nota dall'elevata fuel consumption rispetto alle altre configurazioni.

4.2.4 PROVA 4

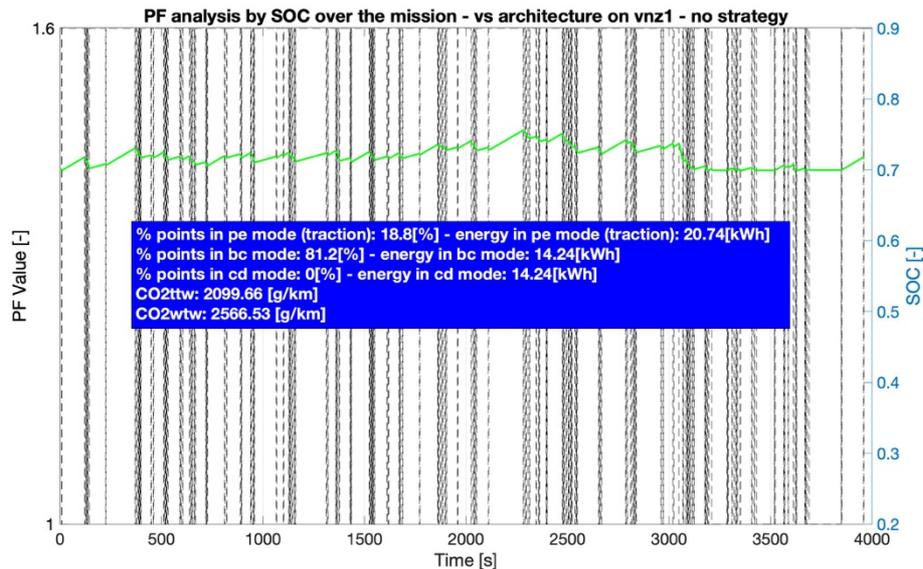


Figura 47 - Risultati prova 4

- ICE displacement [L]: 7
- Power-to-energy ratio [W/Wh]: 10
- EMr Peak Power [kW]: 200
- EM1 Peak Power [kW]: 210
- Rapporto di riduzione invertitore-riduttore: 5

COMMENTO:

In questa configurazione è stato diminuito notevolmente il $p-e$, il che equivale ad una dimensione maggiore del pacco batterie. Il livello di carica si mantiene costante tra 0,75 e 0,7. In questo caso il rischio è quello di aver sovradimensionato il componente, il che porta ad uno spreco in termini economici e anche in termini di spazio e peso. Bisogna ricordare che il pacco batteria occupa un volume notevole; inoltre il problema del peso montato a bordo non è banale, dato che in

un'imbarcazione, aumentando il peso, aumenta l'affondamento dello scafo il che si traduce in un attrito maggiore.

Inoltre in questa prova non si attiva la modalità di charge depleting.

4.2.5 PROVA 5

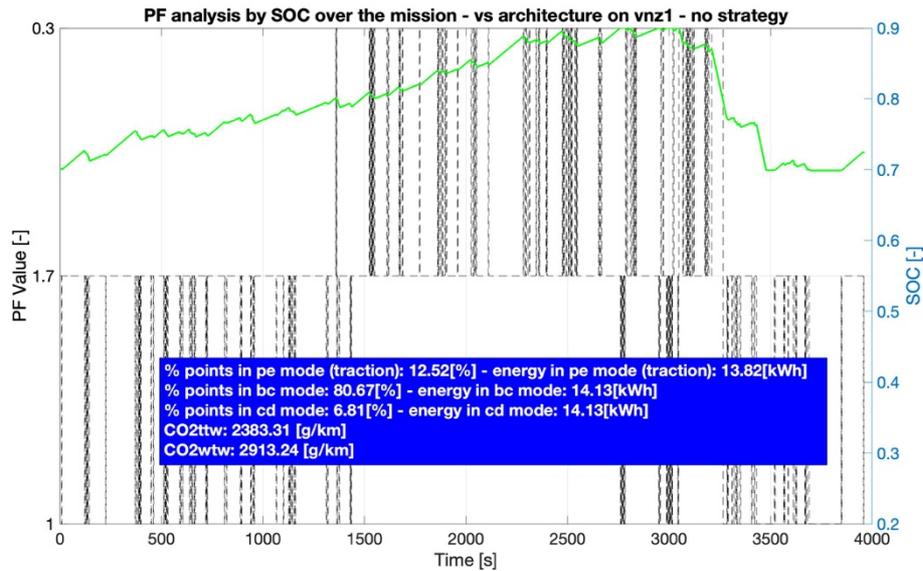


Figura 48 - Risultati prova 5

- ICE displacement [L]: 6
- Power-to-energy ratio [W/Wh]: 25
- EMr Peak Power [kW]: 200
- EM1 Peak Power [kW]: 210
- Rapporto di riduzione invertitore-riduttore: 5

COMMENTO:

E' stato utilizzato un valore per discretizzare il powerflow relativo al charge depleting inferiore rispetto al caso precedente. Significa che in questa condizione di funzionamento, il 70% dell'energia fornita alla macchina elettrica di trazione proviene dal motore termico e il 30% dalla batteria. Il *p-e* è stato riportato ad un valore più elevato. La SOC arriva al 90% alla fine della prima parte del ciclo, come visto durante la prova 3. Vi è una più elevata percentuale di punti di

funzionamento in cd. La quantità di CO2 emessa però è aumentata rispetto alla prova precedente, quindi vi è uno spreco di energia nel ricaricare la batteria fino a livelli troppo elevati.

4.2.6 PROVA 6

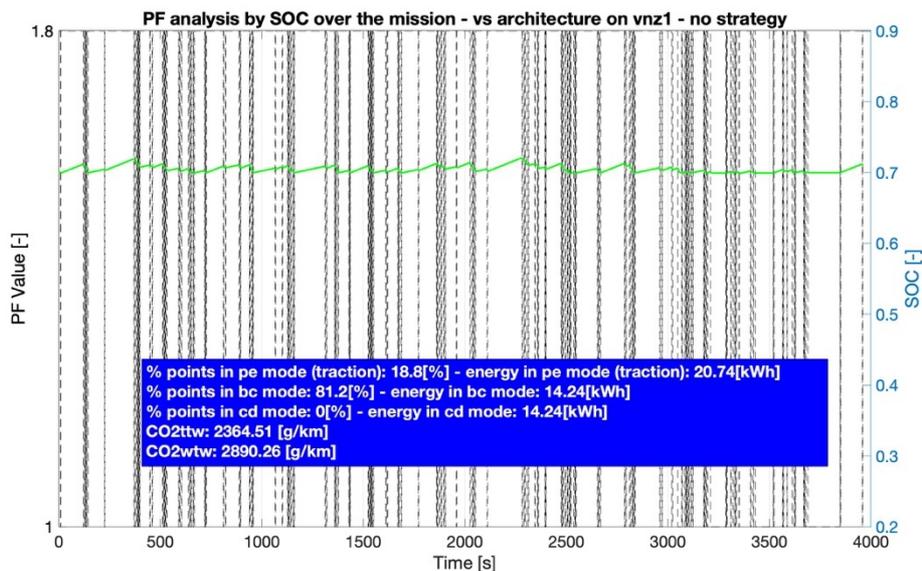


Figura 49 - Risultati prova 6

- ICE displacement [L]: 4,5
- Power-to-energy ratio [W/Wh]: 15
- EMr Peak Power [kW]: 200
- EM1 Peak Power [kW]: 210
- Rapporto di riduzione invertitore-riduttore: 4

COMMENTO:

La variazione principale di questa simulazione è stata la cilindrata del motore termico, ridotta a 4,5l. Tuttavia non vi è stata una notevole riduzione di CO2 come si potrebbe pensare data un'operazione di downsizing. Questo perché il motore è costretto a funzionare spesso a pieno carico per garantire una SOC che non vada mai al di sotto dello 0,7. Risulta quindi sconveniente

questa configurazione; resta da verificare se lo stesso risultato si otterrebbe per quanto riguarda la formazione di inquinanti.

4.2.7 PROVA 7

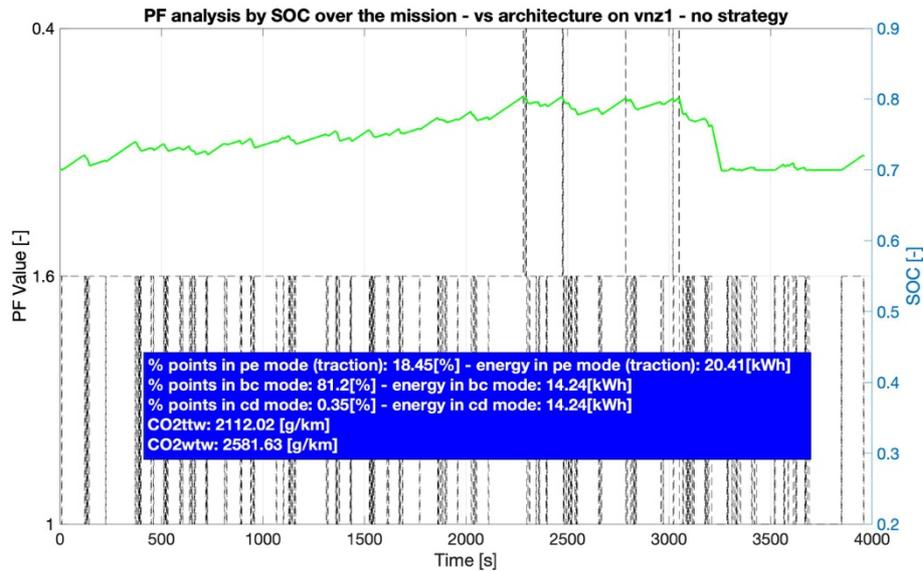


Figura 50 - Risultati prova 7

- ICE displacement [L]: 7
- Power-to-energy ratio [W/Wh]: 20
- EMr Peak Power [kW]: 200
- EM1 Peak Power [kW]: 190
- Rapporto di riduzione invertitore-riduttore: 3

COMMENTO:

La prova numero 7 mostra una CO2 inferiore e una SOC compresa tra 0,7 e 0,8, entrambi fattori positivi. Questo indica una strada da seguire. La taglia del motore termico è di 7 litri. Mentre la p-e considerata è di 20.

4.2.8 PROVA 8

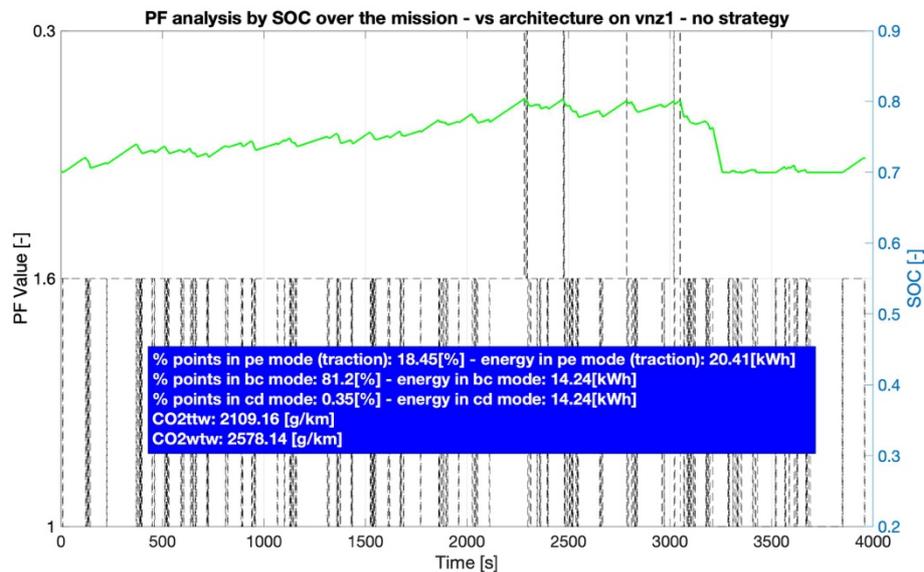


Figura 51 - Risultati prova 8

- ICE displacement [L]: 6
- Power-to-energy ratio [W/Wh]: 20
- EMr Peak Power [kW]: 180 (147)
- EM1 Peak Power [kW]: 190 (125)
- Rapporto di riduzione invertitore-riduttore: 3

COMMENTO:

Questa è stata ritenuta la prova migliore. Il motore termico è stato ridotto in termini di cilindrata, producendo però solo una lievissima diminuzione di CO₂. La potenza di picco delle macchine elettriche è stata diminuita, riuscendo comunque a fornire potenza sufficiente per terminare il ciclo e mantenere una SOC maggiore di 0,7. Si ha ancora un lieve calo nella parte finale, risolvibile con una modifica dello schema di funzionamento rule based. Vi sarebbe infatti la possibilità di utilizzare mappe differenti a seconda della fase del ciclo che il vaporetto percorre.

Il risultato finale porta ad una riduzione percentuale di CO2 del 40% rispetto all'architettura convenzionale, risultato davvero notevole ma da verificare dopo aver validato il modello e aver eseguito numerose prove.

4.2.9 PROVA 9

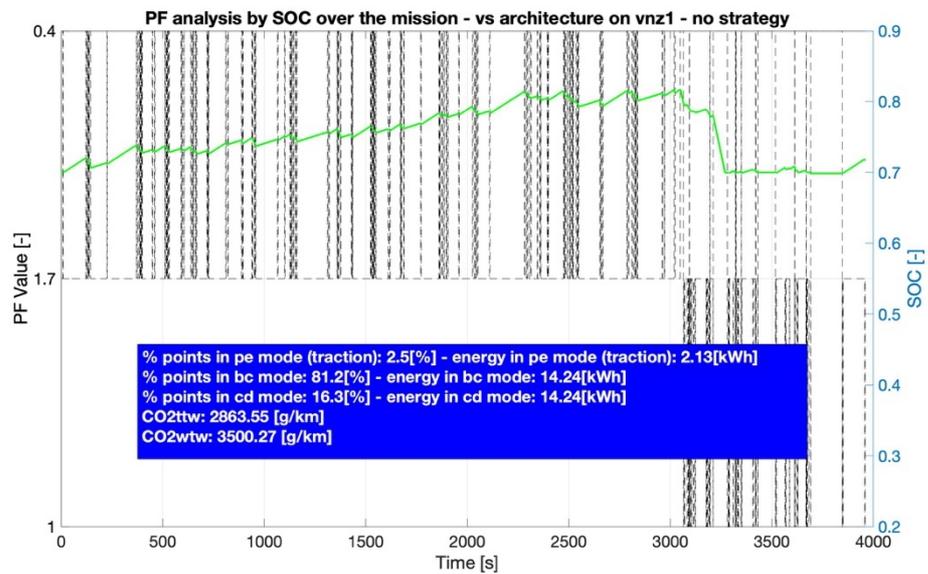


Figura 52 - Risultati prova 9

- ICE displacement [L]: 6
- Power-to-energy ratio [W/Wh]: 10
- EMr Peak Power [kW]: 147
- EM1 Peak Power [kW]: 125
- Rapporto di riduzione invertitore-riduttore: 3

COMMENTO:

Questa prova è particolarmente interessante perché è stata utilizzata quella che sarà la reale potenza installata a bordo dai vaporetta. I conducenti dei vaporetta sono abilitati alla guida di imbarcazioni con una potenza massima installata all'asse elica di 147kW. Inoltre, per non incorrere in restrizioni normative più severe, la potenza del generatore sarà di 125kW. La simulazione mostra come questa configurazione richieda un consumo di CO2 del 33% superiore rispetto alla prova 8, giudicata come la più efficiente. Il motore elettrico è costretto a lavorare in punti della mappa di efficienza più sconvenienti, questo obbliga il motore termico a dover fornire maggior potenza per sopperire alle perdite dovute alla conversione di energia da elettrica a meccanica.

4.3 CONCLUSIONI E APPLICAZIONI FUTURE

Nonostante le premesse fatte sui dati di input, il modello si è rivelato un potente strumento in fase di design. Le simulazioni permettono di capire e verificare quali sono i parametri più importanti sui quali agire per andare a dimensionare correttamente il powertrain. Nel caso specifico delle prove mostrate in precedenza, si è evidenziato che uno tra i parametri fondamentali è il *power-to-energy ratio*, ovvero il rapporto tra la potenza massima disponibile dalle macchine elettriche e la massima energia che può essere immagazzinata in batteria, che ci dà un'indicazione della capacità di carico della batteria. Dimensionare correttamente il pacco batterie è infatti di fondamentale importanza per il corretto funzionamento del sistema di propulsione ibrido e soprattutto per la vita utile del componente batterie.

Il dimensionamento corretto dei componenti prevede anche un'analisi di costo, per non incorrere in sprechi dovuti al sovradimensionamento. La taglia del motore termico incide relativamente poco sui consumi. Sono stati provati motori tra i 4,5 l e i 7 l di cilindrata con risultati simili in termini di emissione finale di CO₂ *ttw*, ovvero tank to wheel. Il valore di CO₂ *wtw* è calcolato dal modello con delle funzioni che tengono conto del consumo di CO₂ necessario per produrre le batterie.

Il focus resta quello di riuscire a fare funzionare il propulsore termico in punti ad elevato rendimento termodinamico, o nel caso specifico vaporetto, in punti in cui si ha la minor quantità di formazione di inquinanti. Questo è possibile perché in questa configurazione scollegiamo completamente l'elica dall'ICE. In un'architettura in parallelo avremmo sicuramente efficienze più alte, a fronte però di un vincolo di collegamento tra elica-motore elettrico-motore termico.

Le potenze di picco dei motori elettrici influiscono sulla potenza disponibile all'elica, quindi va fatta un'attenta previsione delle potenze che l'imbarcazione dovrà soddisfare durante le missioni giornaliere, per non incorrere in sottodimensionamento con rischio di rotture e conseguente stato di fermo della barca, creando notevoli danni economici.

Un altro aspetto fondamentale che risalta da questo elaborato, è l'importanza di considerare un progetto navale a 360°, senza tralasciare nessun dettaglio.

E' stato evidenziato come la città di Venezia giochi un ruolo fondamentale nella progettazione di queste imbarcazioni e che i vincoli di progetto non sono solo tecnologici o strutturali, ma riguardano anche l'urbanistica, la politica della città, la sua storia. Il rischio è quello di incorrere in progetti validi, ma irrealizzabili.

Per quanto riguarda lo sviluppo del modello di simulazione, le applicazioni future sono molteplici.

La prima sarebbe sicuramente quella di validare il modello attraverso l'inserimento delle mappe motore e dei cicli di richieste di potenza corretti, in modo da confrontare i dati derivanti dal risultato della simulazione in architettura convenzionale con i valori reali di emissioni ottenuti mediante prove sperimentali.

Una volta validato il modello, si può proseguire con l'implementazione di un'architettura ibrida in parallelo, in modo da verificare quale tra le due architetture sia effettivamente la più efficiente.

Un importante lavoro potrebbe essere svolto sulle regole di controllo dei flussi di potenza, implementando mappe più precise ed efficienti, introducendo anche un sistema di geolocalizzazione in modo da permettere di cambiare la mappa a seconda della parte di ciclo che si sta affrontando.

Inoltre, potrebbe essere implementata anche una parte di codice in grado di analizzare le temperature dei gas di scarico, in modo da poter studiare l'applicazione di sistemi di post trattamento come l'SCR, la cui criticità principale risiede proprio nella temperatura di funzionamento del catalizzatore. Quest'ultimo infatti necessita di elevate temperature, mentre i gas di scarico di un vaporetto sono nella maggior parte del funzionamento del motore troppo "freddi" per permettere al catalizzatore di avere un'elevata efficienza. Verificare infine gli effetti dell'applicazione dell'SCR a fronte di un aumento totale dei consumi e capire in termini di emissioni le differenze tra un propulsore termico dotato di post trattamento e un propulsore ibrido.

Il modello potrebbe poi essere utilizzato per simulare imbarcazioni diverse dal vaporetto, prevedere anche un'elettrificazione totale di alcune applicazioni, come potrebbe avvenire nel caso di alcuni traghetti previsti per il trasporto pubblico a Londra, New York e in tutte quelle città ad elevatissima densità di traffico urbano.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Rinnovabili.it/mobilita/imo-emissioni-navali/ship-emissions
- [2] G. Ferrari, "Motori a combustione interna," 2016.2007
- [3] MARPOL Convention 73/78, Annex VI, IMO, London.
- [4] Meeting the next challenge, EPA Tier 3 and EPA Tier 4 Marine Emissions Regulations, Bulletin Cummins 4082010, USA 2008.
- [5] Della Volpe R., Impianti di propulsione navale, Napoli, Liguori Editore, 2007
- [6] Ferrari A., Dati relativi all'anno 2017 ACTV s.p.a., Venezia, 2018
- [7] Prof. Zotti Igor, Definizione di metodi e strumenti necessari all'attitudine alla navigazione nella laguna di Venezia, Trieste, 2002.
- [8] Holtrop J., Mennen G.G.J., An approximate prediction method, 1983.
- [9] fptindustrial.com/global/it/motori/marini/commerciali/cursor9
- [10] Venditti M., Innovative model and algorithms for the optimization of layout and control
- [11] Trincas G., Complementi di propulsione navale, Trieste, 2009.
- [12] Gaia F., Machine learning techniques to minimize well to wheel CO₂ emissions for real time control of Plug-in-Hybrid electric vehicles, Torino, 2017.
- [13] Energy and Environmental Efficient Sea Transport, Wartsila, 2009.
- [14] List, H., Fuels for tomorrow, CIMAC AVL Research, 2007.

APPENDICE

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI TRIESTE

Dipartimento di Ingegneria Navale, del Mare e per l'Ambiente

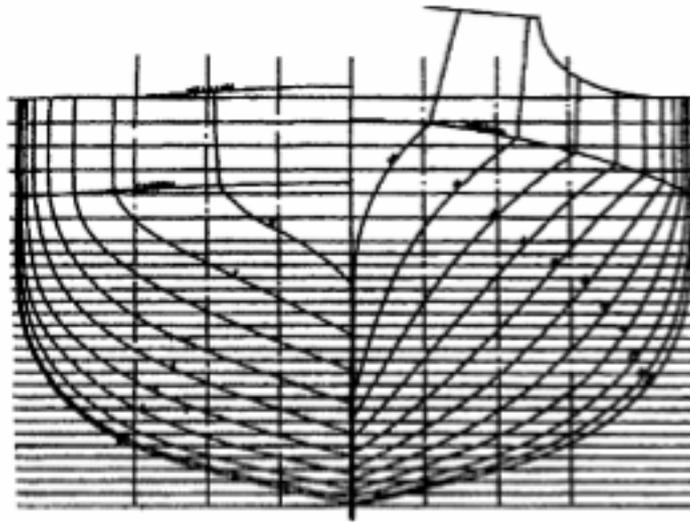
DEFINIZIONI DI METODI E STRUMENTI NECESSARI ALLA VERIFICA
DELL'ATTITUDINE ALLA NAVIGAZIONE NELLA LAGUNA DI VENEZIA

APPLICAZIONE DELLE SERIE SISTEMATICHE E VERIFICA DEI RISULTATI

Contributo del prof. ing. Igor ZOTTI

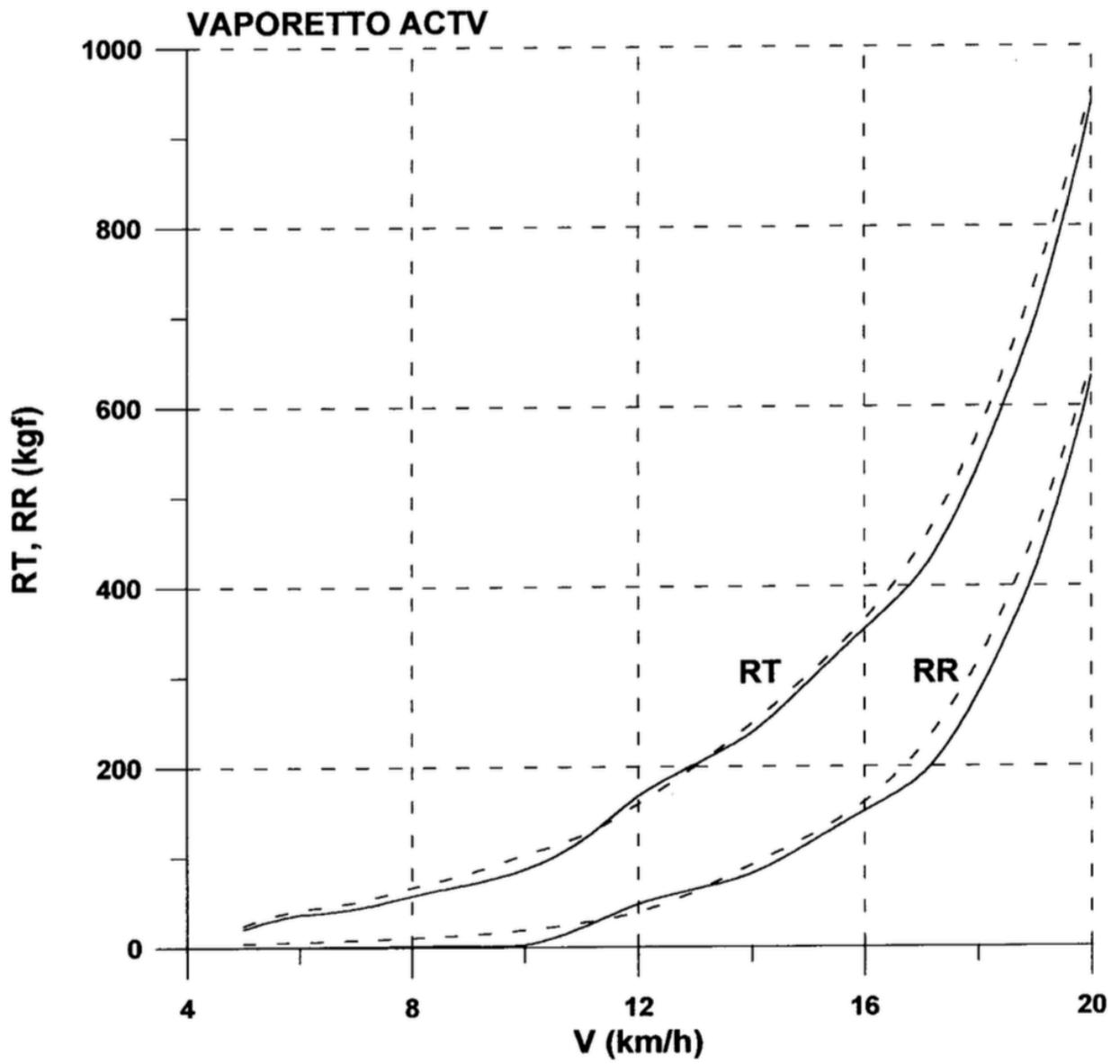
Trieste, Dicembre 2002

VAPORETTO ACTV



Caratteristiche principali della carena

- Lunghezza fuori tutto 22.98 m
- Lunghezza al galleggiamento 21.85 m
- Larghezza massima 4.22 m
- Larghezza al galleggiamento 4,20 m
- Immersione media 1,40 m
- Dislocamento 53,15 t
- Superficie bagnata di carena 83,35 m²



RINGRAZIAMENTI

Con questo elaborato si conclude il mio percorso universitario. Chi mi conosce sa quanto questo percorso sia stato pieno di alti e bassi, soprattutto inizialmente quando lo studio non era proprio in cima alla lista delle mie priorità. Poi qualcosa è cambiato, e ho dato tutto per recuperare il tempo perduto, tuttavia la lezione più importante che ho imparato in questi anni non riguarda nessun corso di studi o nessun concetto scientifico, ma me stesso: la vita, come l'università, non è una competizione tra le persone, non è una gara a chi arriva più in alto. L'unica sfida importante la affrontiamo con noi stessi, quando ci poniamo la domanda "cosa mi rende felice?". Ecco, penso che ognuno di noi dovrebbe concentrarsi molto più su sé stesso, capire la propria persona, le proprie passioni qualsiasi esse siano, sul raggiungimento di una realizzazione personale, e guardare meno la vita degli altri.

Rinnovo i miei ringraziamenti ad Antonio Ferrari, che è stato un supporto fondamentale per questo elaborato e che, oltre ad insegnarmi concetti sui vaporetti, mi ha mostrato la sua realtà, parlandomi di Venezia come un'"incubatrice di relazioni umane", dandomi quella marcia in più che solo chi fa il proprio lavoro con passione riesce a trasmettere. Grazie per il supporto ma soprattutto per la tua amicizia.

Non potrei non ringraziare i miei amici, vicini e lontani, che sono sempre stati al mio fianco durante questi anni, troppi per essere nominati ma tutti per me fondamentali. Ci tengo tuttavia a ringraziare in modo speciale quelli che nel tempo sono diventati per me una seconda famiglia, e che leggendo queste parole capiscono che mi sto riferendo a loro senza dover aggiungere altro. Grazie, *branco*.

Un ringraziamento più che speciale va a Michela, che più di tutti ha avuto la pazienza e la capacità non indifferente di starmi vicino ogni giorno, di ascoltare tutti i miei sfoghi, le mie ansie, i miei silenzi. Grazie soprattutto per aver condiviso con me le gioie, le non gioie, i successi e le sconfitte, il tempo libero, i progetti. Grazie, perché per me sei tutto, amore amicizia, e complicità. Grazie per essere la bellissima persona che sei.

Ed infine, i ringraziamenti più importanti. Guardandomi intorno capisco che non è una cosa scontata trovare nella propria famiglia un porto sicuro in cui rifugiarsi. In questo, credo di essere la persona più fortunata del mondo, la mia famiglia è speciale. In loro non ho trovato solo l'affetto, che è già una cosa bellissima, ma soprattutto una stima incondizionata nei miei confronti che mi ha permesso e mi permetterà di affrontare qualsiasi sfida. Se questa stima è così importante è perché proviene dalle persone che più ammiro in assoluto. Ringrazio mio papà, per essere il mio migliore amico, l'idolo dei miei amici, ma soprattutto il mio idolo, spero in futuro di diventare per mio figlio anche solo una parte di quello che sei tu per me. Ringrazio mia mamma, che è la persona più buona e bella che conosca, che mi ha insegnato a rispettare sempre gli altri, ad essere una persona migliore e a non dubitare mai di me stesso. Ringrazio mia sorella, a cui dico troppo poco spesso ti voglio bene, ma a cui voglio bene davvero, e Leonardo, che si prepara a conoscere il mondo.

