

POLITECNICO DI TORINO
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria
Meccanica



*Eco-sostenibilità dei trasporti navali di
tipo elettrico con sistema di propulsione
supportato da un gruppo batterie
ricaricate dal motore Stirling*

Relatore
Prof. Umberto Lucia
Corelatore
Prof. Ezio Spessa

Studente:
Rosa Leone (244335)

Aprile 2020

Alla mia famiglia

Indice

Abstract	II
Ringraziamenti	IV
1 La sostenibilità dei trasporti navali	1
1.1 Aspetti negativi della navigazione	2
1.1.1 L'impatto ambientale della navigazione	2
1.1.2 Inquinamento acustico	2
1.1.3 Danneggiamento flora e fauna	2
1.1.4 Rifiuti solidi	3
1.1.5 Gas di scarico	3
1.2 Aspetti positivi della navigazione	4
2 Introduzione al motore Stirling	6
2.1 La storia del motore Stirling	6
2.2 Trattazione funzionale del motore	8
2.3 Configurazioni di motore Stirling	9
2.4 Configurazione alpha	9
2.5 Configurazione beta	10
2.6 Configurazione gamma	11
2.7 Possibili fonte di calore esterna	12
2.8 Ciclo Stirling ideale	13
2.9 Ciclo Stirling reale	17
2.9.1 Perdite dovute alla velocità finita del pistone	18
2.9.2 Perdite per isteresi	18
2.9.3 Perdite per conduzione di calore	19
2.9.4 Perdite dovute allo shuttle del displacer	19
2.9.5 Perdite per attrito meccanico	20
2.9.6 Perdite dovute agli spazi morti	20
2.9.7 Perdite dovute agli scambiatori	20
2.9.8 Perdite nel rigeneratore	20

3	Generalità sulla propulsione navale tradizionale	22
3.1	La ruota a pale	22
3.2	L'elica	23
3.3	Il propulsore Voith Snyder	26
3.4	L'idrogetto	27
3.5	L'azipod	27
3.6	Motore diesel	28
4	Propulsione navale elettrica	31
4.1	Motore a corrente continua	32
4.2	Motore asincrono	34
4.2.1	Rotore fermo con circuito di rotore aperto	35
4.2.2	Rotore in movimento con circuito di rotore aperto	36
4.2.3	Rotore in movimento con circuito di rotore in cortocircuito	36
4.2.4	Variazione delle coppie polari	40
4.2.5	Variazione dello scorrimento	40
4.2.6	Variazione della tensione di alimentazione	40
4.2.7	Variazione della frequenza di alimentazione	40
4.3	Motore sincrono	41
4.4	Convertitore di frequenza	42
4.4.1	Funzionamento del cicloconvertitore	42
4.4.2	Funzionamento del sincroconvertitore	44
4.4.3	Funzionamento del convertitore a commutazione forzata	45
4.5	Batterie agli ioni litio	47
5	Dimensionamento del sistema elettrico e tradizionale	49
5.1	Dimensionamento del sistema elettrico	49
5.1.1	Diametro e numero di giri ottimale	51
5.1.2	Numero di pale	59
5.1.3	Rapporto di area espansa	60
5.1.4	Passo e rapporto P/D	62
5.1.5	Dimensionamento del motore/generatore elettrico asincrono	62
5.1.6	Inverter DC/AC posizionato tra motore elettrico e gruppo batterie	66
5.1.7	Batterie agli ioni litio	68
5.1.8	Motore Stirling	71
5.2	Dimensionamento del sistema tradizionale	74
5.3	Confronto delle emissioni tra sistema tradizionale ed elettrico	77
6	Simulazione del carico richiesto dalla nave su 18 h di viaggio	81

7	Impianti di bordo	86
7.1	Impianto ad osmosi inversa	86
7.2	Impianto di trattamento acque reflue	90
7.3	Impianto di trattamento acque di sentina	92
7.4	Impianto luci	93
7.5	Impianto di climatizzazione e di trattamento dell'aria	95
7.5.1	Caso estivo	99
7.5.2	Caso invernale	100
8	Conclusioni	108
A	Tecnica del Pulse Width Modulation(PWM)	110
B	Le armoniche	112
	Bibliografia	114

Abstract

Lo scopo fondamentale di questa tesi é quello di mettere in risalto la sostenibilità dei trasporti navali, privilegiando un sistema di propulsione di tipo elettrico che sostituisce quello tradizionale con l'obiettivo di ottenere una riduzione delle emissioni inquinanti. Il fulcro di questo lavoro é evidenziare la possibilità di poter ricaricare le batterie del sistema elettrico, dopo alcune ore di autonomia di viaggio della nave, attraverso l'uso di un motore Stirling di elevata potenza elettrica. La problematica delle emissioni ad oggi é il fulcro di numerose discussioni affrontate dai governi e dall'Organizzazione Mondiale Della Sanità, considerando che queste generano numerosi danni ambientali e sono la causa di molti problemi di salute per il genere umano. Nei vari capitoli si affronteranno le seguenti tematiche in dettaglio:

- sostenibilità dei trasporti navali sottolineando soprattutto i vantaggi come ad esempio la diminuzione dei costi di trasporto, degli incidenti, dei tempi morti e delle emissioni.
- trattazione funzionale e descrittiva di tutti i componenti del sistema elettrico, e in particolare del motore elettrico trifase, degli inverter convenzionati alla variazione delle velocità dell'elica della nave, e delle batterie agli ioni litio. Si descrive anche il motore diesel con il ciclo termodinamico, riguardante il sistema tradizionale. Una trattazione più dettagliata sarà riferita al motore Stirling, essendo un motore esotermico molto versatile, efficiente come i motori tradizionali, con ridotte vibrazioni e rumori. La sorgente di calore può essere alimentata sia con i combustibili tradizionali, che con altre fonti ecosostenibili. Il suo ciclo termodinamico é un ciclo chiuso, e ne consegue che il fluido di lavoro (aria o elio) rimane all'interno del cilindro. Inoltre non ha bisogno di molta manutenzione per la semplicità della struttura e per la limitazione di parti in movimento;
- dimensionamento dell'elica sulla base di un numero di giri ottimali che non si discostano di molto da quelli del motore elettrico e che dia una potenza assorbita non molto differente da quella effettiva;
- dimensionamento del sistema elettrico e tradizionale (con riduttore e motore diesel) nelle condizioni estreme di richiesta di massimo carico da parte della nave in tutto il viaggio considerato su 24 h;

- definizione delle emissioni inquinanti nei due casi (elettrico e tradizionale) e calcolo della riduzione delle emissioni;
- dimensionamento e calcolo delle potenze sia nel caso elettrico che tradizionale per una simulazione basata su un andamento più realistico della nave, e con conseguente calcolo delle emissioni con relative considerazioni sulla riduzione.

Ringraziamenti

Un ringraziamento speciale va al mio relatore Umberto Lucia che mi ha guidato per ogni mia difficoltà durante tutte le consulenze, e mi ha sempre indirizzato verso la soluzione migliore con grande umanità e professionalità; e al corelatore Ezio Spessa che ha contribuito nella definizione degli ultimi particolari della tesi. Un ringraziamento speciale è indirizzato a mia sorella che mi ha sostenuto in tutte le mie scelte, motivandomi e incoraggiandomi nei momenti più difficili di questo percorso; e soprattutto ai miei genitori che hanno avuto sempre molta fiducia in me. Un ultimo ringraziamento va a tutte le persone incontrate durante il mio percorso universitario, e in particolare a Nicola C. e Alberto B. che hanno avuto un'enorme pazienza nel sapermi ascoltare, e a Angelo D. che mi è stato di grande aiuto fin dal primo giorno universitario. Da non dimenticare Elia L., Daniele C., Piero F., Alessio L., Mario B., Federico L., Mattia L., che hanno contribuito a rendermi i giorni e le lezioni universitarie molto più leggere.

Ci terrei a precisare che le vicende della vita universitaria al Politecnico di Torino non sono affatto semplici da affrontare, ma comunque devo tanto a questa istituzione soprattutto per tutte le esperienze trascorse negli ultimi anni, che si sono rivelate di fondamentale importanza per la crescita personale.

Capitolo 1

La sostenibilità dei trasporti navali

Al giorno d'oggi il trasporto marittimo è una delle più grandi risorse ecosostenibili per la movimentazione di persone, merci, e prodotti di ogni genere (come ad esempio prodotti agricoli, chimici e materie prime), sfruttando il mare per la riduzione dei tempi di spostamento e soprattutto dei tempi morti che tanto rallentano il trasporto merci in città tramite mezzi pesanti. Tutto questo incide sul prodotto finale con un taglio dei costi, il quale rappresenta un ottimo aspetto a livello competitivo. Si ha, di conseguenza, sia un vantaggio economico sia uno ambientale, dovuto ad un calo delle emissioni inquinanti. Il 12 Novembre 2017 la Cina ha messo in campo la prima nave totalmente elettrica, realizzata dalla 'Guangzhou Shipyard International Company', adibita al trasporto di 2000 tonnellate di merci([40]). Il sistema elettrico è supportato da un insieme di batterie da 2400 kWh([40]). Se da un lato si riduce ulteriormente l'inquinamento, con emissioni tendenti a zero, sfruttando l'energia elettrica, dall'altro si ha la problematica relativa all'autonomia di questa nave, in quanto necessita di soste opportune per ricaricare la batteria ogni 80 chilometri circa([40]). Si potrebbe pensare di dare un supporto alla batteria con il motore Stirling, sia perchè è un motore con un'efficienza elevata e con ottime prestazioni confrontabili con i motori a combustione interna; sia perchè si potrebbe alimentare con qualsiasi fonte di energia anche rinnovabile in modo da rientrare nell'ottica di sensibilizzazione del rispetto ambientale. Questo potrebbe rappresentare un ottimo compromesso tra un risparmio dei costi, come conseguenza dei tempi di navigazione molto più limitati a causa dell'annullamento delle soste per la ricarica; e un minore impatto ambientale dovuto all'abbattimento di una percentuale considerevole degli inquinanti.

1.1 Aspetti negativi della navigazione

Di seguito si analizzano tutti gli aspetti negativi, i quali simboleggiano i presupposti per evitare la navigazione marittima.

1.1.1 L'impatto ambientale della navigazione

Le navi incidono negativamente sull'ambiente nel momento in cui si verificano eventi poco piacevoli dovuti al rovesciamento delle petroliere, e all'emissione di gas serra; infatti si ritiene che le emissioni di anidride carbonica siano comprese tra il 4% ed il 5% del totale globale, ma l'Organizzazione marittima internazionale (IMO) ha esplicitato che queste raggiungeranno valori più elevati, entro il 2020 se non saranno prese misure preventive per evitare che si raggiunga circa il 72%([1]).

1.1.2 Inquinamento acustico

Le navi rappresentano una fonte di rumore non indifferente che disorienta tutte le specie animali che fanno riferimento a suoni particolari, utili ad esempio per dirigersi verso la fonte di cibo e mete prefissate([1]). Inoltre può generare anche danni a livello di sensibilità umana, generando stress e malcontenti, specialmente per chi abita in zone portuali([1]). Si parla in questo caso di inquinamento acustico([1]).

1.1.3 Danneggiamento flora e fauna

Recenti studi sono stati condotti sulle eventualità che le navi hanno di urtare animali marini, a volte in rischio di estinzione, sottolineando la pericolosità di queste non solo per la fauna ma anche per la flora marina. I disastri petroliferi, infatti, costituiscono un ulteriore danno a questi ultimi, sebbene non siano molto frequenti. Inoltre, il petrolio formato da idrocarburi policiclici aromatici, danneggia gravemente l'ambiente marino, soprattutto nel momento in cui le acque marine devono essere epurate a causa dei sedimenti che vengono a depositarsi([1]).

Lo scarico di acque reflue, è un ulteriore problema che va ad aggiungersi al precedente elenco, essendo acque poco pulite provenienti dagli scarichi (docce, lavabo, fognone, ecc) contenenti vari tipi di batteri, virus, e residui dannosi non solo per la salute dei pesci e di ogni forma animale subacquea, ma anche di tutti coloro che si cibano di quest'ultimi([1]). La presenza di azoto e fosforo fa accrescere alghe marine, che assorbono grandi quantità di ossigeno a discapito di altre specie marine([1]). Alcune navi da crociera, nel rispetto delle normative per la navigazione, si sono munite a bordo di bioreattori chimici che puliscono queste acque e le riutilizzano per altre attività per quanto possibile nel rispetto delle norme sull'igiene([1]).

Una modifica dell'ambiente marino dovuto al mescolamento di specie animali e vegetali, avviene a causa delle acque di zavorra, che vengono portate da un porto

all'altro, dato che queste sono gettate in mare da una nave e riprese da un'altra per essere poi nuovamente depositate.

1.1.4 Rifiuti solidi

Le navi producono un'enorme quantità di rifiuti solidi, basti pensare alla plastica, vetro, carta e residui metallici di vario genere. La maggior parte vengono riciclati sulla nave stessa, altri vengono bruciati, i cui residui sono gettati in mare. Si é valutato che oltre il 30% di rifiuti solidi marini ha origine dalle navi da crociera([1]).

1.1.5 Gas di scarico

I gas di scarico provenienti dalla combustione dei motori marini si annoverano tra le maggiori cause di inquinamento atmosferico([1]), come si può vedere nella figura 1.1. Le emissioni via mare più cruciali rilasciate dalla combustione di combustibili marini consistono di:

- ossidi di azoto(NO_x);
- ossidi di zolfo(SO_x);
- monossido di carbonio(CO);
- anidride carbonica(CO_2);
- particolato(PM).



Figura 1.1. Gas di scarico dei motori marini([5])

La presenza di tali inquinanti influisce sull'ambiente e sulla salute del genere umano con cancro polmonare, morte cardiopolmonare, bronchiti, polmoniti e surriscaldamento climatico([2]). In vigore ci sono svariate normative che regolano questa tipologia di emissioni e per citare qualcuna si ricorda "L'allegato VI" il quale sollecita la riduzione di solfuri dal 3,50 %al 0,50 %nel 2020([2]).

1.2 Aspetti positivi della navigazione

L'uso delle navi apporta molti svantaggi, ma anche dei vantaggi che portano a preferirle rispetto agli altri trasporti. Di seguito se ne riportano alcuni:

- riduzione dei tempi di trasporto merci, e conseguentemente costi inferiori sul prodotto finale. Il traffico navale é quasi del tutto inesistente per l'enorme capacità marittima; i possibili ritardi potrebbero derivare da condizioni meteo non ottimali. I costi dovuti ai ritardi generati dalla congestione stradale per il sottodimensionamento stradale, sono molto elevati.
- mobilità di persone con ricaduta positiva sull'economia del Paese;
- costi inferiori nel trasporto merci rispetto agli altri mezzi terrestri e aerei;
- tasso di inquinamento per gas di scarico inferiore rispetto ai trasporti stradali, che ne delineano il maggior contributo. Uno studio del 2015 ha confermato che il 73%é dovuto al trasporto stradale, il 13%al trasporto marittimo, il 13%all'aviazione, lo 0,5%al trasporto ferroviario e lo 0,5%restante agli altri trasporti([4]), come é presentato in figura 1.2. I gas inquinanti dei trasporti stradali si estendono su un'area maggiore rispetto a quelli prodotti dalle navi, con una conseguente ripercussione sulla salute umana e sull'ambiente.
- probabilità limitata di incidenti nel trasporto merci, considerando le possibili conseguenze dannose che possono subire le persone coinvolte. In media, lo spostamento di una tonnellata di merce attraverso la navigazione marittima implica un pericolo di collisione di tre volte più basso rispetto al trasporto su strada([3]).Se si fa riferimento alla sicurezza, solo il trasporto ferroviario rispetto a quello marittimo, implica una pericolosità ancor più ridotta(circa la metà della navigazione, 8 volte inferiore rispetto alla strada)([3]).
- percentuale di inquinamento acustico bassa. Le navi producono una certa quantità di rumore a causa dell'attività dei motori di propulsione e di quelli secondari adibiti ai servizi di bordo durante la sosta in porto, ma da un recente studio condotto dall'Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (ANPA) si é evidenziato che il suono prodotto dai motori é marginale,

pertanto la popolazione è esposta maggiormente al traffico stradale nelle vicinanze del porto e al movimento dei veicoli terrestri in entrata e in uscita dallo stesso.([3]).

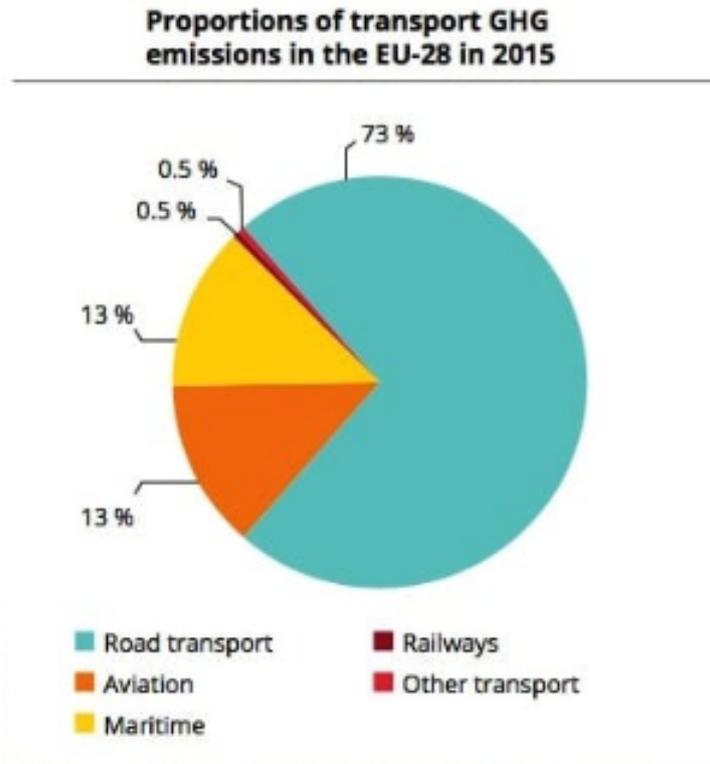


Figura 1.2. Proportions of transport GHG emissions in the EU-28 in 2015([4])

Da questa trattazione sembra quasi che gli svantaggi predominino sui vantaggi, invece se si dovesse fare un'analisi accurata e globale del tutto, ci si rende conto dell'enorme importanza della navigazione. Il rispetto delle normative risulta fondamentale, in quanto si eliminerebbero molte problematiche descritte negli aspetti negativi, quindi il più delle volte la causa è l'atteggiamento errato del genere umano. Il risparmio dei costi, dovuti principalmente alla riduzione dei tempi di trasporto merci, e un minore inquinamento sia ambientale che acustico costituiscono delle ottime motivazioni per preferirla.

Capitolo 2

Introduzione al motore Stirling

In questo capitolo si introdurrà il motore Stirling in tutti i suoi aspetti generali. Si faranno brevi cenni storici specificandone gli sviluppi tecnologici e i vari utilizzi nei decenni per poi proseguire nella descrizione delle caratteristiche tecniche e costruttive e nell'analisi del ciclo termodinamico. Si elencheranno le varie configurazioni del motore con le rispettive applicazioni nella società attuale, puntualizzando anche le prospettive e le intenzioni future.

2.1 La storia del motore Stirling

L'invenzione del motore Stirling si deve a Robert Stirling nel 1816, negli anni della rivoluzione industriale, in sostituzione a caldaie e macchine a vapore, che spesso scoppiavano degenerando in eventi fatali, e con l'obiettivo di risparmiare carburante e combustibili ai tempi molto costosi([6]). Il suo prototipo di motore, come è riportato in figura 2.1 aveva all'interno un economizzatore, con l'ottica di risparmio([6]). Inizialmente fu utilizzato per sollevare acqua e per movimentare aria, poi nel XX secolo fu sostituito da motori a combustione interna e motori elettrici, finché Philips nel 1930 ne fece uso nello sviluppo di radio nelle aree poco raggiungibili dall'elettricità([6]). L'azienda Philips continuò a cimentarsi con lo Stirling, usandolo in particolare nel criorefrigeratore([6]).

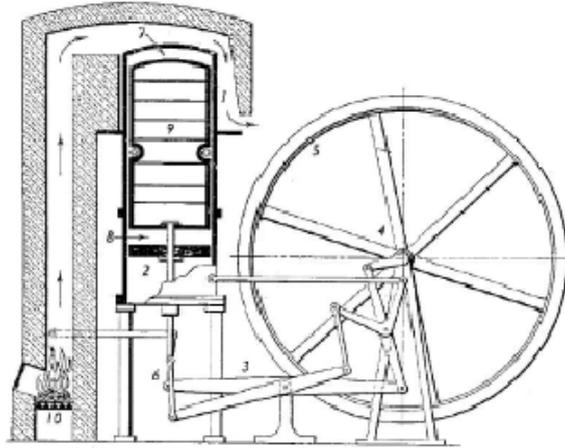


Figura 2.1. Reproduction of drawing showing the first Stirling engine([9])

Il motore Stirling ha affascinato sia fisici e ingegneri, che universitari di tutto il mondo, ponendolo al centro dell'attenzione in molte ricerche scientifiche, ma non ha avuto mai un'enorme successo a causa dei costi elevati. Può essere utilizzato come motore, pompa di calore e refrigeratore(nei processi alimentari a livello industriale e anche nelle applicazioni domestiche).Il funzionamento del motore é correlato alla struttura e dimensioni, ai coefficienti di scambio termico, alla tipologia degli scambiatori di calore e al rigeneratore. Oggi giorno viene utilizzato in moltissime applicazioni, come per esempio nei dischi solari, nei sottomarini, negli impianti cogenerativi e nella criorefrigerazione. I sistemi a micro-cogenerazione(CHP) sono dei sistemi all'avanguardia sia per la produzione di elettricità sia per il riscaldamento. Si sceglie un combustibile da bruciare(in alternativa si può ricorrere ad energia solare evitando la combustione esterna),e con il calore prodotto dalla combustione viene inviato al motore Stirling, di cui una parte sarà trasformato in lavoro meccanico e a sua volta trasformato da un generatore in energia elettrica. Il calore dei gas di scarico può essere sfruttato per preriscaldare l'aria comburente e aumentarne in questo modo l'efficienza, oppure può rappresentare la fonte di calore per il riscaldamento domestico. I dischi solari rappresentano la tecnologia del futuro, che vede il motore Stirling funzionare attraverso l'energia solare, oppure con energia solare e combustibili fossili nel caso si voglia avere una continuità di funzionamento. In questo caso particolare si parla di sistema ibrido. Il sistema é adattabile e modulare, caratterizzato da specchi altamente riflettenti di forma circolare adibiti al raccoglimento della luce solare attraverso dei concentratori. Maggiore sarà il numero di specchi migliore sarà l'efficienza. La luce poi é mandata ai ricevitori presenti sul motore, che a loro volta si attivano per convogliare questa energia al fluido di lavoro. L'unico svantaggio é l'elevato costo di installazione. La questione dell'impatto ambientale e i numerosi tentativi di sfruttare fonti energetiche rinnovabili, hanno

preparato il terreno al motore Stirling, essendo una macchina che può essere alimentata anche con energia solare, biomasse e biogas rispetto ai normali motori a combustione interna. Inoltre, lo sviluppo del motore non è dovuto solamente a un vantaggio di tipo ambientale, ma anche a benefici energetici (essendo in grado di produrre un'efficienza termica ottimale) e di risparmio sul costo del combustibile. Per il settore automotive può rappresentare un ottimo marchingegno, sia per la convenienza energetica che ambientale, ma uno dei fattori che ne ostacola la diffusione è un basso rapporto potenza-peso, motivo per il quale lo si utilizza maggiormente in condizioni statiche. Nel 2018 la NASA ha brevettato un motore Stirling ad energia nucleare, per veicoli e sonde spaziali([6]).

2.2 Trattazione funzionale del motore

Lo Stirling è un motore termico alternativo con la particolarità di essere a combustione esterna, rispetto ai normali motori diesel e a benzina, caratterizzati dalla combustione interna, di conseguenza dovrà disporre di scambiatori di calore adibiti all'assorbimento e al rilascio di energia da fonti energetiche esterne. L'obiettivo sarà quello di convertire l'energia termica in energia meccanica. Uno scambiatore di calore, lavora sul lato caldo, in contatto con la sorgente di calore; lo scambiatore freddo, invece, è a contatto con il fluido refrigerante. Un terzo scambiatore chiamato rigeneratore è interposto tra gli altri due scambiatori, in modo che il fluido lo attraversi e ne migliori l'efficienza termica considerando che preriscalda nel momento in cui il fluido passa dalla fase di compressione a quella di espansione, invece preraffredda nel movimento contrario([6]). Il rigeneratore, è un componente di fondamentale importanza, costituito da una maglia metallica sottile tale da consentire il passaggio del fluido con facilità e con una determinata velocità che incide notevolmente sulla resa del ciclo termico. La vita a fatica risulta di gran lunga superiore rispetto agli altri motori, in quanto l'assenza di valvole e di altri componenti meccanici in movimento, ne riducono l'usura, e lo strisciamento specifico che ne deteriora le superfici metalliche, e ne garantisce un'economicità dal punto di vista della manutenzione. Un punto a sfavore del motore è la scarsa prontezza nell'avviamento([6]). Può essere alimentato con qualsiasi fonte di energia ed ha un ciclo termodinamico chiuso, ovvero il fluido rimane all'interno della macchina in tutte le fasi caratterizzanti il ciclo termodinamico stesso. Il fluido di lavoro è solitamente un gas come elio, azoto aria o idrogeno([6]). La scelta del gas presenta alcune problematiche:

1. l'elio(ampiamente diffuso in natura) appartiene alla famiglia dei gas nobili, si presenta come un gas leggero, ed è sicuro per l'inerzia, inoltre garantisce un incremento dell'efficienza del ciclo, anche se risulta essere molto costoso([6]). Il requisito della sicurezza è fondamentale per questa applicazione.

2. l'aria é un gas molto comune, con costi tendenti a zero, ma può generare esplosioni se viene a contatto con altre sostanze(come per esempio i lubrificanti) ed é ad elevate pressioni, di conseguenza si cerca di adoperare altre tipologie di gas([6]);
3. l'idrogeno potrebbe essere il gas perfetto per il motore Stirling caratterizzato da scarse perdite per attrito viscoso e da un calore specifico basso, ma alcuni aspetti legati alla sicurezza(si faccia riferimento all'infiammabilità) e all'infra-
gilitamento delle superfici metalliche nelle quali si diffonde, non lo renderebbero un gas adeguato([6]).

La dinamica del motore si deve alla movimentazione dei pistoni all'interno dei cilindri, il cui numero é variabile da una tipologia costruttiva ad un'altra.

2.3 Configurazioni di motore Stirling

Si possono distinguere tre tipologie principali, le cui caratteristiche e peculiarità sono discusse qui di seguito, riportate in figura 2.2

1. configurazione alpha;
2. configurazione beta;
3. configurazione gamma.

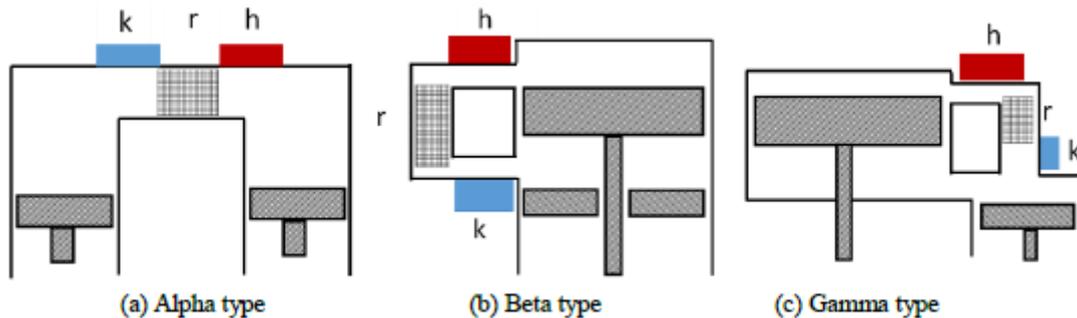


Figura 2.2. Three type of Stirling engine([9])

2.4 Configurazione alpha

I componenti principali di questa configurazione sono il cilindro caldo(di espansione) nelle vicinanze dello scambiatore di calore caldo, e il cilindro freddo(di compressione) nelle vicinanze dello scambiatore di calore freddo, uniti sul volano da un sistema

biella-manovella. Tra i due cilindri è posizionato il rigeneratore. Il punto di forza è la semplicità, ma contemporaneamente presenta delle difficoltà nella tenuta del fluido ad elevate temperature, le quali compromettano l'integrità delle guarnizioni. La struttura tipica è riportata in figura 2.3

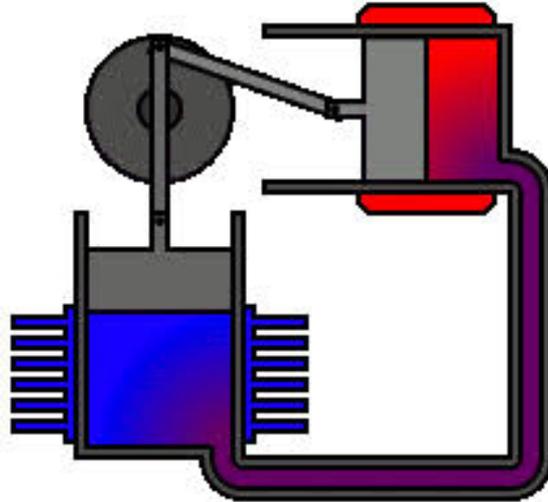


Figura 2.3. Alpha-type Stirling engine([6])

Il fluido di lavoro subisce delle trasformazioni fisiche all'interno del ciclo:

1. inizialmente il gas viene spostato dal displacer verso il pistone di espansione, si riscalda e subisce un'espansione facendo muovere verso il volano il pistone motore. La pressione e la temperatura aumentano, e si assiste ad una trasformazione del calore in lavoro meccanico;
2. successivamente il sistema biella-manovella tende a stabilizzare il pistone motore, spingendo nuovamente il gas verso il displacer. Il displacer si muove tale da garantire un contatto del gas caldo con lo scambiatore freddo;
3. il gas a contatto con il refrigeratore si raffredda abbassando sia la temperatura che la pressione. Il pistone motore si sposta verso il volano, inducendo il displacer a spostare il gas verso esso. Il ciclo ricomincia.

Il movimento continuo e sinusoidale dei due pistoni è dovuto al volano, che accumula e rilascia energia quando è necessario.

2.5 Configurazione beta

Costituita da un solo cilindro, all'interno del quale si ha un pistone di potenza e un dislocatore, che movimentata il gas nel ciclo([6]). Il dislocatore(o displacer) è

un pistone posizionato nella parte bassa, mentre nella parte alta vi è il pistone di potenza. La compressione e l'espansione del gas è gestita dal volano che contrae o espande il pistone motore. La testata del motore è a contatto con una fonte di calore, invece le pareti sono adiacenti ad una sorgente fredda. Il fluido viene riscaldato dalla sorgente calda e nella sua espansione spinge il pistone verso l'alto, generando una rotazione del volano che a sua volta con il sistema biella-manovella abbassa il displacer verso il basso. In questo modo il displacer ostacola il passaggio di calore dalla sorgente al fluido, creando una barriera isolante. Ne segue il successivo raffreddamento del fluido che nella contrazione richiama il pistone a scendere nuovamente verso il basso. Il ciclo è caratterizzato da queste fasi che si ripetono in progressione. Bisogna porre attenzione alla possibile interazione tra la parte calda e quella fredda, per cui solitamente si adottano isolanti che attenuano lo scambio termico convettivo. Ha un'efficienza superiore rispetto alle altre due configurazioni. Un esempio è raffigurato in 2.4

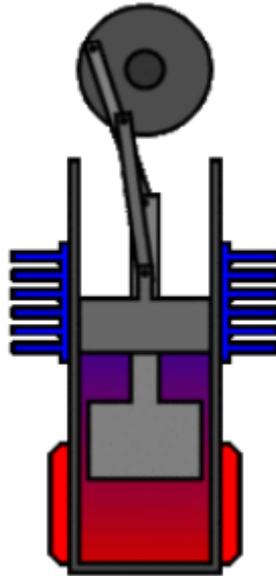


Figura 2.4. Beta-type Stirling engine([6])

2.6 Configurazione gamma

Questa configurazione è molto simile a quella di tipo beta, ma ciò che la differenzia è la separazione del pistone motore e del displacer in due cilindri differenti e collegati tra di loro([6]). Il displacer e il pistone motore sono posizionati in parallelo o perpendicolarmente. La presenza di spazi morti risulta essere superiore rispetto alla configurazione di tipo beta e ne riduce l'efficienza del ciclo. L'assetto in parallelo è da preferire perchè ne riduce le perdite per attrito e risulta essere più agevole

per la lubrificazione. La struttura meccanica é adatta a motori multi-cilindro. Una rappresentazione di questa tipologia é nella figura 2.5

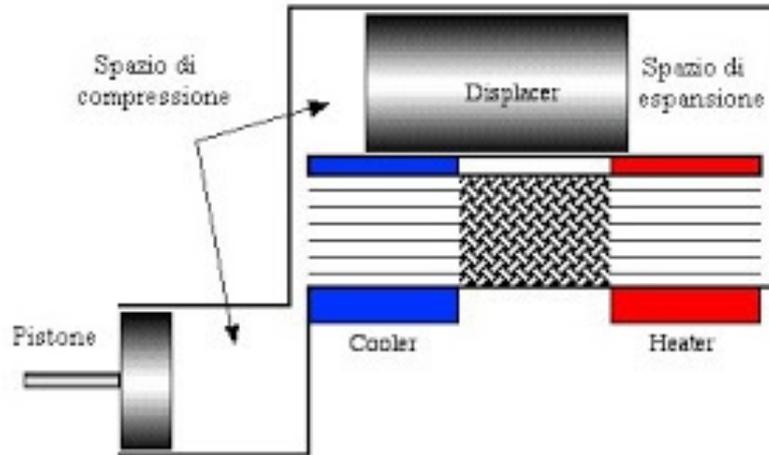


Figura 2.5. Configurazione gamma([9])

2.7 Possibili fonte di calore esterna

Lo scambiatore di calore sul lato caldo deve assorbire calore da una fonte esterna che può essere energia solare, geotermica, nucleare, biocombustibili (biogas e biomasse) e gas di scarico di altri motori ([6]). Alcuni biocombustibili di ultima generazione sono i pellets, derivati da scarti legnosi e da materiale organico, solitamente di forma cilindrica; sono caratterizzati da un potere calorifico superiore alla legna, e di conseguenza generano più calore, ma come la legna sono influenzati dall'umidità che ne riduce il potere calorifico ([8]). Se si facesse un confronto con altri tipi comuni di combustibili fossili quali gasolio e benzina, si noterebbe un potere calorifico inferiore, ma il suo utilizzo sarebbe da preferire a questi ultimi per la sostenibilità ambientale, la reperibilità, e il minor costo ([8]). Le biomasse sono costituite da rifiuti agricoli, urbani, legnosi e organici che vengono adibiti alla produzione di energia termica ed elettrica nel rispetto dell'ambiente, nonostante i costi per la lavorazione e il trasporto risultano piuttosto alti, superando anche quelli dei combustibili fossili. Il biogas, composto da metano per il 70-80 %, e da anidride carbonica, invece, é prodotto da microrganismi che lavorano in assenza di ossigeno nei digestori anaerobici, il cui numero dipende dal carico organico usato. Le pompe dell'aria lavorano per garantire la ventilazione dell'aria nei digestori.

2.8 Ciclo Stirling ideale

Il ciclo termodinamico é un ciclo chiuso caratterizzato principalmente da 4 fasi, le quali sono definite da precise equazioni termodinamiche. Si hanno due fasi di scambio termico a temperatura costante con le sorgenti di calore, e altre due isocore caratterizzate da un assorbimento e rilascio di calore con il rigeneratore.

- configurazione 1-2: compressione isoterma;
- configurazione 2-3: riscaldamento isocoro;
- configurazione 3-4: espansione isoterma;
- configurazione 4-1: raffreddamento isocoro;

Nella figura 2.6, 2.7 si riportano rispettivamente il diagramma P-V e T-S.

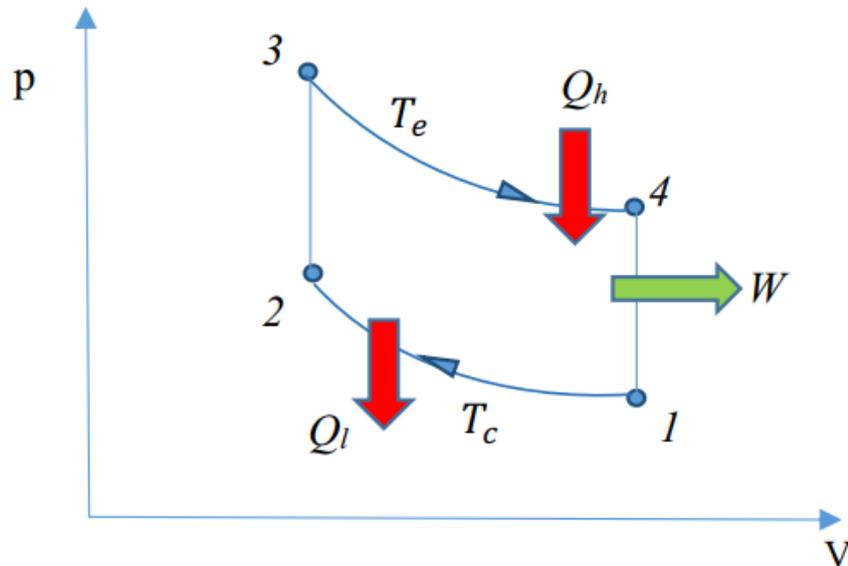


Figura 2.6. Ideal Stirling cycle(PV diagram)([9])

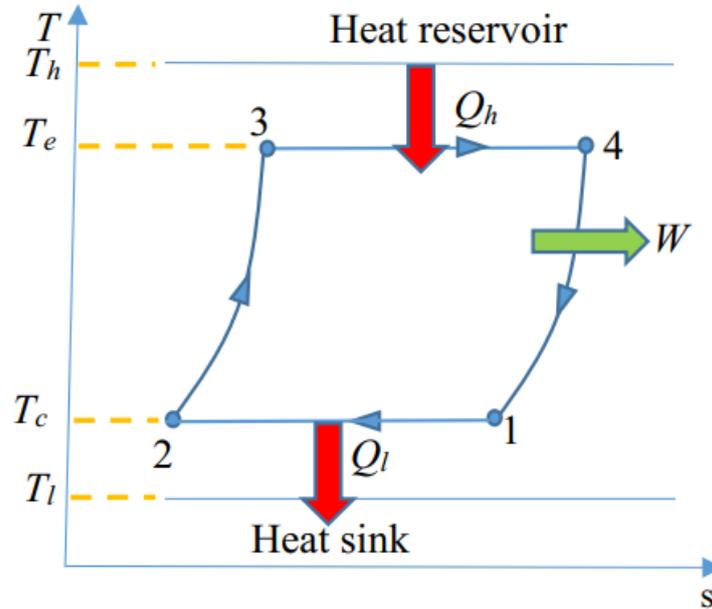


Figura 2.7. Ideal Stirling cycle(T-s diagram)([9])

Per la trattazione delle varie fasi si farà riferimento alle seguenti formule:
Primo principio della termodinamica([7]):

$$dQ = dU + pdV \quad (2.1)$$

Secondo principio della termodinamica([7]):

$$dQ = TdS \quad (2.2)$$

Energia interna([7]):

$$dU = c_v dT \quad (2.3)$$

Equazione di stato dei gas perfetti:

$$pV = nRT \quad (2.4)$$

Dove:

- Q é la quantità di calore;
- U é l'energia interna(dovuta sia al contributo sensibile che chimico);
- p é la pressione;
- V é il volume;

- S è l'entropia;
- c_v è il calore specifico a volume costante;
- T è la temperatura;
- n è il numero di moli;
- R è la costante universale del gas.

Durante la compressione isoterma 1-2 il gas viene compresso dal pistone verso il rigeneratore, con successivo aumento di pressione da p_1 a p_2 . La trasformazione è a temperatura costante, e lo scambio termico avviene con la sorgente fredda. Si verifica una diminuzione di entropia.

$$T_1 = T_2 = T_{min} \quad (2.5)$$

Dato che il processo è a T costante, si avrà il contributo di $dU=0$; di conseguenza il calore ceduto Q_1 coinciderà con il lavoro di compressione W_c

$$Q_1 = W_c = p_1 V_1 \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \quad (2.6)$$

$$Q_1 = W_c = nRT_1 \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \quad (2.7)$$

Durante il riscaldamento a volume costante 2-3 il fluido di lavoro passando attraverso il rigeneratore si riscalda con un successivo aumento di temperatura da T_{min} a T_{max} , e della pressione da p_2 a p_3 . In questo caso si ha il movimento sia del pistone di espansione che di quello di compressione. Il processo è caratterizzato dal lavoro W nullo e da un aumento di entropia

$$V_2 = V_3 \quad (2.8)$$

$$W = 0 \quad (2.9)$$

$$Q_2 = c_v(T_3 - T_2) \quad (2.10)$$

Nella fase del ciclo 3-4 si ha un'espansione a temperatura T_{max} costante dato che la trasformazione è isoterma. Lo scambio termico in questa fase avviene con la sorgente calda. Il pistone di espansione permette al fluido di espandersi e di abbassare la pressione da p_3 a p_4 , mentre quello di compressione rimane fermo. Il calore scambiato con la sorgente calda sarà uguale al lavoro di espansione.

$$T_3 = T_4 = T_{max} \quad (2.11)$$

$$Q_3 = W_e = p_3 V_3 \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) \quad (2.12)$$

$$Q_3 = W_e = nRT_3 \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) \quad (2.13)$$

Nel raffreddamento isocoro 4-1 il fluido entra nuovamente nel rigeneratore e cede calore. Il movimento del fluido é dovuto al moto di entrambi i pistoni. La trasformazione é caratterizzata da una diminuzione di entropia e dal lavoro nullo.

$$W = 0 \quad (2.14)$$

$$V_1 = V_4 \quad (2.15)$$

$$Q_4 = c_v |T_1 - T_4| \quad (2.16)$$

Il calore totale assorbito sar  dovuto a Q_2 e Q_3

$$Q_{ass} = nRT_3 \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) + c_v(T_3 - T_2) \quad (2.17)$$

Il calore totale ceduto sar  dovuto al contributo di Q_1 e Q_4

$$Q_{ced} = Q_1 + Q_4 \quad (2.18)$$

$$Q_{ced} = nRT_1 \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) - c_v(T_1 - T_4) \quad (2.19)$$

Il lavoro compiuto sul ciclo sar 

$$W_{tot} = Q_{ass} - Q_{ced} = nRT_3 \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) - nRT_1 \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \quad (2.20)$$

$$W_{tot} = nR \ln\left(\frac{V_3}{V_4}\right) (T_{max} - T_{min}) \quad (2.21)$$

Il rendimento lo si esprime come rapporto tra lavoro complessivo e calore assorbito

$$\eta = \frac{W_{tot}}{Q_{ass}} = \frac{nRT_{max} \ln\frac{V_{max}}{V_{min}} - nRT_{min} \ln\frac{V_{max}}{V_{min}}}{nRT_{max} \ln\frac{V_{max}}{V_{min}}} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max}} \quad (2.22)$$

$$\eta = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} \quad (2.23)$$

Si pu  notare che se la rigenerazione é ideale e il ciclo Stirling lavora a parit  di temperature del ciclo di Carnot il rendimento é uguale a quest'ultimo.

Durante le trasformazioni a volume costante, nella rigenerazione ideale, il calore assorbito dal rigeneratore nel raffreddamento del gas, é uguale a quello ceduto nel riscaldamento

$$Q_2 = Q_4 = c_v(T_{max} - T_{min}) \quad (2.24)$$

2.9 Ciclo Stirling reale

Nella realtà non si rispecchia alcuna applicazione di ciclo Stirling ideale, per una serie di perdite dovute a varie cause che determinano una riduzione di area del ciclo Stirling, del lavoro e dell'efficienza rispetto a quelli del ciclo ideale([9]).

Attualmente le macchine Stirling hanno un rendimento minore rispetto al ciclo di Carnot, ma resta comunque un motore molto efficiente dal punto di vista termico(circa il 40-50 %) ed elettrico, rispetto ai normali motori a combustione interna. In figura 2.8 si mostra una rappresentazione del ciclo reale

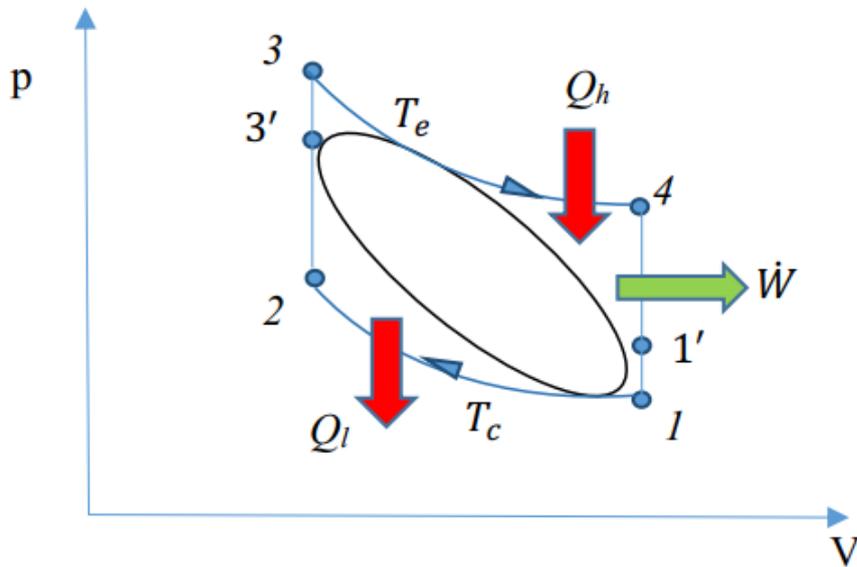


Figura 2.8. Real Stirling cycle(PV diagram)([9])

In questo caso si parla di rendimento reale η_r inferiore rispetto a quello ideale η_i .

$$\eta_r < \eta_i \quad (2.25)$$

Le perdite di maggior riscontro sono:

- perdite per rigenerazione imperfetta([9]);
- perdite per attrito meccanico([9]);
- perdite dovute alla velocità finita del pistone([9]);
- perdite dovute agli spazi morti([9]);
- perdite per conduzione di calore([9]);

- perdite per shuttle([9]);
- perdite dovute agli scambiatori di calore([9]);
- perdite per isteresi([9]);

2.9.1 Perdite dovute alla velocità finita del pistone

Durante l'espansione il gas esercita una pressione minore sul pistone rispetto a quella media, invece durante la compressione la pressione sul pistone é maggiore di quella media presente nel cilindro, di conseguenza durante la compressione, il pistone ha bisogno di produrre più lavoro meccanico per comprimere il gas([9]). La perdita di pressione, che ne riduce il lavoro in uscita é così calcolata([9]):

$$\Delta_{p, speed} = \frac{1}{2} \left(p_c \frac{a u_{p, c}}{c_c} + p_e \frac{a u_{p, e}}{c_e} \right) \quad (2.26)$$

Dove:

- p é la pressione;
- a una costante;
- c velocità media molecolare;
- u_p velocità del pistone

2.9.2 Perdite per isteresi

Le perdite per isteresi generano una riduzione del ciclo termodinamico e del lavoro in un motore Stirling a causa della presenza di viscosità nel fluido e per le differenze di temperatura([9]). La variazione del volume nel motore Stirling é espressa come([9]):

$$V_{tot} = V_o * V_m \sin(\omega t) \quad (2.27)$$

La velocità media delle perdite per isteresi([9]):

$$\overline{Whys} = \sqrt{\frac{\omega \gamma^3 (\gamma - 1) T_w K_g p_{mean}}{32}} A_w \left(\frac{V_m}{V_o} \right)^2 \quad (2.28)$$

Nell'equazione

- K_g é la conduttività del gas;
- V_m é il volume spazzato dal pistone;

- A_w é la sezione trasversale del pistone;
- γ é il rapporto specifico delle capacità di calore;
- p_{mean} é la pressione media;
- T_w é la temperatura nella camera.

2.9.3 Perdite per conduzione di calore

Nel ciclo reale esistono delle perdite di calore attraverso il displacer, soprattutto nel motore di tipo gamma e beta, poichè questo componente meccanico separa l'ambiente caldo di espansione dall'ambiente freddo di compressione ed é dunque inevitabile avere una parte di calore che dall'ambiente caldo passa all'ambiente freddo attraverso il displacer seguendo la legge di Fourier([9]):

$$\dot{Q}_{cond} = K \frac{A}{L} \Delta T \quad (2.29)$$

Dove

- K é la conduttività del displacer;
- A é la sezione trasversale del displacer;
- ΔT é la differenza di temperatura tra i due ambienti.

Esistono anche altre perdite di calore che migrano dal fluido caldo verso l'esterno attraverso le pareti del cilindro metalliche, questo perchè i materiali metallici sono buoni conduttori([9]).

2.9.4 Perdite dovute allo shuttle del displacer

Il movimento sinusoidale del displacer causa delle perdite, chiamate perdite shuttle. Sarebbe opportuno avere un movimento discontinuo per ottimizzare il lavoro e l'efficienza del ciclo([9]):

$$\dot{Q}_{shuttle} = 0.4 \frac{Z_d^2 K_g D_d}{g_d L_d} (T_e - T_c) \quad (2.30)$$

Dove

- Z_d é la forza sul displacer;
- D_d é il diametro del displacer;
- L_d é la lunghezza del displacer;
- K_g é la conduttività termica del gas;
- g_d é lo spazio esistente tra cilindro e displacer;

2.9.5 Perdite per attrito meccanico

Nei motori Stirling, in particolare quelli che utilizzano meccanismi di biella-manovella, esiste un attrito meccanico nei cuscinetti e in altri collegamenti del giunto([9]). La perdita media di pressione dovuta all'attrito meccanico può essere espressa come([9])

$$\Delta_{p,f} = \frac{(0.4 + 0.0045Z_p F)10^5}{3(1 - \frac{1}{3\tau})} (1 - \frac{1}{\tau}) \quad (2.31)$$

Dove

- τ é il rapporto di compressione;
- Z_p é la forza sul pistone;
- F é la frequenza del motore.

2.9.6 Perdite dovute agli spazi morti

Il fluido di lavoro all'interno del cilindro del motore viene a contatto con degli "spazi morti" non occupati da componenti meccanici in movimento, come ad esempio i pistoni in questo caso specifico([8]). Quando il fluido di lavoro finisce nei volumi morti si generano irreversibilità che tendono a diminuire l'area del ciclo e in particolare la potenza specifica. Nella realtà non possono essere eliminati in alcun modo ma si potrebbero adottare delle soluzioni costruttive per minimizzarli.

2.9.7 Perdite dovute agli scambiatori

Il fluido di lavoro dovrebbe scambiare calore con delle sorgenti nella fase di compressione ed espansione a temperatura costante, come viene descritto dal ciclo ideale; ma nella realtà é difficile garantire uno scambio termico costante, infatti sarebbe opportuno sostituire con delle adiabatiche le isoterme. Questo cambiamento comporta una riduzione del ciclo di lavoro e del rendimento, che si allontana di molto da quello del ciclo di Carnot.

2.9.8 Perdite nel rigeneratore

Queste perdite sono dovute ad una rigenerazione imperfetta, infatti si parla di efficienza di rigenerazione inferiore all'unità. La rigenerazione sarebbe perfetta solo se il tempo e la superficie di scambio fossero infiniti. Nella realtà é impossibile realizzare questi due requisiti. Si può definire il calore perso attraverso il rigeneratore come([9]):

$$Q_r = nC_v(T_1 - T_2)(1 - \eta_r) \quad (2.32)$$

$$\eta_r = \frac{NTU}{NTU + 2} \quad (2.33)$$

T_1 temperatura del fluido di lavoro nello spazio di espansione, T_2 temperatura nello spazio di compressione, η_r efficienza del rigeneratore, C_v capacità termica del fluido, NTU numero di unità di scambio termico.

Durante il processo di rigenerazione, la temperatura del fluido T segue una legge di variazione lineare nel tempo([10]):

$$\frac{dT}{dt} = \pm K_1 \quad (2.34)$$

K_1 dipende dal materiale di cui è costituito il rigeneratore, considerandolo positivo se il rigeneratore assorbe calore, negativo se lo rilascia([10]).

Il lavoro reale, dopo aver calcolato tutti i contributi di perdita potrà essere espresso come:

$$|W_{reale}| = |W_{ideale}| - W_{perdite} \quad (2.35)$$

Il calore di compressione([9]):

$$Q_{c,real} = Q_c + Q_r + Q_{shuttle} + Q_{cond} + Q_{perdite} \quad (2.36)$$

Il calore di espansione([9]):

$$Q_{e,real} = Q_e + Q_r + Q_{shuttle} + Q_{cond} + Q_{perdite} \quad (2.37)$$

Capitolo 3

Generalità sulla propulsione navale tradizionale

Le navi possono essere classificate in:

1. navi a remi([11]);
2. navi a vela([11]);
3. navi a motore([11]).

Le navi a motore possono avere il motore all'interno o all'esterno dello scafo e quindi ulteriormente denominate come entro bordo o fuoribordo([11]).

Il primo propulsore in campo navale fu la ruota a pale, poi con lo sviluppo della tecnologia si utilizzò l'elica, attualmente, invece, si adottano il propulsore voith snyder, l'idrogetto e l'azipod([11]).

3.1 La ruota a pale

La ruota a pale è stato il primo propulsore ad essere utilizzato in campo navale, costituito da tante pale posizionate su un mozzo([11]). Il moto rotatorio generato dal motore con cui la ruota è collegata attraverso un sistema specifico, produce un'azione sull'acqua che ne permette di vincere la resistenza([11]). A.Vega osserva che *"la ruota è generalmente posta a poppa, con l'asse del cilindro ortogonale all'asse longitudinale della nave, ma può essere anche installata lateralmente, nel qual caso si hanno due ruote, una per lato"* ([11]).

3.2 L'elica

A.Vega osserva che:” *l'elica navale deriva dall'elica geometrica che è una linea tracciata su un cilindro che interseca le sue generatrici secondo un angolo costante*” ([11]). Il moto è elicoidale, ovvero traslazione più rotazione, dovuto alle pale calettate su un mozzo ([11]). Di seguito si elencano alcuni elementi caratteristici:

- diametro della pala ([11]);
- numero delle pale variabile da 2 a 8-10 ([11]);
- senso di rotazione destrorso o sinistrorso ([11]);
- angolo di calettamento formato tra l'asse dell'elica e la corda della sezione della pala ([11]);
- passo dell'elica in funzione dell'angolo di calettamento e del raggio dell'elica ([11]);
- il regresso rappresenta l'energia impiegata per vincere la resistenza all'avanzamento della nave, definito come differenza tra passo e avanzo ([11]):

$$r = p - a \quad (3.1)$$

Il passo p rappresenta lo spazio definito dall'elica in un giro completo quando è disaccoppiata dalla nave; l'avanzo a , invece, è lo spazio spazzato dall'elica quando questa è collegata alla carena ([11]).

Si può definire una velocità teorica dell'elica ([11]):

$$V_t = \frac{p * n}{60} \quad (3.2)$$

Dove n è il numero di giri al minuto dell'elica. La velocità della nave V_n tiene conto dell'avanzo ([11]):

$$V_n = \frac{a * n}{60} \quad (3.3)$$

Per spiegare il funzionamento dell'elica si fa riferimento alla teoria alare e alla teoria impulsiva. La teoria impulsiva ha dei limiti in quanto non spiega l'origine della spinta ma solamente determina la spinta che viene fornita dall'elica alla nave ([11]). In figura 3.1 si nota che il flusso dell'acqua nell'attraversare l'elica subisce delle variazioni di pressione e di velocità; la velocità del flusso risulta maggiore dopo l'elica, invece la pressione diminuisce prima del disco, in corrispondenza dello stesso si ha un picco, per poi diminuire nuovamente dopo il disco fino a raggiungere lo stesso livello di pressione iniziale a distanza dal disco dell'elica ([11]).

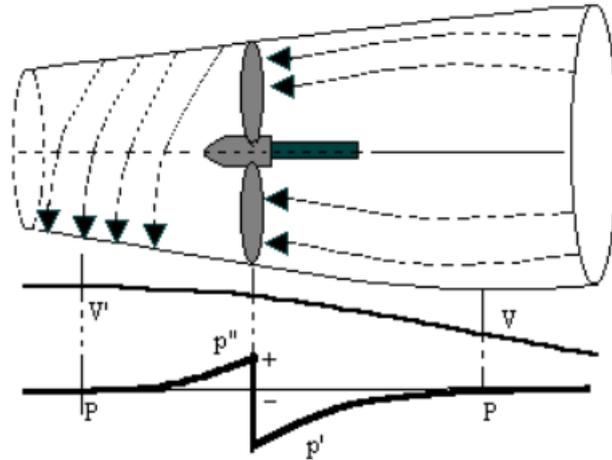


Figura 3.1. Teoria impulsiva per il funzionamento dell'elica([11])

Per determinare la spinta T della teoria impulsiva si parte dalla quantità di moto([11]):

$$q = m * V \quad (3.4)$$

La variazione della quantità di moto sarà([11]):

$$\Delta q = m * \Delta(V - V') \quad (3.5)$$

Con V velocità posseduta dall'acqua prima dell'elica, V' velocità dopo l'elica.

Si definisce l'impulso come prodotto della forza per un intervallo di tempo dt ([11]):

$$I = T * dt \quad (3.6)$$

L'impulso può essere definito come variazione della quantità di moto([11]):

$$I = \Delta q = T * dt = m * \Delta(V - V') \quad (3.7)$$

Ponendo $dt=1$ ([11]):

$$T = m * \Delta(V - V') \quad (3.8)$$

Questa spinta può essere fornita da una grande massa d'acqua e una piccola variazione di velocità come nel caso di navi lente; oppure da una piccola massa d'acqua e una grande variazione di velocità come nel caso di navi veloci([11]).

La teoria alare si basa sul concetto della portanza, che si può spiegare attraverso i concetti di pressione e depressione([11]). Se si immergesse un'ala in un fluido, si osserverebbe una depressione sul dorso e una pressione sul lato inferiore che spinge la lastra verso l'alto([11]). Se si prende una pala d'elica e si fanno tante sezioni si ottengono tanti profili alari. In figura 3.2 si nota che la portanza si divide in due componenti, ossia ϕ e r ([11]):

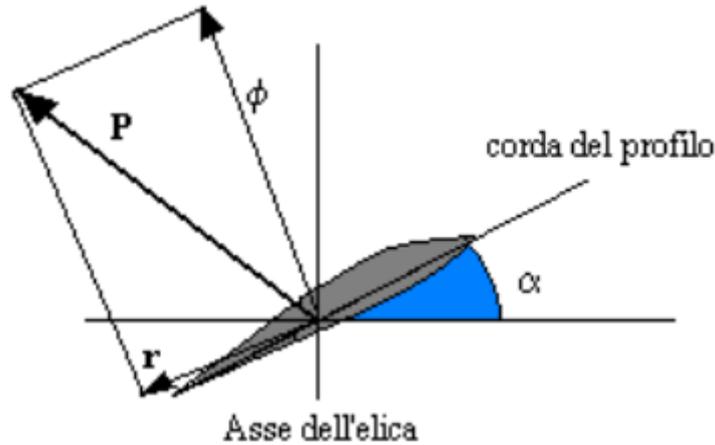


Figura 3.2. Teoria alare sulla portanza([11])

$$\phi = P * \cos(\alpha) \quad (3.9)$$

$$r = P * \sin(\alpha) \quad (3.10)$$

Si deduce che la componente r si oppone al moto, invece ϕ contribuisce alla spinta verso l'alto della sezione della pala; di conseguenza ogni pala produce una portanza che dovrà essere moltiplicata per il numero delle pale e poi per le eliche, per calcolare la spinta complessiva che agisce sulla nave(T)([11]). L'acqua a sua volta, per il principio di azione e reazione, agisce sulla pala attraverso una coppia resistente C_r , che varia al variare del numero di giri, infatti, se l'elica ruota più veloce darà una spinta maggiore e l'acqua a sua volta risponderà con una coppia resistente più grande([12]). Per ottenere una velocità di rotazione costante la coppia resistente C_r deve essere uguagliata da una coppia motrice(C_m) fornita dall'apparato motore([12]). Se la coppia resistente è una parabola, la potenza resistente è una cubica. In figura 3.3 è rappresentato l'andamento della spinta T e della coppia resistente C_r ([12]):

$$C_r = f(n^2) \quad (3.11)$$

$$P_r = f(n^3) \quad (3.12)$$

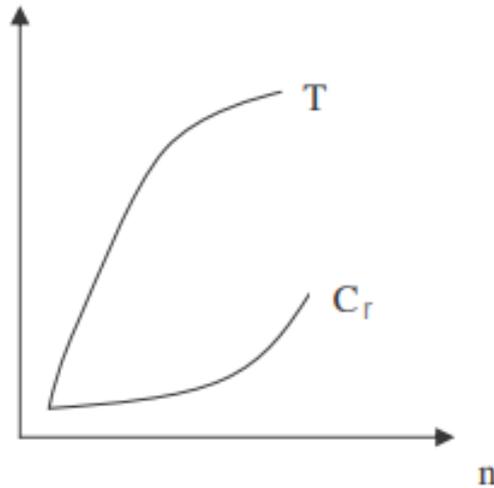


Figura 3.3. Andamento della spinta T e della coppia resistente C_r in funzione del numero di giri n per un'elica a passo fisso([12])

La velocità massima si trova dall'intersezione della coppia motrice con quella resistente, inoltre non é costante, e potrebbe variare se si modificano alcuni parametri([12]):

- un mare ondosso e raffiche di vento generano maggior resistenza sulla nave([12]);
- una carena sporca con presenza di vegetazione di vario genere varia la coppia di resistenza perchè in primis varia la spinta sul mare([12]) ;
- variazioni del carico sia trasversale che longitudinale determinano nuove curve di coppia resistente([12]).

3.3 Il propulsore Voith Snyder

Questo propulsore é costituito da un disco orizzontale di almeno 5 m con delle pale rivolte verso il basso, attivato per mezzo di un motore, collegato ad esso tramite asse e giunto cardanico([11]). In generale si montano due voith una a prua e uno a poppa, oppure in alternativa sui due lati della nave, tale da consentire l'esecuzione di diverse manovre, anche molto complesse([11]).

A.Vega osserva che *"i limiti del propulsore voith sono rappresentati dalla scarsa immersione e dalla chiglia piatta, che espone questo tipo di nave ai movimenti di rollio e beccheggio, la vulnerabilità delle pale che sporgendo dal profilo della carena possono toccare il fondo danneggiandosi"* ([11]).

3.4 L'idrogetto

L'acqua aspirata entra dalla presa a mare e, attraverso il tunnel, giunge alla girante della pompa dove acquista velocità, quindi viene pompata verso l'ugello da dove fuoriesce fornendo la spinta all'imbarcazione([11]).La pompa è posizionata dopo il riduttore,il quale collega a livello meccanico i motori diesel o una turbina alla pompa stessa([11]). Viene impiegato nelle High Speed Vessel(HSV), poichè riduce rumore e vibrazione e impartisce maggior comfort ai passeggeri([11]).

3.5 L'azipod

L'azipod é costituito da una serie di eliche a passo fisso collegate ad un blocco semicilindrico,a loro volta movimentate da un motore elettrico opportunamente raffreddato da un sistema di raffreddamento posizionati nella parte superiore del siluro, posto a sua volta in cima al blocco semicilindrico([11]).Il motore elettrico é alimentato da un motore diesel o da un motore diesel più turbina a gas nel caso si voglia ottenere un'elevata velocità([11]). Lo schema si può osservare in figura 3.4

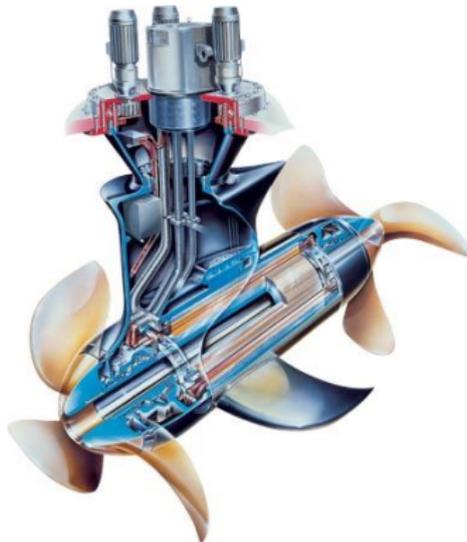


Figura 3.4. Il propulsore Azipodale ([11])

Il propulsore azipod apporta numerosi vantaggi tra cui la riduzione di vibrazioni e di spazio, minore manutenzione e consumi, rimozione del timone, migliore manovrabilità e elevate potenze che possono essere prodotte; può essere affiancato ad un apparato motore, ovvero una parte dell'impianto di propulsione in grado di trasformare l'energia chimica, fornita da un combustibile, in energia termica, che

a sua volta sarà trasformata in energia meccanica attraverso una serie di elementi meccanici posti lungo un asse([11]). Il propulsore, invece, trasformerà l'energia meccanica in energia cinetica. Tanto maggiore dovrà essere la velocità della nave, tanto più combustibile dovrà essere fornito all'apparato motore. Gli apparati motori si suddividono in:

- convenzionali, in cui avviene la combustione([12]);
- non convenzionali, in quanto non avviene la combustione([12]).

Gli apparati motori convenzionali a loro volta possono suddividersi in:

- esotermici, con fluido che non partecipa alla combustione ma che riceve calore da fonti esterne(tipico esempio delle turbine a vapore)([12]);
- endotermici, con fluido che partecipa alla combustione(motore ad accensione spontanea o comandata)([12]) ;
- misti, ovvero una soluzione combinata tra endotermici e esotermici([12]).

Gli impianti endotermici sono più vantaggiosi rispetto agli esotermici poichè non necessitano di superfici di scambio termico elevate, hanno rendimenti più elevati, pesi e dimensioni ridotte e consumi minori, a parità di potenza e di affidabilità([12]). A loro volta i motori endotermici si classificano in:

- endotermici diesel(sono presenti uno o più motori diesel che alimentano il propulsore)([12]);
- endotermici a gas(si hanno delle turbine a gas collegate ad un unico asse)([12]);
- endotermici combinati(si ha una combinazione di diesel più turbine a gas)([12]);
- endotermici-elettrici(ovvero uno o più motori endotermici che alimentano i motori elettrici adibiti alla movimentazione dell'elica)([12]).

3.6 Motore diesel

Il motore diesel lo si ritrova in svariate applicazioni che vanno dal campo automobilistico alla propulsione marina. Viene denominato anche motore ad accensione spontanea, proprio perchè la combustione avviene spontaneamente e non grazie ad una candela che fa scoccare la scintilla come avviene nei motori a benzina. In sostituzione alla candela è presente un iniettore che ha la funzione di iniettare in camera di combustione il combustibile in un momento ben preciso. La combustione inizia durante la risalita del pistone verso il punto morte superiore(PMS) e nel momento

in cui l'aria ha raggiunto una temperatura tale da far bruciare il combustibile. In figura 3.5 si distinguono le varie fasi che contraddistinguono un ciclo diesel

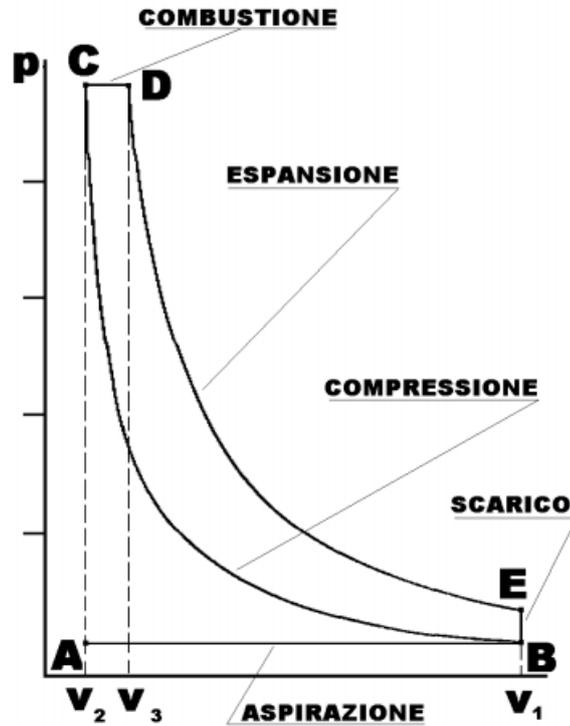


Figura 3.5. Ciclo termodinamico diesel([12])

Il ciclo può essere definito da 5 fasi:

- una fase di aspirazione (A-B);
- una fase di compressione adiabatica (B-C);
- una combustione a pressione costante(C-D);
- un'espansione adiabatica (D-E);
- uno scarico a volume costante (E-B);
- scarico finale (B-A);

Il rapporto di compressione volumetrico ρ è più elevato rispetto al motore a benzina che ha valori non superiori a 10/11, invece il diesel raggiunge anche valori intorno a $\rho=16$ ([12]). Un ρ elevato implica elevate pressioni e temperature, che possono essere fronteggiate da una struttura pesante e da materiali altamente resistenti; inoltre

implica anche un consumo minore di combustibile rispetto ad un motore a benzina avente lo stesso ρ ([12]). Li si trova in una configurazione multicilindrica con 4 valvole per ogni cilindro, di cui 2 adibite all'aspirazione e altre 2 per lo scarico.

La gestione dell'iniezione é regolata dall'autoregolatore che manda la quantità di carburante al motore attraverso l'iniettore, sulla base della richiesta di potenza. L'iniezione nei diesel avviene direttamente in camera, mentre nei benzina fuori dalla camera di combustione. I diesel possono essere classificati in:

-superveloci con velocità comprese in un range tra 3000 e 4000 rpm ([12]); ;

-veloci con velocità comprese in un range tra 800 e 1800 rpm ([12]);

-semiveloci con velocità comprese in un range tra 400 e 800 rpm ([12]);

-lenti con velocità comprese in un range tra 90 e 200 rpm ([12]);

I diesel assumono dimensioni sempre più grandi con il crescere del rapporto di compressione, in quanto é fondamentale avere corse lunghe del pistone per ottenere determinate temperature indispensabili alla generazione della combustione. Questo é il caso dei diesel lenti a 2 tempi caratterizzati da basse velocità dovute al maggior tempo impiegato dal pistone nel compiere il suo movimento all'interno del cilindro. Affinchè la combustione possa avvenire é necessaria la presenza di aria e di una determinata quantità di combustibile. La quantità di combustibile che brucia dipende dalla quantità di aria immessa. Lo scopo della sovralimentazione é quello di iniettare una quantità superiore di aria (a causa di una pressione di iniezione maggiore) per poter far bruciare maggior combustibile, e di conseguenza generare una potenza e coppie più grandi. Si ha la presenza di un compressore che aspira l'aria dall'esterno verso il collettore di aspirazione. Per comprimere aria é necessaria una notevole quantità di energia che viene sottratta al motore nel caso questa fosse prelevata dall'asse motore. Si possono trovare altre soluzioni, come l'utilizzo di un motore elettrico, che semplifica il lavoro del compressore ma peggiora il rendimento; e il recupero di energia attraverso i gas di scarico. Questa ultima soluzione riduce gli ingombri e innalza il rendimento, attraverso l'uso di un turbocompressore (turbina che raccoglie i gas di scarico e compressore che ne comprime l'aria), tale da rendere la temperatura in ingresso maggiore e la densità minore, con conseguente riduzione dell'efficienza ([12]). A tal proposito si ricorre all'intercooler che ne abbassa la temperatura.

Capitolo 4

Propulsione navale elettrica

La propulsione elettrica in una nave garantisce il moto roto-traslatorio delle eliche attraverso un motore elettrico. Si parla di propulsione elettrica navale dal XIX secolo, poichè i russi costruirono un piccolo battello applicando un motore a corrente continua([26]).La difficoltà nella realizzazione dei rotismi rappresentava un ottimo presupposto per la propulsione elettrica. La propulsione elettrica dopo le guerre mondiali é stata abbandonata per diverse problematiche per poi ritornare in campo grazie alle nuove tecnologie messe a disposizione dall'elettronica, che ha consentito di alimentare il motore ad una frequenza variabile.

Si può generare energia elettrica attraverso delle batterie elettrochimiche in grado di trasformare energia chimica in energia elettrica con elevato rendimento e silenziosità, oppure attraverso un motore diesel che alimenta un generatore elettrico(si parla di propulsione ibrida-elettrica), e anche attraverso una turbina a gas di un gruppo elettrogeno(propulsione turbo-elettrica)([25]).I vari motivi che hanno portato allo sviluppo della propulsione elettrica sono molteplici, tra questi si può considerare il miglioramento del layout della nave a causa della mancanza di vincoli sulla posizione del motore termico in asse con l'elica, di conseguenza quest'ultimo sarà alloggiato laddove vi é presenza di spazi consoni; ottima manovrabilità e efficienza in presenza di pale fisse, poichè nella propulsione tradizionale le pale fisse generano problemi soprattutto a basse velocità([25]).Oggiogiorno si preferisce viaggiare a velocità fissa, oppure impiegare pale con passo variabile, ma queste generano bassa efficienza e causano problematiche a livello progettuale ed economico. Quando la nave viaggia a bassi carichi e a velocità non elevate, é agevole non far funzionare contemporaneamente tutti i gruppi elettrogeni, tale da preservare il rendimento degli altri che servirà durante un lavoro di massima potenza([25]). I sistemi di propulsione elettrica si possono classificare sulla base del tipo di azionamento([25]):

- sistemi con motori a corrente continua([25]);
- sistemi con cicloconvertitore e motore sincrono([25]);

- sistemi con sincroconvertitore e motore sincrono([25]);
- sistemi con inverter a commutazione forzata e motore asincrono([25]);

Per questa applicazione, in particolare, si userà la trazione elettrica, poichè la movimentazione dell'utilizzatore(in questo caso dell'elica) é dovuta al solo motore elettrico, mentre il motore Stirling deve ricaricare le batterie. Il motore elettrico viene controllato da un inverter DC/AC che ne varia la frequenza e di conseguenza la velocità di rotazione, in quanto l'elica non può ruotare ad una velocità costante ma variabile a seconda delle varie applicazioni a cui é predisposta la nave, e alle diverse condizioni di carico e meteo-marine. Uno schema può essere osservato in figura 4.1.

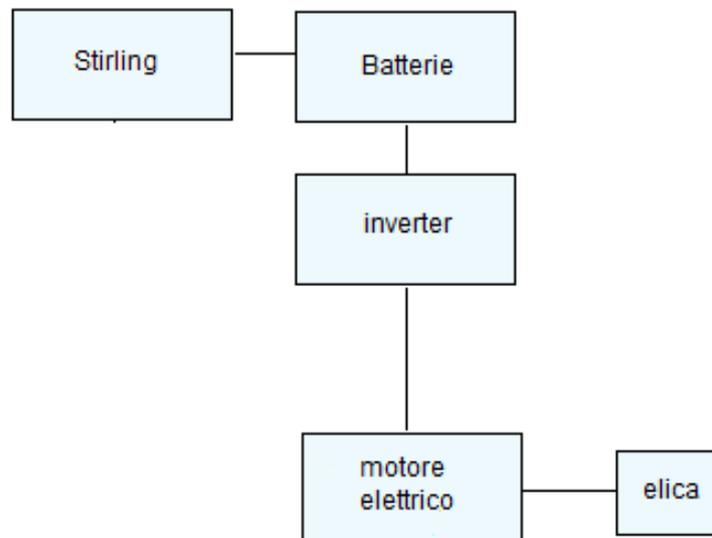


Figura 4.1. Schema generale del sistema di funzionamento della nave

4.1 Motore a corrente continua

Il motore a c.c é un motore elettrico molto antico, ampiamente impiegato in passato soprattutto in ambito ferroviario, ma attualmente lo si trova in poche applicazioni di nicchia. Ha una duplice funzione, in quanto lo si può utilizzare anche come generatore. Il motore é caratterizzato dalla semplicità di funzionamento, regolazione piuttosto semplice della velocità, in grado di fornire elevate coppie a bassa velocità. Gli aspetti negativi sono legati alla manutenzione per la presenza delle spazzole, ai

costi elevati e alla potenza medio-bassa.

La struttura é delineata da una parte statorica e una rotorica. Sullo statore sono collocate delle spire in cui vi scorre corrente continua, oppure dei magneti permanenti, che non garantiscono una corrente di eccitazione. Il collettore a lamelle in corrispondenza dell'asse del rotore permette alla corrente di fluire nelle spire, in modo che quest'ultima generi un campo che permette la rotazione rotorica. In questo motore si deve evitare un allineamento orizzontale delle armature e a tal proposito il collettore si attiva per mutare il verso di rotazione con la successiva modifica del verso della corrente e del campo magnetico generato. In figura 4.2 si può vedere uno schema

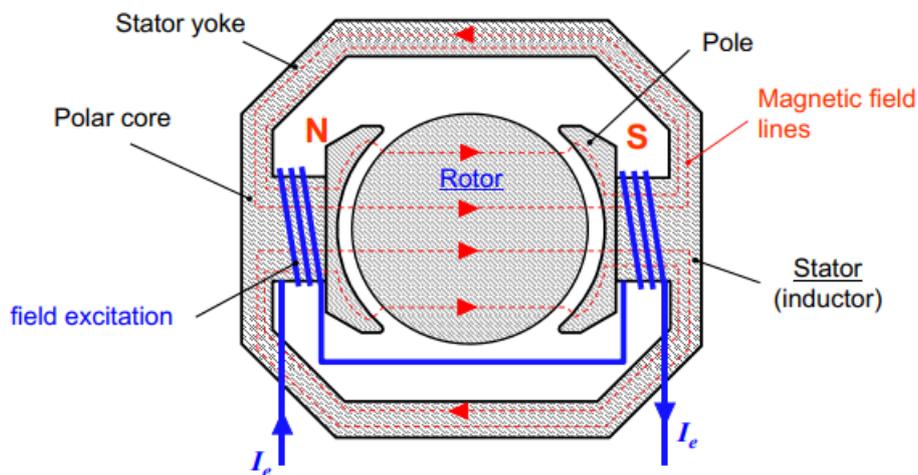


Figura 4.2. Schema del motore a corrente continua ([31])

Le equazioni che caratterizzano il funzionamento di questo motore sono le seguenti([25]):

$$C = K * \Phi * I \quad (4.1)$$

$$V = E + R * I = K * \Phi * \Omega + R * I \quad (4.2)$$

- C rappresenta la coppia elettromotrice;
- V la tensione di armatura;
- I la corrente dello statore;
- R la resistenza dello statore;
- E la forza elettromotrice;
- Φ il flusso di eccitazione prodotto dagli avvolgimenti.

Dall'equazione (4.2) si nota che all'aumentare della velocità angolare aumenta anche la tensione di armatura V , fino a raggiungere un valore V_{max} , in corrispondenza del quale si ha una velocità angolare Ω_{base} ; ma se si richiede di aumentare ulteriormente la velocità bisogna ridurre il flusso di eccitazione della macchina, in quanto non si può superare la V_{max} di armatura ([25]). In fig 4.3 si nota che fino alla velocità Ω_{base} , la V di armatura aumenta proporzionalmente con la Ω , invece si mantiene costante il flusso di eccitazione e di conseguenza anche la coppia massima; dopo la Ω_{base} si riduce invece il flusso di eccitazione, e si mantiene costante sia la V_{max} di armatura che la potenza massima ([25]).

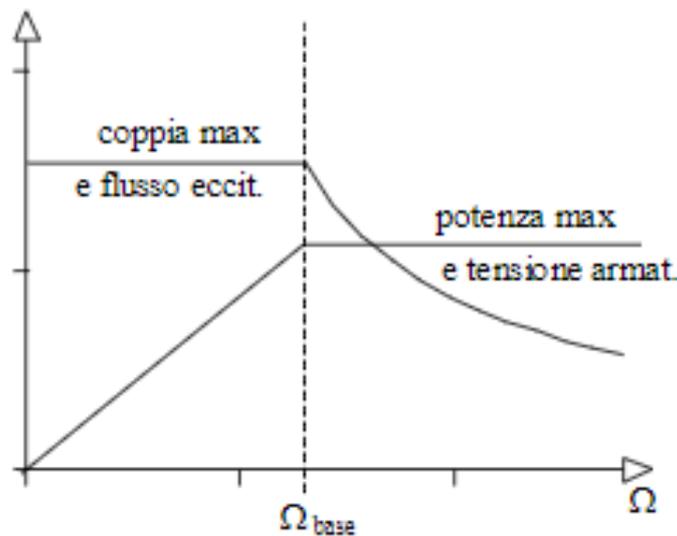


Figura 4.3. Andamenti caratteristici di alcune grandezze al variare della velocità angolare ([25])

4.2 Motore asincrono

Il motore asincrono ha oggi sostituito il motore a corrente continua e lo si trova in molte applicazioni che spaziano dal campo domestico a quello industriale e lo si utilizza soprattutto nella propulsione elettrica marina; lo si alimenta in corrente alternata, ed è caratterizzato da asincronia tra velocità del rotore e quella del campo magnetico rotante generato dallo statore. Il campo magnetico rotante induce nel rotore una forza elettromotrice e delle correnti. L'interazione tra campo statorico e correnti indotte nel rotore genera una coppia motrice, che cerca di creare sincronismo tra statore e rotore. Il rotore può essere a gabbia di scoiattolo o ad anelli avvolto, su cui sono collocati dei lamierini adibiti agli avvolgimenti rotorici; ma il rotore avvolto si usa per applicazioni specifiche, invece quello a gabbia di scoiattolo per tutte le altre applicazioni. Gli avvolgimenti del rotore saranno attraversati da

un flusso variabile, il quale produce per la legge di Faraday una forza elettromotrice indotta (f.e.m), che si oppone alla variazione di flusso che l'ha generata attraverso un campo magnetico rotorico, opposto a quello statorico. Lo statore é formato da tanti lamierini uniti, e posti all'interno di una carcassa esterna solitamente alettata per garantire lo scambio termico esterno convettivo. Gli avvolgimenti statorici sono delle bobine in rame ricoperte da isolanti per proteggerle dalla corrosione dei vari agenti atmosferici. Sono trifase e possono essere collegati a triangolo o a stella ad una morsettiera esterna. Il traferro é di fondamentale importanza affinché il rotore non urti contro lo statore. La velocità di sincronismo può essere espressa come([31]):

$$n_s = \frac{f * 120}{p} \quad (4.3)$$

Con f frequenza e p numero di poli presenti.

Il rotore ha una velocità n_r inferiore a quella di sincronismo. Lo scorrimento tra le due velocità é così definito ([31]):

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (4.4)$$

Quando lo scorrimento $s=1$ il rotore é fermo ($n_r=0$), invece con $s=0$ il rotore e lo statore hanno la stessa velocità ($n_s=n_r$).

Si possono distinguere tre casi di funzionamento:

- rotore fermo con circuito di rotore aperto([31]);
- rotore in movimento con circuito di rotore aperto([31]);
- rotore in movimento con circuito di rotore in cortocircuito([31]).

4.2.1 Rotore fermo con circuito di rotore aperto

Questo tipo di funzionamento prevede alcune ipotesi:

-le tensioni di fase statoriche sono sinusoidali con pulsazione $\omega=2*\pi*f$ ([31]);

-le correnti circolanti negli avvolgimenti statorici sono sinusoidali e caratterizzate da pulsione ω ([31]);

-nel rotore non circolano correnti essendo il circuito aperto([31]).

Le forze elettromotrici nello statore e nel rotore sono sfasate tra di loro di 120° a causa dello sfasamento tra le fasi degli avvolgimenti. La forza elettromotrice di statore si definisce come derivata del flusso concatenato con gli avvolgimenti statorici(λ_s)([31]):

$$e_s(t) = \overline{E_s} = \frac{d(\lambda_s)}{dt} = j * \omega * \overline{\lambda_s} = j * 4.44 * N_s * f * \Phi_u \quad (4.5)$$

Con Φ_u flusso utile e Ns il numero di spire statoriche equivalenti per ottenere la f.e.m voluta. La forza elettromotrice di rotore si definisce come derivata del flusso concatenato con gli avvolgimenti rotorici(λ_r)([31]):

$$e_r(t) = \overline{E_r} = -\frac{d(\lambda_s)}{dt} = -j * \omega * \overline{\lambda_r} = j * 4.44 * Nr * f * \Phi_u \quad (4.6)$$

Con Φ_u flusso utile e Nr il numero di spire rotoriche equivalenti per ottenere la f.e.m voluta. Il motore può essere visto come un trasformatore trifase a vuoto che ha il seguente rapporto di trasformazione ([31]):

$$\frac{\overline{E_s}}{\overline{E_r}} = \frac{Ns}{Nr} \quad (4.7)$$

4.2.2 Rotore in movimento con circuito di rotore aperto

In questo caso si possono fare le seguenti considerazioni:

-il rotore si muove con velocità ω_r ([31]);

-la f.e.m dello statore é costante, mentre quella di rotore varia a causa del moto relativo tra campo statorico e rotorico ω_r . La f.e.m del rotore sarà così definita ([31]):

$$\overline{E_r} = -j * (\omega - p * \omega_r) * \overline{\lambda_r} \quad (4.8)$$

$$\omega - p * \omega_r = s * \omega \quad (4.9)$$

$$\overline{E_r} = -j * (s * \omega) * \overline{\lambda_r} = j * 4.44 * Nr * (s * f) * \Phi_u \quad (4.10)$$

Dall'ultima equazione si nota che se $s=0$ (ovvero assenza di asincronismo tra la velocità del rotore e quella dello statore) la f.e.m del rotore sarebbe nulla.

4.2.3 Rotore in movimento con circuito di rotore in cortocircuito

In questo altro caso di funzionamento valgono le seguenti affermazioni:

-il rotore assume una velocità ω_r rispetto allo statore([31]);

-le correnti che circolano nel rotore indotte dalla f.e.m producono un campo magnetico che assume una velocità $(s\omega)/p$ rispetto al rotore([31]).

Il campo magnetico prodotto dal rotore avrà una velocità $\omega_r + (s\omega)/p$ rispetto allo statore, e sarà sincrono con quello statorico, poichè come si dimostra di seguito si muove con velocità ω_s ([31]).

$$\omega_r + (s * \omega)/p = \frac{p * \omega_r + (\omega - p * \omega_r)}{p} = \frac{\omega}{p} = \omega_s \quad (4.11)$$

La coppia generata sarà una coppia continua, ma è presente solo se il rotore si muove con velocità diversa da quello dello statore ($\omega_r \neq \omega_s$), invece quando c'è sincronismo ($\omega_r = \omega_s$) la f.e.m indotta dal campo statorico è nulla, e di conseguenza non ci saranno né correnti indotte nel rotore e nessuna coppia elettromagnetica ([31]). Il motore asincrono può essere schematizzato attraverso un circuito equivalente monofase, come rappresentato in figura (4.4)

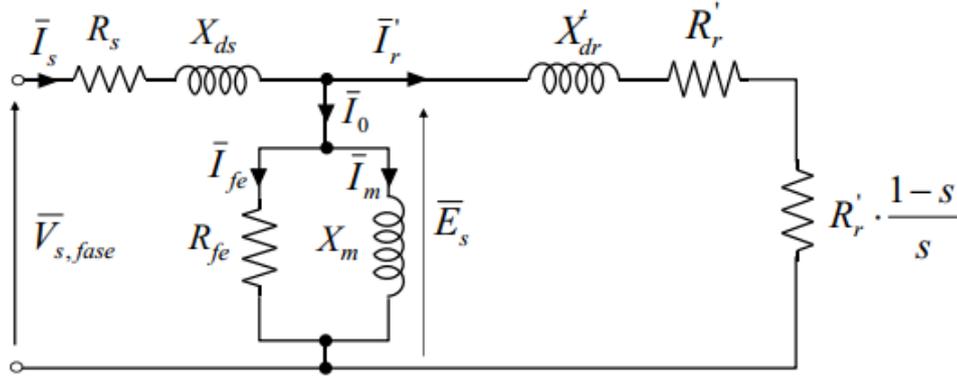


Figura 4.4. Circuito equivalente del motore asincrono ([31])

Il simbolo ' posto nelle grandezze relative al rotore sta a significare la trasposizione di queste nello statore. Le induttanze di dispersione X_{dr}' e X_{ds} rappresentano i flussi di statore e rotore dispersi che non attraversano il traferro, X_m è l'induttanza di magnetizzazione generata da correnti di magnetizzazione necessarie per fornire flusso utile al traferro, R_r' e R_s sono rispettivamente le resistenze di rotore e statore che determinano le perdite per effetto Joule, invece $R_r'((1-s)/s)$ è una resistenza fittizia indicante la conversione di potenza elettrica in meccanica. Esistono altre perdite nel ferro sia di statore che di rotore, descritte attraverso R_{fe} , ma in generale quelle nel rotore sono trascurabili ([31]). La potenza trasmessa dallo statore al rotore P_t si può definire come ([31]):

$$P_t = P_s - P_{j_s} - P_{F_e} \quad (4.12)$$

La potenza assorbita dallo statore P_s , a sua volta, dipende dalla corrente di statore I_s , dalla tensione di alimentazione V_s e dal fattore di potenza $\cos\varphi$ ([31]):

$$P_s = \sqrt{3} * V_s * I_s * \cos\varphi \quad (4.13)$$

La perdita per effetto Joule dovuta allo statore, invece, è direttamente proporzionale al quadrato della corrente statorica I_s ([31]):

$$P_{j_s} = 3 * R_s * I_s^2 \quad (4.14)$$

Infine la perdita nel ferro é inversamente proporzionale alla resistenza R_{Fe} , ma direttamente proporzionale al quadrato della f.e.m di fase statorica E_s ([31]):

$$P_{Fe} = 3 * \frac{E_s^2}{R_{Fe}} \quad (4.15)$$

Nel momento in cui lo scorrimento sar  unitario, ovvero il rotore fermo, la potenza P_t si disperde nel rotore, invece con il rotore in movimento, si trasmette una potenza meccanica proporzionale alla resistenza fittizia. La potenza trasmessa pu  essere vista come somma di due contributi, ovvero la potenza meccanica P_m e le perdite Joule nel rotore P_{jr} ([31]):

$$P_t = P_m + P_{jr} \quad (4.16)$$

Le perdite Joule di rotore sono direttamente proporzionali al quadrato della corrente rotorica ([31]):

$$P_{jr} = 3 * R'_r * I_r'^2 \quad (4.17)$$

La potenza P_t che viene trasmessa dallo statore al rotore dipende dalla velocit  angolare dello statore ω_s e dalla coppia elettromagnetica prodotta C_m ([31]):

$$P_t = C_m * \omega_s \quad (4.18)$$

$$C_m = \frac{3 * (1 - s) * R'_r * I_r'^2}{\omega_r * s} \quad (4.19)$$

La coppia elettromagnetica é direttamente proporzionale allo scorrimento s per piccoli valori di s , invece per valori pi  elevati tende ad assumere un andamento iperbolico. La coppia utile C_u trasmessa all'utilizzatore sar  ([31]):

$$C_u = C_m - C_{av} \quad (4.20)$$

Dove C_{av} rappresenta la coppia necessaria a vincere le perdite di attrito e ventilazione. Il rendimento della macchina dipende dalla potenza utile fornita all'utilizzatore e si esprime come rapporto tra potenza utile P_u e potenza assorbita P_{ass} ([31]):

$$\eta = \frac{P_u}{P_{ass}} \quad (4.21)$$

La potenza assorbita P_{ass} a sua volta pu  essere espressa come ([31]):

$$P_{ass} = P_u + P_{jr} + P_{js} + P_{fe} + P_{av} + P_{add} \quad (4.22)$$

Le perdite addizionali P_{add} sono generate dalle armoniche del campo magnetico nel traferro. La coppia elettromagnetica si pu  rappresentare anche in funzione della velocit  del rotore e si nota che per una velocit  nulla si ha la coppia di avviamento, invece nel momento in cui si raggiunge una velocit  pari a quella dello statore la coppia si annulla e inverte il verso di percorrenza, come si nota in figura (4.5):

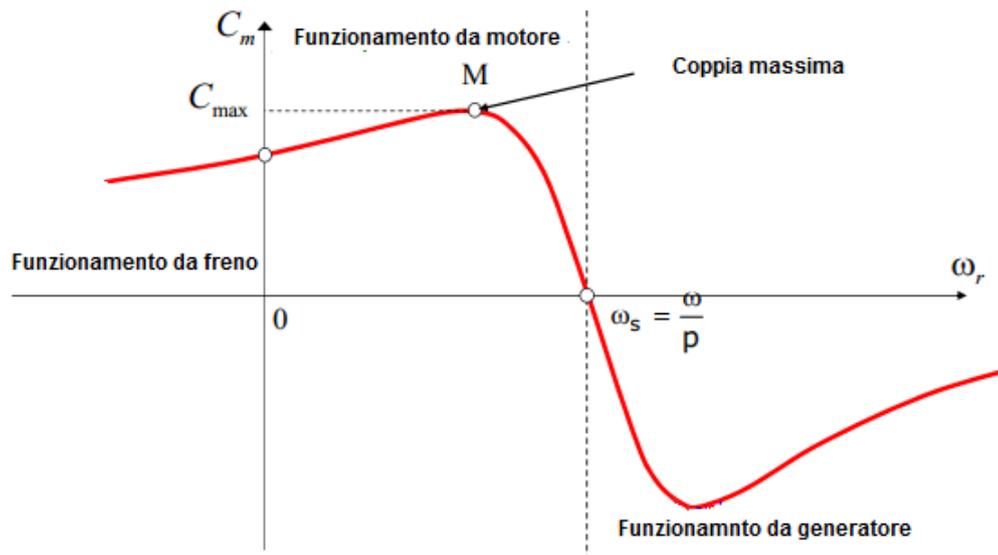


Figura 4.5. Andamento coppia elettromagnetica([31])

Nel quadrante delle ascisse negative il motore funziona come un freno e di conseguenza dissipa energia, nei quadranti delle ascisse positive si nota un funzionamento da motore fino all'annullarsi della coppia, e un funzionamento da generatore ipersincrono dall'annullarsi della coppia in poi([31]). All'avviamento il motore ha una corrente molto elevata, di circa 5-10 volte quella nominale, e questo porta a delle problematiche che possono essere superate adottando degli accorgimenti opportuni, poi all'aumentare della coppia resistente e del carico richiesto il motore tende a rallentare, con conseguente aumento della corrente rotorica e statorica([31]). La coppia nominale rappresenta il limite oltre il quale il rotore inizia a bloccarsi, con successiva generazione di perdite dovute al surriscaldamento proveniente dalle correnti([31]).

Nel passato questo motore era utilizzato a velocità costante, oggi viene impiegato in moltissime applicazioni con velocità variabile la cui regolazione può essere effettuata attraverso diversi metodi([31]):

- variazione della frequenza f ([31]);
- variazione del numero di poli p ([31]);
- variazione dello scorrimento attraverso la tensione o la resistenza rotorica([31]);

4.2.4 Variazione delle coppie polari

Uno dei metodi per regolare la velocità consiste nella variazione delle coppie polari, ma questa tipologia di regolazione porta ad una non continuità della regolazione. Si variano le connessioni degli avvolgimenti di statore([31]).

4.2.5 Variazione dello scorrimento

Se si varia la resistenza rotorica, aumentandola, ci saranno maggiori perdite rotiche con una diminuzione della potenza utile disponibile e costanza della coppia massima, invece la velocità di rotore sarà maggiore come anche lo scorrimento.([31]). Questo metodo non è molto utilizzato poichè induce perdite e porta a scarsi risultati.

4.2.6 Variazione della tensione di alimentazione

La regolazione della velocità può essere effettuata anche modificando la tensione di alimentazione e mantenendo fisso il valore della frequenza. In questo caso lo scorrimento massimo rimane costante, ma la coppia massima aumenta all'aumentare della tensione e viceversa([31]). Un convertitore è adibito alla variazione della tensione e non della frequenza, posto prima del motore.

4.2.7 Variazione della frequenza di alimentazione

La variazione della frequenza comporta la variazione della velocità di sincronismo del motore stesso. L'utilizzo di un inverter permette di raggiungere tali condizioni, variando sia la tensione che la frequenza poichè il rapporto V/f deve mantenersi costante, nel rispetto della legge lineare tensione-frequenza. Le correnti e le tensioni fornite dall'inverter non sono del tutto sinusoidali. Si possono ottenere tre tipologie di regolazione attraverso un inverter:

- variazione della velocità con coppia costante([31]);
- variazione della velocità con potenza costante([31]);
- variazione della velocità con potenza decrescente([31]);

In figura 4.6 si nota che la regolazione fino ad un determinato numero di giri n delimitato dal tratto A, avviene a coppia costante e con la tensione che varia da un valore nullo a quello nominale, insieme alla frequenza, tale per cui il rapporto V/f risulti costante; invece nel tratto B, dopo n_{base} , la regolazione avviene a potenza costante e a tensione costante poichè la macchina non può essere utilizzata con un valore di tensione che supera quello massimo V_{base} ([31]). La coppia di avviamento per le varie curve è differente, ma quella massima assume lo stesso valore. L'aumento di frequenza oltre il valore f_{base} , genera la condizione di deflussaggio nella macchina,

con riduzione del flusso, invece la regolazione a potenza decrescente subentra oltre un certo valore di velocità, in corrispondenza del quale è necessario condizionare la coppia al valore massimo([31]).

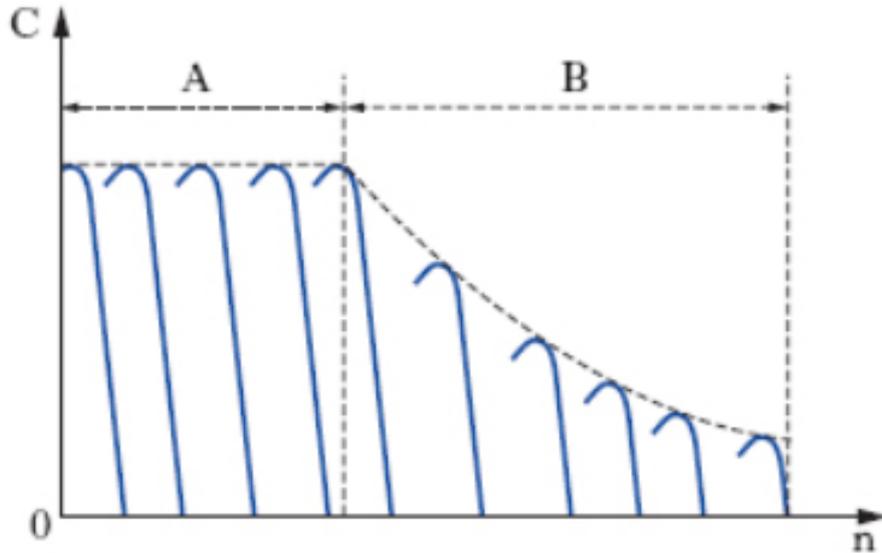


Figura 4.6. Schema di regolazione della coppia ([31])

4.3 Motore sincrono

Il motore sincrono, anch'esso alimentato a corrente alternata, è il più utilizzato negli ultimi anni in ambito navale. Il suo funzionamento è molto simile a quello del motore asincrono, ma la velocità del rotore è in sincronia con la velocità del campo magnetico statorico:

$$n_r = \frac{f * 120}{p} \quad (4.23)$$

Esistono varie tipologie tra cui quello avvolto, o a magneti permanenti:

- a flusso radiale in quanto il flusso del campo magnetico è diretto radialmente lungo i raggi che partono idealmente dal centro dell'albero su cui si dispone il rotore([33]);
- a flusso assiale poichè il flusso è diretto lungo l'asse. Questa tipologia può raggiungere potenze e coppie molto elevate([33]);
- a flusso trasverso, caratterizzato da un anello rotorico costituito da tanti elementi elettromagnetici, che ruota intorno a due anelli statorici([33]);

- con superconduttori ad alta temperatura con i quali si ha un miglioramento della conduttività e della potenza trasmessa, anche se il loro utilizzo é limitato ad applicazioni di nicchia, ma la loro diffusione ne comporterebbe una riduzione dei pesi e dei volumi, e un aumento della densità di potenza([33]).

4.4 Convertitore di frequenza

Il convertitore di frequenza é un dispositivo utile a fornire una frequenza o tensione variabile in uscita. In questa applicazione se ne farà uso per poter aumentare o diminuire la velocità del motore e conseguentemente dell'elica, per evitare l'utilizzo di eliche a passo variabile che ne complicano la progettazione. In campo marino esistono tre principali tipologie di convertitori:

- Inverter a tensione impressa(VSI);
- Inverter a corrente impressa(CSI) o sincroconvertitore;
- Cicloconvertitore.

4.4.1 Funzionamento del cicloconvertitore

Il cicloconvertitore é costituito da un ponte di tiristori(o ponte di Graetz) alimentato in corrente alternata, tale da generare sul lato opposto una tensione V_{dc} , come si nota in fig(4.7)([25]). La tensione sarà funzione dell'angolo α dei tiristori, ovvero variando nel tempo l'angolo α la tensione varierà con andamento cosinusoidale, ma solamente se vi scorre corrente I_d ,che risulta positiva solo se é diretta dall'anodo verso il catodo, ovvero se esce dal catodo dei tiristori; altrimenti se si verificano situazioni differenti la corrente andrà velocemente a zero([25]):

$$V_{dc} = \frac{3 * \sqrt{2} * U * \cos(\alpha)}{\pi} \quad (4.24)$$

Con U tensione efficace concatenata di alimentazione del ponte.

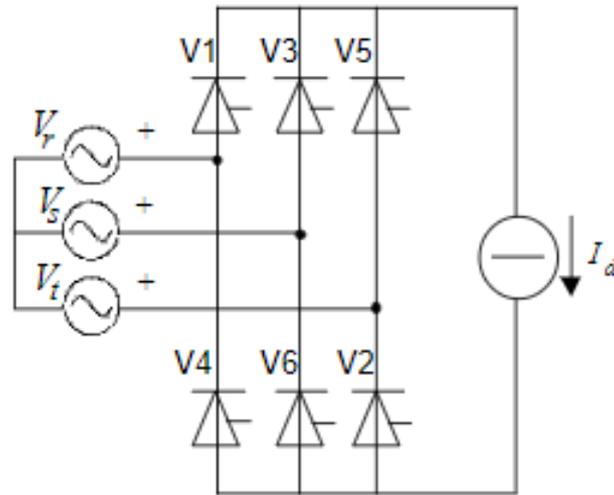


Figura 4.7. Schema di ponte di Graetz a SCR su carico a corrente costante([25])

Se si vuole ottenere una corrente che rispecchi un andamento sinusoidale, si dovrebbero utilizzare due ponti tiristori in antiparallelo, in cui nel primo ponte vi scorre corrente positiva e nel secondo corrente negativa([25]). Il suo utilizzo apporta numerosi vantaggi quali([25]):

- l'elevata potenza che può trasmettere all'elica (fino a 30 MW);
- l'inversione di marcia del motore;
- basso peso e ingombri;
- basso assorbimento di potenza reattiva;

L'unico svantaggio é quello di avere in uscita una frequenza di circa $1/3$ rispetto a quella iniziale([25]). Un esempio di alimentazione di motore sincrono trifase, con tre cicloconvertitori contenenti due ponti in antiparallelo si può osservare in figura 4.8. I ponti tiristori assorbono corrente dalla rete di alimentazione rappresentata con tre linee verticali.

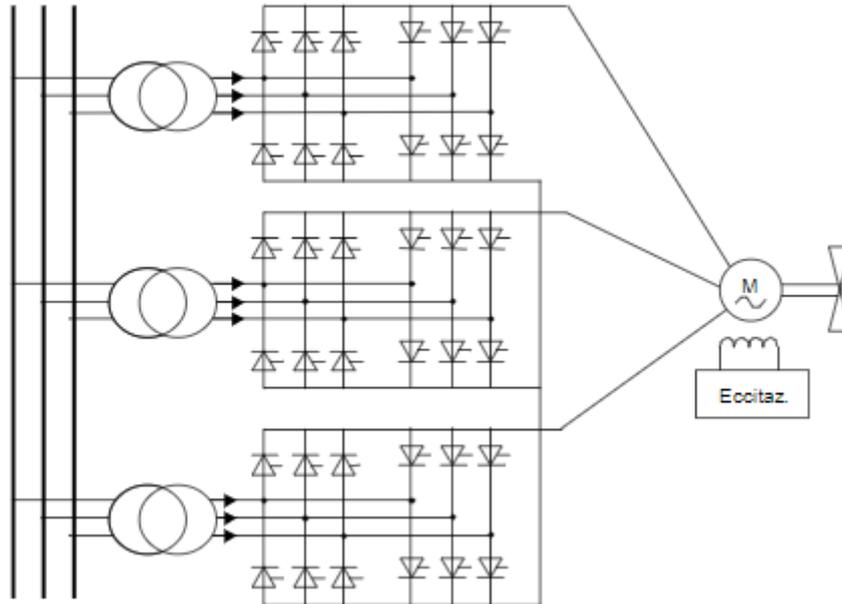


Figura 4.8. Cicloconvertitore trifase([25])

4.4.2 Funzionamento del sincroconvertitore

Il sincroconvertitore é costituito da un sistema di due cicloconvertitori a tiristori alimentati a corrente continua, costituiti specificamente da raddrizzatore più inverter (collegato al motore fornisce una frequenza variabile), e un sistema di eccitazione statico([25]). Le correnti presenti nel motore sincrono hanno un andamento simile ad un'onda quadra, di conseguenza la forza elettromotrice indotta dalle correnti dello statore avanza e si ferma ogni $T/6$ (T periodo dell'onda)([25]). La coppia legata sia al flusso di eccitazione che al flusso di armatura oscillante, sarà caratterizzata per lo stesso motivo da oscillazioni([25]):

$$C_{em} = \Phi_a * \Phi_e * \cos(\beta) \quad (4.25)$$

β definisce l'angolo compreso tra il flusso di armatura Φ_a e quello di eccitazione Φ_e . Il cicloconvertitore, invece, non presenta queste problematiche, di conseguenza genera una frequenza variabile e una coppia elettromotrice priva di oscillazioni([25]). Uno schema di alimentazione di un motore sincrono attraverso un sincroconvertitore si può osservare in figura 4.9

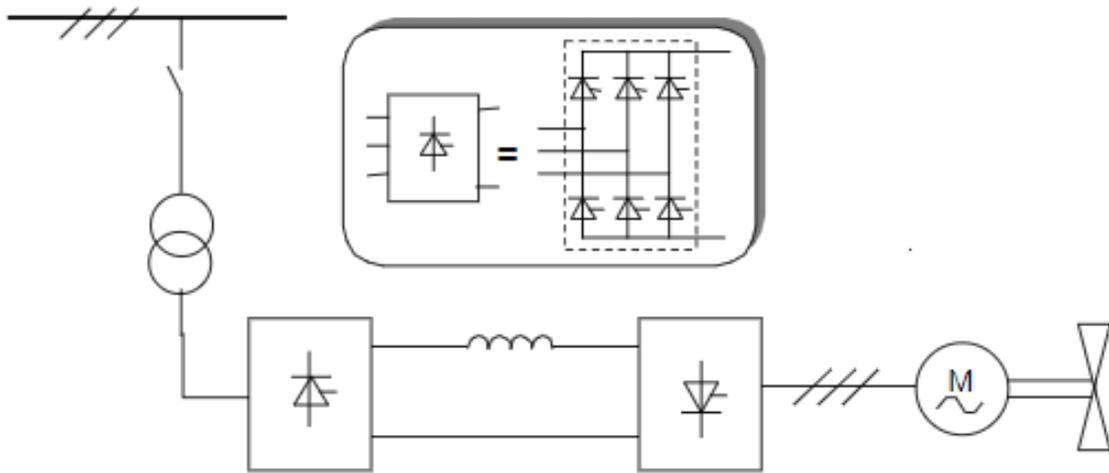


Figura 4.9. Schema di propulsione a macchina asincrona e convertitore a tiristori integrato con condensatori e sistemi ausiliari di commutazione([25])

4.4.3 Funzionamento del convertitore a commutazione forzata

Questo convertitore collegato soprattutto ai motori asincroni, consta di un raddrizzatore a corrente continua in cui vi è un condensatore adibito al mantenimento della tensione costante, e di un inverter funzionante secondo la tecnica del Pulse Width Modulation (PWM), la quale permette di ottenere in uscita una tensione variabile dipendente dal duty-cycle, ovvero il rapporto tra la durata dell'impulso positivo e quella dell'impulso negativo([25]). La presenza di interruttori pilotati ne aumenta il costo rispetto alle altre due tipologie di convertitori. Per generare gli impulsi si intersecano un'onda modulante sinusoidale e una portante triangolare. Dopo l'accensione del ponte se la portante è maggiore della modulante si avrà in uscita una tensione dopo l'apertura della valvola superiore del ponte, invece se la modulante risulta superiore alla portante in uscita si avrà una tensione nulla, con apertura della valvola inferiore del ponte([25]). Per un sistema trifase, si dovranno avere tre tensioni modulanti all'uscita. La tensione in uscita presenta un picco di $gV/2$, con g rapporto tra l'ampiezza della portante e della modulante([25]). La tecnica del PWM si è sviluppata nelle applicazioni navali, specialmente in quelle militari e mercantili, in tempi recenti a seguito dei numerosi progressi raggiunti in elettronica. In figura 4.10 è rappresentato uno schema di alimentazione di un motore asincrono attraverso un convertitore a commutazione forzata.

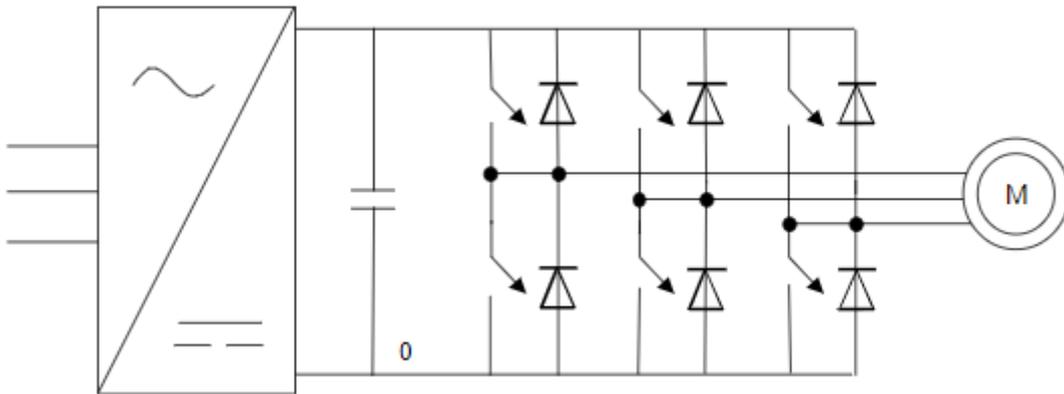


Figura 4.10. Sistema di propulsione con macchina asincrona e invertitore a commutazione forzata([25])

La distorsione delle armoniche è un problema molto diffuso nella propulsione elettrica navale, in quanto ha importanti ripercussioni sul corretto funzionamento del sistema, e per tale ragione si ricorre a vari metodi per ridurre gli effetti([25]). Di seguito se ne elencano i principali([25]):

1. l'utilizzo di filtri (ma per contro si ha il problema del peso e degli ingombri degli stessi). I filtri usati sono del tipo RLC, con impedenza uguale a quella della resistenza del filtro, tale da mostrare resistenza alla frequenza di risonanza delle armoniche di corrente;
2. l'impiego di convertitori rotanti (ovvero motori e generatori sincroni accoppiati);
3. aumento del numero degli impulsi del convertitore tale da avere armoniche di ampiezze uguali, ma in opposizione di fase per garantire la compensazione. Solitamente si ricorre a convertitori di 24 impulsi che presentano le armoniche del tipo([25]):

$$(2K + 1)12 \pm 1 \quad (4.26)$$

Le armoniche di corrente generano distorsioni sulle tensioni, che a loro volta generano altre armoniche di corrente. Se nel sistema fossero presenti dei condensatori, questi possono surriscaldarsi eccessivamente ed esplodere, poichè la loro impedenza(ovvero la facilità con cui scorre corrente in un corpo) diminuisce all'aumentare delle armoniche e come conseguenza si ha un elevato numero di correnti che rimangono all'interno del condensatore e lo surriscaldano per effetto Joule([25]).

4.5 Batterie agli ioni litio

Le batterie agli ioni litio sono delle batterie ricaricabili, il cui utilizzo sul settore elettrico e ibrido è cresciuto negli ultimi tempi grazie ai grandi passi compiuti dall'elettronica. Esiste una vasta gamma di queste batterie, in quanto hanno dimensioni e forme diverse, tale da poter ottimizzare gli spazi a disposizione. Il rendimento di queste batterie si avvicina all'unità, anche se dipende da fattori influenti quali la temperatura di esercizio e le correnti di attraversamento. Ci sono numerosi vantaggi che invitano a preferirla rispetto ad altre batterie sul mercato quali la durata di carica considerevole, elevate capacità di immagazzinamento di energia, elevate tensioni; ma presentano anche alcuni svantaggi che riguardano la pericolosità di esplosione, deterioramento delle qualità nel tempo, ricorrente manutenzione e costi di acquisto elevati([28]).

Queste batterie prendono il loro nome per la presenza dello ione litio che trasporta la carica elettrica([28]). Il litio genera un'alta differenza di potenziale nel momento in cui interagisce con un altro elemento, e dato che si ha un potenziale elettrico molto negativo si ottiene un'ingente quantità di energia nella batteria([28]). Il litio è molto reattivo ed è questa peculiarità a renderlo adatto agli accumulatori, ma per contro queste batterie le si deve usare in ambienti protetti perché altamente infiammabili ed esplosive([28]).

La batteria ha un anodo e un catodo all'interno dei quali fluisce un elettrolita che trasporta con sé ioni litio, il cui movimento dipende dalla fase di carica o di scarica([28]). Nella fase di scarica gli ioni litio, ionizzandosi, passano dall'elettrodo negativo a quello positivo, depositandosi nelle cavità porose della superficie del catodo, dopo aver attraversato un dispositivo permeabile interposto tra gli elettrodi([28]). In contemporanea il flusso di elettroni rilasciato dall'anodo genera il flusso di corrente, che sarà assorbito dall'utilizzatore connesso. Nella fase di carica la batteria funge da utilizzatore, di conseguenza il flusso degli ioni litio andrà in direzione opposta a quella assunta in fase di scarica([28]). L'anodo è solitamente formato da grafite sia per l'economicità, sia perché è in grado di assorbire una grande quantità di ioni litio, invece il catodo è composto da una struttura granulare in grado di assorbire gli ioni litio che si depositano solamente in superficie, ma che non penetrano interamente nella struttura catodica, a causa della scarsa conducibilità dei composti litiati([28]). L'attraversamento degli ioni litio nel catodo è migliorato dalla soluzione elettrolita liquida, che insinuandosi nel materiale catodico agevola anche la conducibilità del catodo stesso, infatti l'elettrolita liquido interagisce con gli elettrodi, li attraversa e grazie al fenomeno dell'elettrolisi genera la dissociazione degli ioni litio dagli elettrodi stessi, in modo che questi possano migrare da un elettrodo ad un altro e dar luogo alla corrente di carica o di scarica([28]). L'elettrolita è costituito da solventi polari in grado di resistere a determinate tensioni e correnti senza degradarsi nel tempo, e forma durante il ciclo di carica una pellicola di spessore quasi irrilevante che intrappola gli elettroni e lascia fluire gli ioni litio, per

evitare l'ulteriore decomposizione chimica([28]). La scelta dei solventi deve tener conto delle temperature, correnti in circolo, e tensioni, per tanto é ardua e complessa specialmente perchè il solvente deve essere in grado di proteggere gli elettrodi; ad oggi quelli più usati sono il propilene carbonato(PC) e etilene carbonato(EC)([28]). Il separatore é un elemento essenziale per le batterie, adibito alla separazione degli elettrodi che possono originare cortocircuiti pericolosi se interagiscono tra di loro; inoltre deve assumere una porosità adeguata per permettere il passaggio degli ioni litio in tempi brevi senza intrattenere per lungo tempo la soluzione all'interno([28]). Il materiale di cui é costituito é solitamente il polietilene, che mostra una certa resistenza meccanica, utile nell'assemblaggio iniziale della batteria, che vede il piegamento degli elettrodi e del separatore([28]).

Capitolo 5

Dimensionamento del sistema elettrico e tradizionale

5.1 Dimensionamento del sistema elettrico

Il sistema elettrico della nave sarà costituito da un motore elettrico asincrono in grado di garantire la massima potenza richiesta dalla nave per viaggiare ad una certa velocità massima di 12,8 *km/h*, corrispondenti a circa 7 nodi. Per regolare la velocità di rotazione del motore si ricorre ad un inverter DC/AC, che separa le batterie da quest'ultimo. Le batterie saranno ricaricate da un motore Stirling e sono dimensionate sia per soddisfare la tensione in ingresso dell'inverter sia le potenze. La nave a cui si fa riferimento è una nave mercantile della Guangzhou Shipyard International Co, che presenta le seguenti caratteristiche in tabella(5.1):

Tabella 5.1. Caratteristiche della nave mercantile della Guangzhou Shipyard International Co

Caratteristica	Valore	Unità di misura
Dislocamento	600	t
Lunghezza	70	m
Larghezza	13,9	m

Prima della scelta dei vari componenti del sistema elettrico si è calcolata la potenza necessaria al movimento della nave, attraverso la formula dell'ammiraglio([34]):

$$P = \frac{D^{2/3} * V^3}{K} \quad (5.1)$$

- D è il dislocamento [t], ovvero la massa dell'acqua spostata;
- V è la velocità della nave in nodi [Kn];

- K é un coefficiente compreso tra 250 e 350;
- P é la potenza in [CV].

Il coefficiente K sarà pari a 300, valore identificato per le navi mercantili di grandezza media. Il risultato ottenuto sarà maggiorato del 20 % in modo da creare un opportuno margine di sicurezza. I propulsori scelti per questa nave saranno due eliche, ognuna delle quali genererà una potenza pari alla metà di quella complessiva. Il sistema elettrico della nave mercantile é stato dimensionato su un'autonomia delle batterie di 16 h di viaggio. Le procedure e i risultati ottenuti con l'excel sono riportati nel seguito, considerando che in 16 h di viaggio la nave proceda sempre alla massima velocità (caso peggiore) :

- ore di autonomia = 16 h;
- velocità massima = 12,8 km/h;
- percorso totale in autonomia = $12,8 \text{ km/h} \cdot 16 \text{ h} = 204,8 \text{ km}$;

Il dimensionamento viene eseguito nelle condizioni di lavoro con massimo carico, ovvero considerando la massima velocità raggiungibile dalla nave (12,8 km/h); ma essa si troverà in questa condizione solo in alcuni momenti e per esigenze particolari. Nella tabella (5.2) sottostante si portano i valori delle potenze calcolate

Tabella 5.2. Potenze necessarie al movimento della nave

grandezza	valore	unità di misura	valore	unità di misura
potenza complessiva	77,87	CV	57,27	<i>kW</i>
potenza maggiorata del 20%	93,45	CV	68,73	<i>kW</i>
potenza per elica	46,72	CV	34,36	<i>kW</i>

Prima di definire la tipologia di motore elettrico da utilizzare, si é calcolata la potenza assorbita dall'elica, ma per fare questo bisogna dimensionare l'elica e definirne tutte le caratteristiche principali. Il dimensionamento prevede l'ottimizzazione del rendimento, la riduzione delle vibrazioni e della possibile cavitazione, il miglioramento dell'interdipendenza elica-timone, riduzione della difficoltà di svolgere alcuni movimenti e manovre particolari. Dal momento che soddisfare questi requisiti e massimizzare il rendimento propulsivo sono obiettivi contraddittori, durante il progetto dell'elica é necessario utilizzare metodi iterativi e giungere ad una soluzione di compromesso ([27]). In un primo momento viene selezionato il valore ottimale dei concetti geometrici fondamentali (diametro, passo medio, numero di pale, area espansa) attraverso opportuni calcoli basati su delle ipotesi dal momento che si fa riferimento a delle informazioni storiche e statistiche per la resistenza della nave e

per la descrizione dell'interfaccia elica-carena attraverso l'uso di coefficienti adeguati, nonché grafici (ormai espressi tramite equazioni) relativi all'elica priva di carena provenienti da prove sperimentali di serie sistematiche([27]).

G.Trincas osserva che:

Il progetto concettuale é realizzato con l'obiettivo primario di raggiungere la velocità di servizio della nave, come da specifica armatoriale, con il minimo consumo di combustibile e la minima potenza richiesta al motore principale. Affinché tutti i requisiti progettuali possano essere rispettati completamente nella seconda fase, durante il progetto preliminare si effettua l'ottimizzazione delle caratteristiche principali dell'elica tenendo conto degli effetti del carico idrodinamico dell'elica sui coefficienti propulsivi. Successivamente, nella terza fase, si progetta l'elica finale servendosi della teoria vorticale, e garantendo simultaneamente la robustezza delle pale dell'elica e l'assenza di uno sviluppo pericoloso della cavitazione. Questi calcoli, che presuppongono la conoscenza del campo di velocità nel piano del disco-elica, ottenibile in misura affidabile solo sperimentalmente, consentono di definire con esattezza la geometria dell'elica, ossia la distribuzione radiale della lunghezza di corda di pala, dello spessore massimo e del passo ed, infine, i profili degli elementi di pala.([27])

Per effettuare la scelta del motore elettrico adeguato per la seguente applicazione, si é calcolata la potenza assorbita da ciascuna elica, ma per ottenere questo obiettivo si é usata dapprima una procedura iterativa utile per determinare il numero di giri e il diametro ottimale dell'elica, che possano rispettare il requisito di un assorbimento di potenza non troppo elevato rispetto alla potenza effettiva calcolata in precedenza che serve alla nave per vincere la resistenza R_t e farla avanzare con una certa velocità V . La procedura prevede quindi la scelta di un diametro di primo tentativo, la successiva costruzione grafica delle curve relative al K_t e al K_q e la definizione del numero di giri n ottenuto dall'intersezione delle due curve. Dopo aver trovato il valore esatto di J , K_t e K_q si calcola il rendimento dell'elica vero e la reale potenza assorbita dall'elica. Se la potenza assorbita risulta molto lontana dalla potenza effettiva P_e , si ripete l'iterazione fino ad ottenere un valore non troppo discordante da questa. Quando l'ultimo requisito sarà soddisfatto, l'iterazione si conclude con la definizione del diametro e del numero di giri ottimale. Si descrive la procedura iterativa utilizzata.

5.1.1 Diametro e numero di giri ottimale

Si inizia con la velocità V della nave, definita in precedenza, in quanto si é scelto che questa potesse viaggiare ad una velocità massima di 12,8 Km/h.

$$V[m/s] = \frac{V[km/h]}{3,6} \quad (5.2)$$

Si é scelto la frazione di scia wf di 0,25; valore solitamente compreso tra 0,2 - 0,4. La frazione di scia tiene conto delle possibili interazioni tra carena e elica, poichè se si dovesse considerare l'elica isolata questa avrebbe un certo campo di moto e di velocità, ma se si prendesse il sistema carena-elica si notano delle modifiche del campo di moto dell'elica dovute alla carena([35]). Si prosegue con la valutazione del fattore di deduzione di spinta t , definito intorno a 0,16 - 0,20. Questo fattore definisce l'interazione tra eliche e poppa, dato che l'elica tende ad aumentare la velocità della poppa, ma a ridurne le pressioni che causano un aumento della resistenza della nave([35]).

Si calcola il rendimento dell'elica dietro la carena η_h e la velocità di avanzo V_a ([13]):

$$\eta_h = \frac{1 - t}{1 - wf} \quad (5.3)$$

$$V_a[m/s] = V * (1 - wf) \quad (5.4)$$

Si prosegue con la resistenza al moto R_t ,cioè la forza del mare generata in opposizione al moto della nave, e la spinta dell'elica T . Si calcolano a partire dalla potenza effettiva dell'elica, ovvero di 34,36 kW([13]):

$$R_t[kN] = \frac{P_e}{V} \quad (5.5)$$

$$T[kN] = \frac{R_t}{1 - t} \quad (5.6)$$

Successivamente si legge graficamente il numero di giri ottimali n , come intersezione delle curve Kt e Kq espresse in funzione del numero di giri, variando il diametro D dell'elica nei vari tentativi della procedura iterativa . Esistono diverse espressioni di Kt e Kq , a seconda della tipologia di elica a cui si vuol fare riferimento. Per la progettazione si ricorre alla serie B di Wageningen, le cui espressioni sono di seguito riportate([13]):

$$Kt = 0,42 * (1,4 - J)^{0.82} \quad (5.7)$$

$$Kq = 0,074 * (1,53 - J)^{0.82} \quad (5.8)$$

$$Kq = \frac{T}{\rho * D^4 * n^2} \quad (5.9)$$

$$Kt = 0.42 * (1.4 - \frac{Va}{D * n})^{0.82} \quad (5.10)$$

Dopo aver letto graficamente i giri n [rps] in corrispondenza di un determinato diametro D , si calcola J , kt , kq , e il rendimento vero dell'elica prendendo per ipotesi un valore usuale di η_{rr} (rendimento relativo rotativo) di 1,02([13]):

$$\eta_p = \eta_{rr} * \eta_h * \eta_o \quad (5.11)$$

Il rendimento dell'elica isolata si esprime([13]):

$$\eta_o = \frac{J * kt}{2 * \pi * Kq} \quad (5.12)$$

$$J = \frac{Va}{D * n} \quad (5.13)$$

La potenza assorbita dall'elica, se non si discosta notevolmente da quella effettiva, l'iterazione si ritiene conclusa([14]):

$$P_{ass} = 2 * \pi * Kq * \rho * D^5 * n^3 \quad (5.14)$$

Infine si calcola il momento torcente([13]):

$$M_t = \frac{P_{ass}}{2 * \pi * n} \quad (5.15)$$

Per capire se il diametro ottenuto é quello definitivo, da cui si ottiene un valore di potenza assorbita molto vicino a quello della potenza effettiva, si deve eseguire un'ulteriore verifica finale che riguarda il coefficiente di spinta C_t . C_t é un fattore che indica la contrazione del fluido nell'attraversare la zona del disco dell'elica([27]):

$$\eta_i = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + C_t}} \quad (5.16)$$

$$C_t = \frac{8 * kt}{\pi * J^2} \quad (5.17)$$

Si adotta come diametro di primo tentativo un $D=2m$, ma come si vede in fig 5.1 le curve relative a Kt , Kq si intersecano in corrispondenza di un numero di giri ottimali pari a 2 rps (ovvero 120 rpm). Questo valore di velocità si discosta di molto da quello che possono fornire i motori elettrici, considerando quelli con un numero massimo di poli pari a 12.

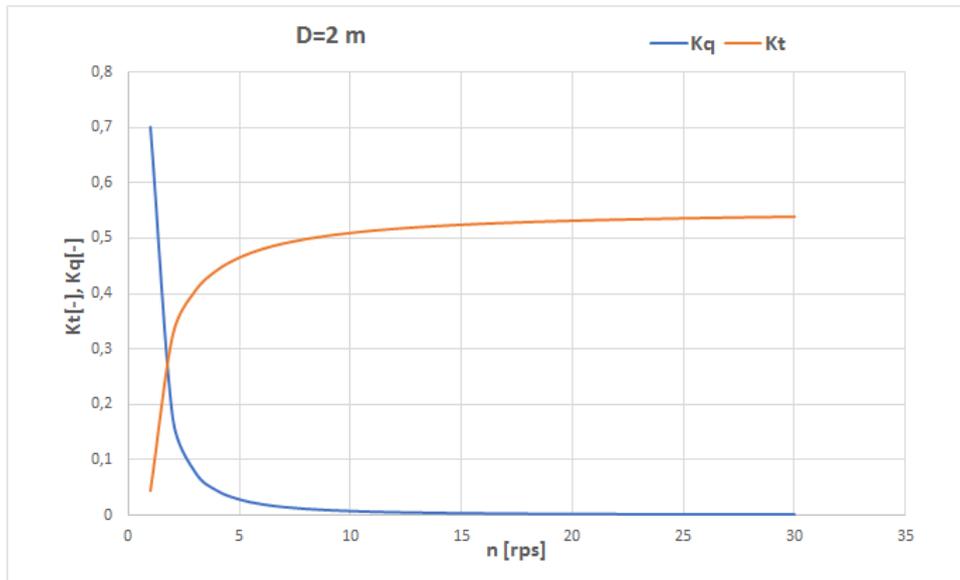


Figura 5.1. Curve di K_t , K_q in funzione di n con $D=2$ m

Si procede con un diametro $D=1,5$ 1 0,9 e 0,8m; di conseguenza si definiscono nuovi grafici nel quale si può leggere il numero di giri n ottimale poichè con ciascuno di questi le due curve possono intersecarsi in maniera differente.

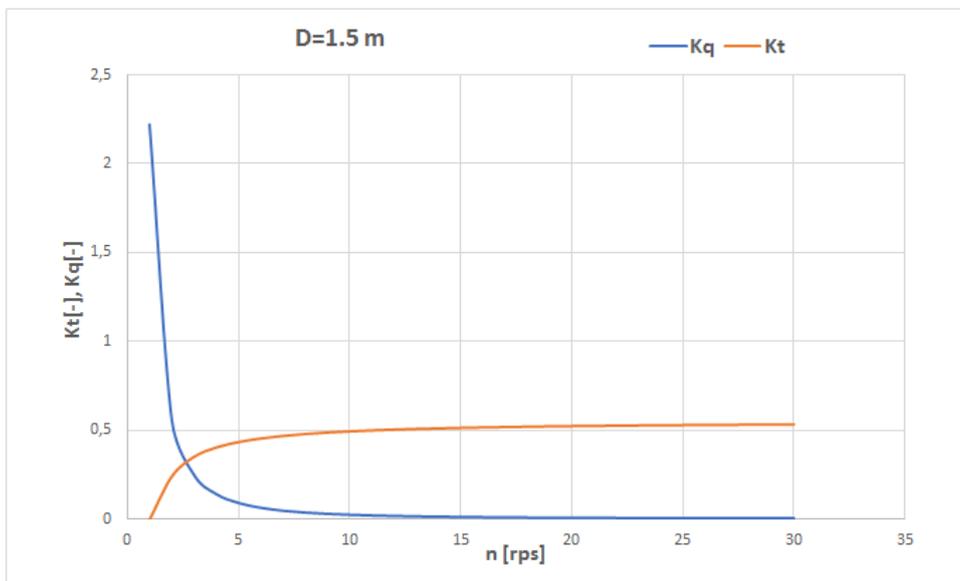


Figura 5.2. Curve di K_t , K_q in funzione di n con $D=1,5$ m

In figura(5.2) si ha un numero di giri pari a 3 rps(180rpm) con un $D=1,5m$. Questo diametro fornisce un rendimento piuttosto elevato, ma velocità bassa e una potenza P_{ass} che si allontana di molto da quella effettiva Pe .

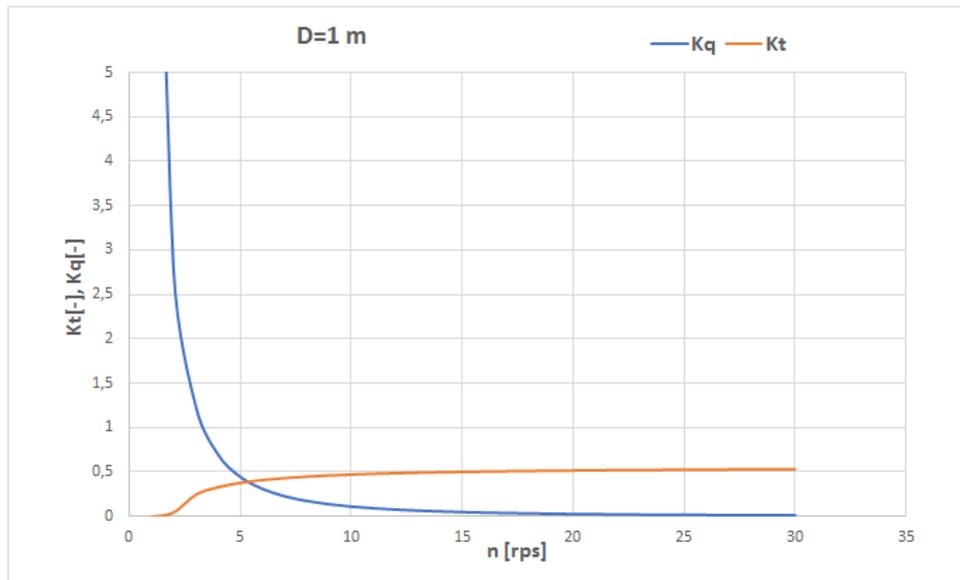


Figura 5.3. Curve di K_t , K_q in funzione di n con $D=1m$

In figura(5.3) si ha un numero di giri pari a 5,5 rps(330rpm) con un $D=1m$. Questo diametro ha un rendimento piuttosto discreto, una potenza P_{ass} che non si allontana di molto da quella effettiva Pe . L'unico problema è il numero di giri che si allontana da quello dei motori elettrici. In figura 5.4 si ha un numero di giri pari a 7 rps(420rpm) con un $D=0,9m$. Questo diametro ha una potenza P_{ass} molto distante da quella effettiva Pe . Per ottenere questa velocità lo scorrimento del motore elettrico dovrebbe essere superiore al 6 % e questo comporta delle difficoltà nella gestione della regolazione della velocità. Il rendimento è piuttosto basso, quindi si ha un'ulteriore motivazione a non preferire questo diametro.

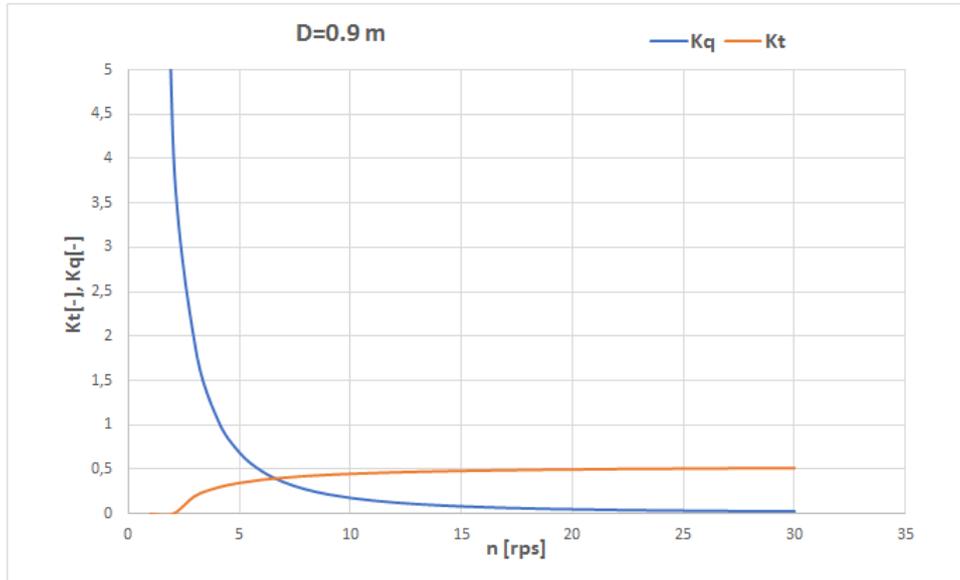


Figura 5.4. Curve di K_t , K_q in funzione di n con $D=0,9m$

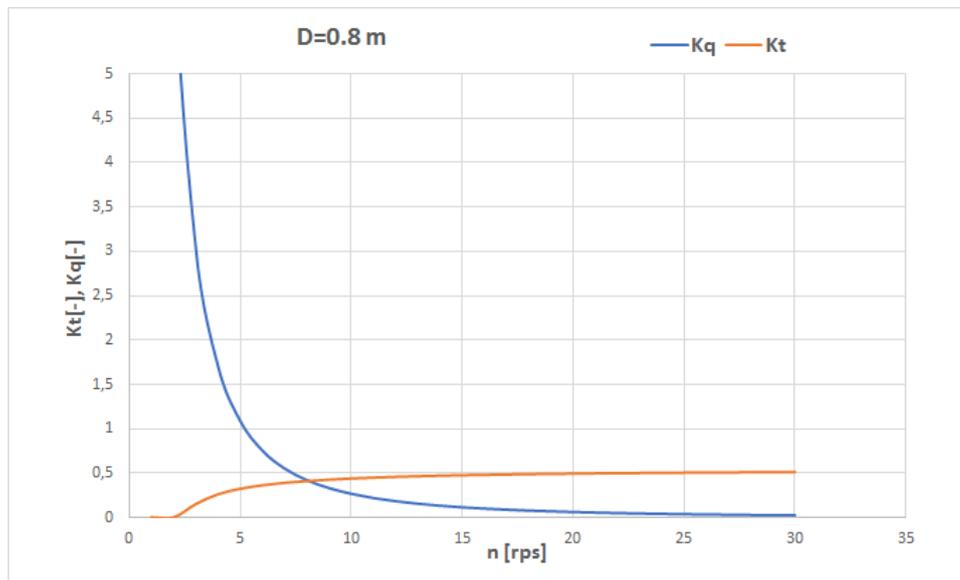


Figura 5.5. Curve di K_t , K_q in funzione di n con $D=0,8m$

Dal grafico di fig5.5 si leggono il numero di giri n ottimali pari a 8, corrispondenti a 480 rpm, valore vicino alla velocità del rotore di un motore elettrico asincrono con 12 poli, di frequenza 50 Hz e scorrimento del 4 % (lo scorrimento é di solito un valore

compreso tra il 3-6 %). I risultati relativi a n , al rendimento η_o , η_i , e alla potenza assorbita dall'elica P_{ass} nei 5 casi, calcolati attraverso le formule precedenti sono riportati nella tabella(5.3).

Tabella 5.3. Calcoli dimensionamento elica

<i>diametro</i> [m]	n [rps]	η_p [-]	η_i [-]	P_{ass} [kW]
2	2	0,60	0,74	108,09
1,5	3	0,54	0,69	92,62
1	5,5	0,45	0,60	82,17
0,9	7	0,39	0,55	104,84
0,8	8	0,38	0,54	87,27

Dalla tabella(5.3) si deduce che tutti i rendimenti ideali sono superiori a quelli veri dell'elica, quindi tutti possono essere scelti, ma per il dimensionamento si considererà un diametro di 0,8m; poiché fornisce una P_{ass} minore di tutti gli altri diametri, e che si avvicina alla potenza effettiva P_e di 34,36 [kW]. Il D=1m garantisce una potenza assorbita che non si discosta di molto da quella fornita dal D=0.8m, e il suo rendimento η_p è più elevato, ma non viene scelto soprattutto perché fornisce un numero di giri più basso. Dato che la scelta ricade sul diametro di 0.8m, si riporta nella tabella(5.4) nello specifico tutti i valori calcolati con la procedura descritta in precedenza.

Tabella 5.4. Calcoli dimensionamento elica

grandezza	valore	unità di misura
V(velocità della nave)	3,55	m/s
wf(frazione di scia)	0,25	-
1-wf	0,75	-
t(fattore di deduzione di spinta)	0,16	-
η_h (rendimento dell'elica dietro carena)	1,12	-
η_{rr} (rendimento relativo rotativo)	1,02	-
D(diametro elica scelto)	0,8	m
Va(velocità di avanzo)	2,66	m/s
Pe(potenza effettiva)	34,36	kW
Rt(resistenza al moto)	9,66	kN
T(Spinta dell'elica)	11,51	kN
ρ (densità dell'acqua)	1025	Kg/m^3
T(Spinta dell'elica)/($\rho * D^4$)	27,41	-
n(numero di giri da grafico)	8	rps
J	0,42	-
Kq	0,08	-
Kt	0,41	-
η_o (rendimento dell'elica isolata)	0,34	-
η_p (rendimento dell'elica vero)	0,38	-
C_t (coefficiente di spinta)	6,08	-
η_i (rendimento dell'elica ideale)	0,54	-
P_{ass} (potenza assorbita dall'elica)	87,27	kW
M_t (momento torcente dell'elica)	1737	Nm

Dopo aver calcolato la potenza assorbita dall'elica P_{ass} , si prosegue con la definizione della potenza all'asse P_{asse} , legata al rendimento dell'asse η_a che separa il motore dall'elica. Per conoscere la potenza che deve erogare il motore, si deve maggiorare del 10/15 % la potenza all'asse, come se si stesse applicando un coefficiente di sicurezza. In tabella(5.5) si riportano i valori delle potenze necessarie per determinare quella erogabile dal motore.

Tabella 5.5. Calcoli potenza asse e del motore

grandezza	valore	unità di misura
P_{ass} (potenza assorbita dall'elica)	87,27	kW
η_a (rendimento dell'asse)	0,85	-
P_{asse} (potenza asse)	102,67	kW
P_{mot} (potenza che deve fornire il motore)	118	kW

$$P_{asse} = \frac{P_{ass}}{\eta_a} \quad (5.18)$$

Il rendimento η_o e i coefficienti K_q e K_t possono essere calcolati sia attraverso delle espressioni, sia graficamente dopo aver definito n e J , nel Diagramma di Pappel come mostrato in fig 5.6

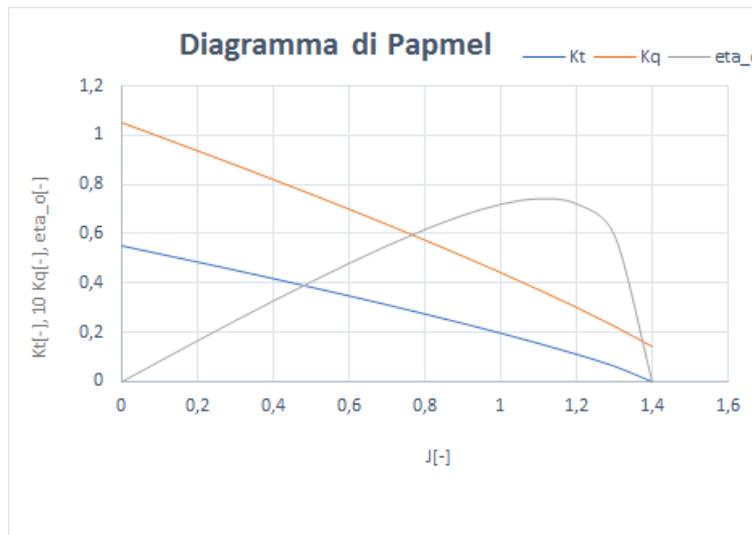


Figura 5.6. Curve di K_t , K_q , η_o in funzione di J

Il motore elettrico asincrono trifase dovrà soddisfare la $P_{mot}=118[\text{kW}]$.

G.Trincas osserva che” *il coefficiente di spinta indica se occorre adottare per il profilo della sezione una curvatura più o meno accentuata.*”([27]).

Nel momento in cui si adottano coefficienti di spinta con valori superiori ai limiti, si avrebbero delle curvature accentuate che potrebbero portare a stallo o a cavitazione([27]).Nel seguito si definirà il numero di pale Z e il rapporto di area espansa A_e/A_o , poiché sono fattori che influiscono soprattutto sul rendimento, prima di poter far riferimento a grafici o equazioni particolari.([27]).

5.1.2 Numero di pale

Il numero di pale in una nave mercantile é solitamente compreso tra tre e cinque. La scelta viene accompagnata principalmente da considerazioni che riguardano le armoniche prodotte dall’elica e che possono interferire con quelle del motore e della linea d’assi, generando rumori e vibrazioni([27]). In questo caso si é scelto un numero di pale $Z=5$,e in un secondo momento si é appurato che la frequenza della linea d’assi e del motore non fosse uguale oppure doppia di quella della pala.

$$f_{pala} = n * Z = 5 * 8 = 40[\text{Hz}] \quad (5.19)$$

$$f_{linead'assi} = n = 8[Hz] \quad (5.20)$$

$$f_{motore} = 50[Hz] \quad (5.21)$$

5.1.3 Rapporto di area espansa

Il rapporto di area espansa é fondamentale nello studio della resistenza e del rendimento dell'elica, in piú serve per verificare la cavitazione ([27]).

G.Trincas osserva che " *gli esperimenti hanno dimostrato che, a parità di condizioni, l'aumento di Ae/Ao porta ad un incremento dei coefficienti di spinta e momento torcente, specialmente per bassi valori dei coefficienti d'avanzo, come risultato dell'incremento dell'area di pala sulla quale agisce la forza di pressione.*" ([27])

La formula utilizzata per definire il rapporto di area espansa minima é quella di Keller([27]):

$$\left(\frac{Ae}{Ao}\right)_{min} = \frac{(1.3 + 0.3 * Z) * T}{(p_a + (\gamma * h) - p_v) * D^2} + K \quad (5.22)$$

-Z é il numero di pale pari a 5;

-h é l'altezza di immersione pari a 2,33 [m];

- p_a é la pressione atmosferica pari a 101325 [N/m^2];

- p_v é la pressione di vapore pari a 1706 [N/m^2];

- γ é il peso specifico dell'acqua marina pari a 10055 [N/m^3];

-D é il diametro pari a 0,8 [m];

-T é la spinta di 11506 [N];

-K é un coefficiente posto uguale a zero per navi mercantili.

Il valore di $\left(\frac{Ae}{Ao}\right)_{min}$ risulta pari a 0,41. Successivamente si é calcolato l'indice di cavitazione in corrispondenza di 0,7R; in modo da poter entrare nel diagramma di Burrill (tipico diagramma usato per lo studio della cavitazione), e calcolare il τ_c ([27]):

$$\sigma_{0.7R} = \frac{p_a + (\gamma * h) - p_v}{0.5 * \rho * V_a^2} * \frac{J^2}{J^2 + 4.84} \quad (5.23)$$

Dal grafico di figura(5.7) si legge un valore di τ_c di 0,27 sulle ordinate, entrando con il valore di $\sigma_{0.7R}$ pari a 1,17 e intersecando la curva centrale relativa alle navi mercantili.

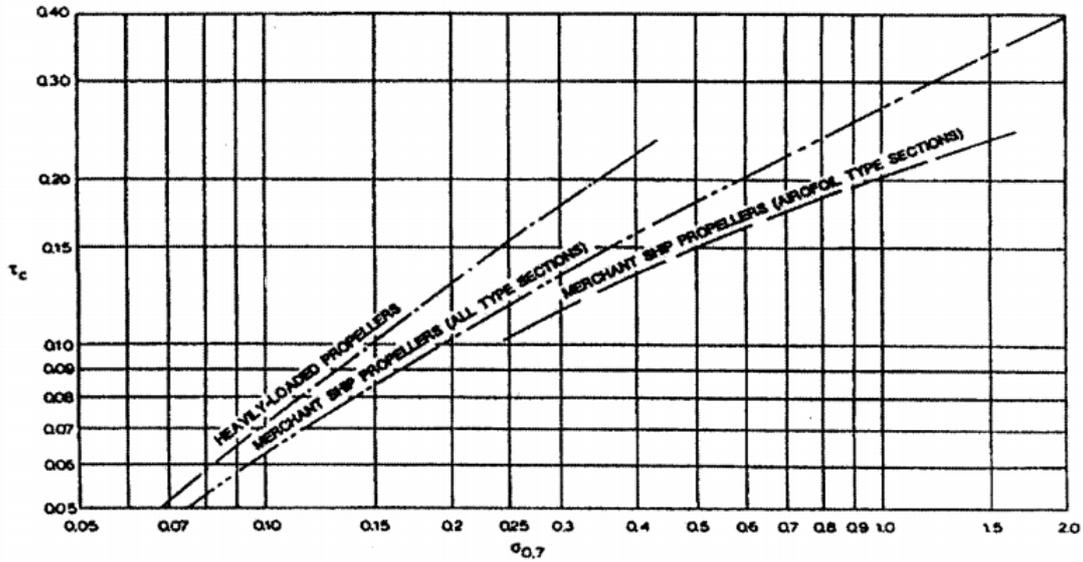


Figura 5.7. Diagramma di cavitazione di Burrill ([27])

Dalla formula relativa al τ_c si potrà calcolare l'area proiettata e successivamente l'area espansa([27]):

$$\tau_c = \frac{T}{0.5 * \rho * V_{0.7R}^2 * A_p} \quad (5.24)$$

$$V_{0.7R} = \sqrt{(Va^2) + (0.7 * \pi * n * D)^2} \quad (5.25)$$

$$A_e = \frac{A_p}{(1.067 - 0.229 * P/D)} \quad (5.26)$$

In seguito si definisce l'area A_o occupata dall'elica, per poi calcolare il rapporto di area espansa e verificare se questo sia maggiore di $(A_e/A_o)_{min}$.

$$A_o = \frac{\pi * D^2}{4} \quad (5.27)$$

I valori ricavati sono:

$$-V_{0.7R}=14,31 \text{ m/s};$$

$$-A_p=0,40 \text{ m}^2;$$

$$-A_e=0,43 \text{ m}^2;$$

$$-A_o=0,50 \text{ m}^2;$$

$$-A_e/A_o=0,86 \text{ m}^2;$$

Si nota come il rapporto di area espansa A_e/A_o sia maggiore di quello minimo $(A_e/A_o)_{min}$, dunque non sussiste il problema della cavitazione.

5.1.4 Passo e rapporto P/D

Il passo dell'elica si può calcolare come rapporto tra $V_{teorica}$ della nave e il numero di giri n dell'elica. In questa applicazione si preferisce usare un passo fisso, in modo da ridurre la manutenzione e la difficoltà di dimensionamento, anche perchè variando la velocità dei motori con l'utilizzo di un convertitore di frequenza si potrà variare anche il numero di giri dell'elica, a seconda delle varie esigenze di carico e delle possibili manovre da realizzare.

$$p = \frac{V_{teorica}}{n} = \frac{3,55[m/s]}{8[rps]} = 0,44[m] \quad (5.28)$$

In tal caso si confonde la velocità teorica con quella della nave, a causa dell'approssimazione esistente tra i due risultati. Il P/D è di 0,55m; se si assume un diametro dell'elica di $D=0,8m$.

5.1.5 Dimensionamento del motore/generatore elettrico asincrono

Il sistema sarà costituito da due motori elettrici asincroni, funzionanti anche come generatori, in grado di soddisfare la potenza richiesta dai due assi collegati all'elica. Considerando una sola elica il motore deve garantire una potenza di 118 [kW], e a tal proposito si prendono due motori dal catalogo WEG (figura 5.8), i cui dati di targa sono riportati nella tabella(5.6) successiva:

Tabella 5.6. Dati di targa del motore elettrico([15])

grandezza	Dati di targa
potenza nominale	da 90 a 3150 kW
tensione nominale	da 380 a 6600 V
velocità nominale	fino a 3600 rpm
numero di poli	2-4-6-8-10-12
frequenza	50-60 Hz
grado di protezione	IP55
dimensione del telaio	IEC 315 to 630
classe di isolamento	F(DT 80 K)
fattore di servizio	1,00

Il motore sarà alimentato esclusivamente dal gruppo batterie. Tra questo e il gruppo batterie è posizionato un inverter per la regolazione del numero di giri del motore. Dapprima si calcola la potenza erogata dal motore $P_{erogata}$ poi si determinano una serie di grandezze elettriche.

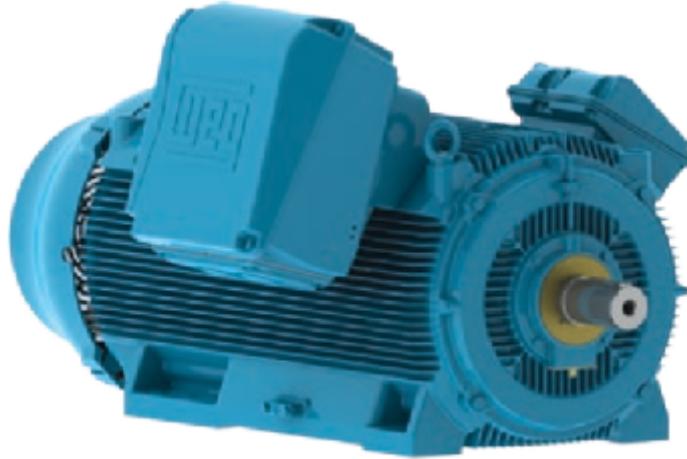


Figura 5.8. Motore elettrico asincrono preso dal catalogo WEG([15])

Per specificare la potenza assorbita dal motore elettrico in ingresso, bisogna specificare il rendimento meccanico η_m :

$$\eta_m = \frac{P_{erogata}}{P_{ingresso}} \quad (5.29)$$

Per il calcolo della velocità di sincronismo e di quella asincrona si considerano un numero di poli pari a 12 in modo da ottenere una velocità che non si discosti di molto da quella dell'elica. La velocità del campo magnetico rotante è così definita:

$$n_s = \frac{120 * f}{p} \quad (5.30)$$

Con p che rappresenta il numero dei poli. La velocità asincrona del rotore, ovvero quella dell'elica è così specificata:

$$n_{as} = n_s - \left(\frac{s}{100} * n_s\right) \quad (5.31)$$

Per definire la corrente in ingresso, si utilizza la formula successiva, ma per evidenziare che il sistema è a corrente alternata bisogna inserire anche il fattore di potenza $\cos\varphi$. La tensione va moltiplicata per $\sqrt{3}$ perchè l'alimentazione è trifase

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} * V * \cos\varphi} \quad (5.32)$$

Si decide di alimentare il motore con una tensione di 400 V, che rappresenta un valore adeguato per potenze inferiori a 4000 kW .Il numero di poli sarà 12, per avere una velocità angolare pari a quella dell'elica con uno scorrimento del 4 %.In figura(5.9) si nota che il motore é inizialmente fermo con una velocità nulla, successivamente con l'avviamento la velocità passa da un valore nullo a un picco di circa 65 rad/s .La velocità all'avviamento risulta più alta a causa della coppia di avviamento di circa 5-10 volte il valore nominale. Dopo questo breve transitorio le oscillazioni iniziano a smorzarsi con lo stabilirsi della velocità intorno a 50 rad/s , valore richiesto dall'elica per proseguire alla massima velocità.

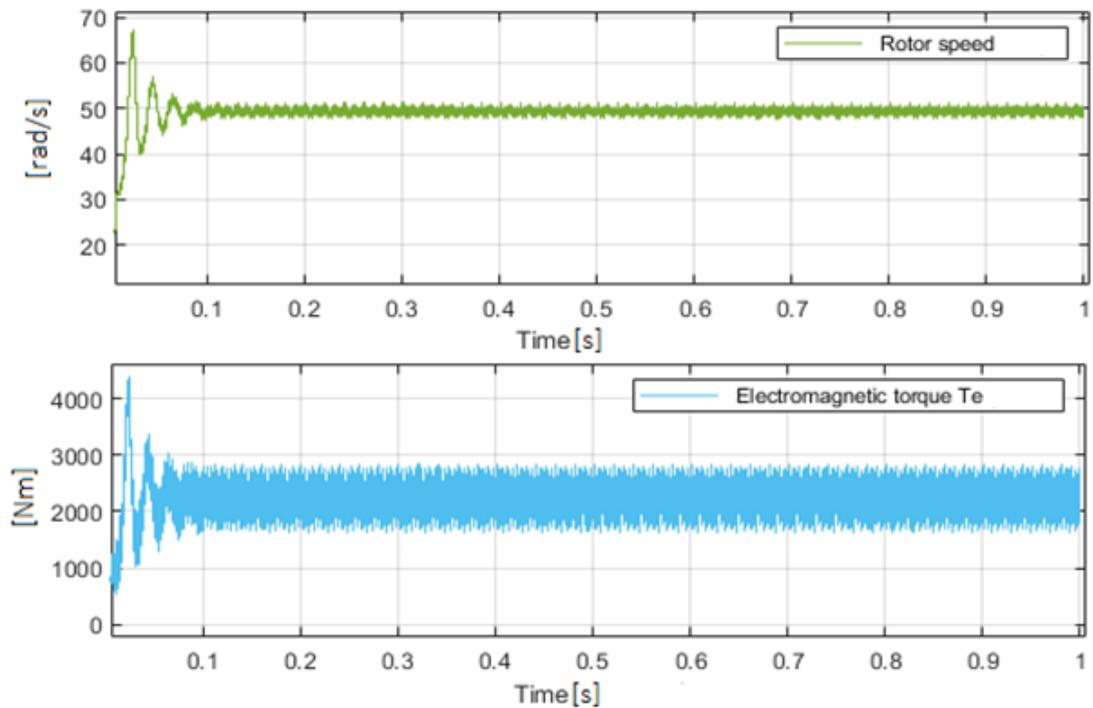


Figura 5.9. Andamento della velocità angolare e della coppia elettromagnetica

La corrente del rotore ha una forma sinusoidale come si vede in figura(5.10),in risposta del fatto che il motore sia a corrente alternata.In aggiunta si evidenziano tre correnti rotoriche a seguito dell'alimentazione trifase.

I calcoli ottenuti si riportano in tabella(5.7)

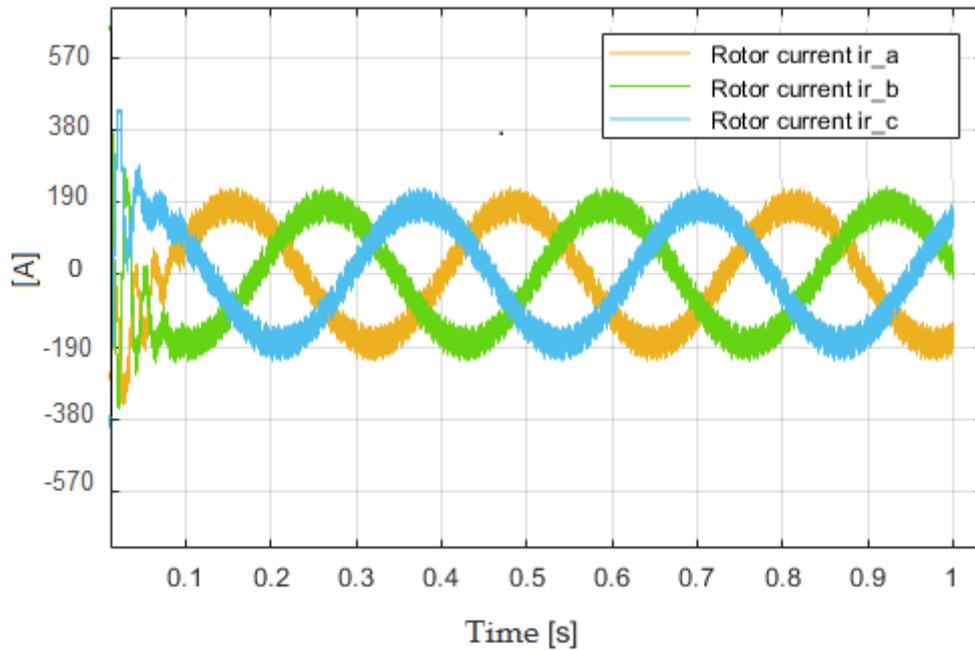


Figura 5.10. Correnti sinusoidali in uscita dal rotore

Tabella 5.7. Calcoli relativi al motore elettrico

grandezza	valore	unità di misura
Perogabile	118	kW
tensione di alimentazione scelta V	400	V
frequenza	50	Hz
numero poli	12	-
corrente erogata	195,88	A
scorrimento s_{max}	4 %	-
velocità di sincronismo η_s	500	rpm
velocità di scorrimento η_{as}	480	rpm
rendimento meccanico η_m	0,85	-
fattore di potenza $\cos\phi$	0,87	-
potenza in ingresso P_{ass}	138,9	kW
corrente in ingresso I_{in}	230,45	A

5.1.6 Inverter DC/AC posizionato tra motore elettrico e gruppo batterie

L'inverter, in questa applicazione, è interposto tra le batterie e il motore, ed è indispensabile nel variare la frequenza e conseguentemente la velocità di rotazione del motore elettrico asincrono. Si potrà impiegare un'elica a passo fisso con la possibilità di ottenere una velocità variabile nel tempo, anziché adoperare una a passo variabile, dal momento che quest'ultima soluzione delinea una certa complessità dal punto di vista progettuale. La scelta ricade su un convertitore preso dal catalogo SINAMICS DRIVES, SIEMENS, tale da soddisfare la tensione di alimentazione in ingresso al motore elettrico e la potenza elettrica da fornire. Il convertitore è del tipo DC-AC, poichè in ingresso si ha l'uscita delle batterie in corrente continua e all'uscita si ha il motore elettrico trifase, alimentato da corrente alternata. I dati di targa sono riportati in tabella(5.8):

Tabella 5.8. Dati di targa dell'inverter DC/AC([17])

grandezza	Dati di targa
potenza nominale	200 kW
corrente nominale	380 A
tensione nominale in uscita	380-480 3 AC V
tensione nominale in ingresso	510-720 DC V
efficienza η	0,98
fattore di potenza $\cos\phi$	0,93
grado di protezione	IP20
frequenza di linea	47-63 Hz
frequenza nominale	0-300Hz

Per proseguire nel dimensionamento è necessario conoscere le richieste all'ingresso del convertitore per poter scegliere il numero di batterie adeguate. I risultati ottenuti si riportano in tabella(5.9), mentre la procedura seguita è la medesima del motore elettrico.

Tabella 5.9. Calcoli relativi all'inverter

grandezza	valore	unità di misura
tensione in uscita dall'inverter V	400	V
potenza erogata	173,63	kW
corrente erogata	250,62	A
fattore di modulazione m	0,8	-
tensione di alimentazione inverter V	577,7	V
potenza assorbita	177,18 kW	kW
corrente assorbita	190,40	A

Gli inverter forniscono una tensione in ingresso non perfettamente sinusoidale, e per tale ragione si usa la tecnica del pulse width modulation (PWM) in modo da modularne i valori a seconda del duty-cycle utilizzato. Il fattore di modulazione m è un valore compreso tra 0 e 1, e se si ricorre alla formula successiva si ottiene la tensione in ingresso V_{dc} :

$$V_{dc} = \frac{V_{out}}{0.612 * \sqrt{2} * m} \quad (5.33)$$

Considerando un fattore di modulazione massimo $m=0,8$; come consigliato da catalogo, si ottiene un valore di tensione $V_{dc}=577,7$ V all'ingresso dell'inverter. Inoltre la potenza che fornirà al motore sarà dell'80 %. In figura 5.13 si riporta il convertitore VSI utilizzato



Figura 5.11. Inverter VSI preso dal catalogo SINAMICS DRIVES, SIEMENS([17])

L'inverter è costituito da diodi IGBT, nei quali scorre corrente positiva in quelli superiori, e corrente negativa in quelli antiparalleli(??).

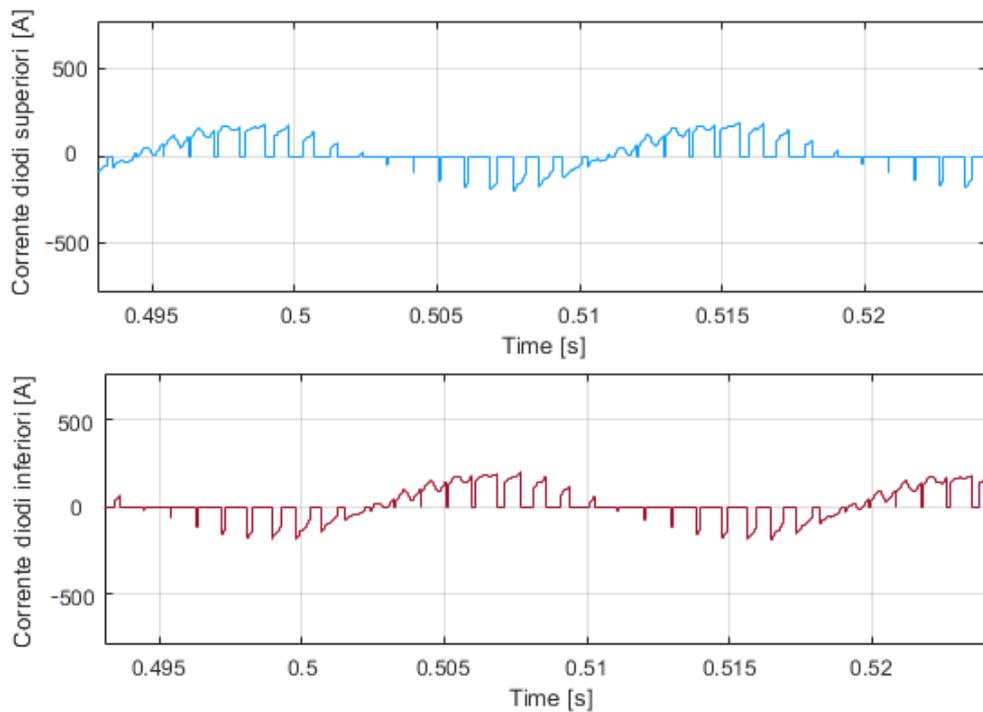


Figura 5.12. Corrente nei diodi IGBT dell'inverter

5.1.7 Batterie agli ioni litio

Per alimentare l'inverter si ricorre ad un gruppo di batterie disposte in parallelo. Le batterie sono state dimensionate per soddisfare in prima analisi la tensione all'ingresso dell'inverter, poi successivamente si esegue un'ulteriore conferma per assicurarsi che queste siano adeguate alla richiesta di potenza dello stesso. Per generare una tensione adeguata di 577 V è sufficiente una batteria da 600 V. La batteria deve essere in grado di conferire alla nave un'autonomia di 16h(??), e a tal proposito, se si fa riferimento ad un'energia utilizzabile pari al 70 %, bisogna prevedere la presenza di circa 5 batterie, per un totale di 10 per tutta la nave. Le batterie a loro volta sono ricaricate in frenata dal motore, trasformando l'energia dissipata per attrito in energia elettrica; e soprattutto dal motore Stirling in grado di erogare una potenza elettrica di 700 kW fornita dal generatore. Le batterie scelte sono della TESVOLT(5.14), e si ricaricano in poco più di 3,5 h. Le caratteristiche sono esposte in tabella(5.10):

Tabella 5.10. Dati relativi ad una singola batteria([16])

grandezza	valore	unità di misura
tensione di alimentazione V	600	V
potenza della batteria	720	kVA
energia utilizzabile	752,64	kWh
contenuto energetico massimo	768	kWh
contenuto energetico al 70%	537,6	kWh
efficienza	0,98	-
lunghezza	6	m
larghezza	2,45	m
altezza	2,9	m
volume	42,63	m^3
peso	10000	kg
tasso di carica	1C	-
tasso di scarica	3C	-

Il calcolo del numero di batterie necessarie per il soddisfacimento della tensione si ottiene dividendo la tensione in ingresso dell'inverter per quella della singola batteria:

$$n = \frac{V_{inv}}{V_{bat}} \quad (5.34)$$

Mentre per definire quelle utili al mantenimento di un'autonomia di 16 h, si divide l'energia che devono essere in grado di erogare con l'energia utilizzabile per ciascuna batteria.

$$n = \frac{E_{erog}}{E_{bat}} \quad (5.35)$$

$$E_{erog} = P_{erog} * h \quad (5.36)$$

La corrente in uscita dal gruppo batterie deve uguagliare quella in ingresso dell'inverter.

$$I_{bat} = I_{inv} \quad (5.37)$$

Invece la capacità delle batterie, si definisce come rapporto dell'energia per la tensione:

$$C = \frac{E}{V} \quad (5.38)$$

Il risultato ottenuto si moltiplica per il numero di celle in parallelo nel caso dovessero essere presenti. La durata della carica si definisce come il rapporto dell'energia posseduta dalle batterie totali e la potenza erogata dal generatore elettrico dello Stirling:

$$t_{carica} = \frac{E}{P_{S,E}} \quad (5.39)$$

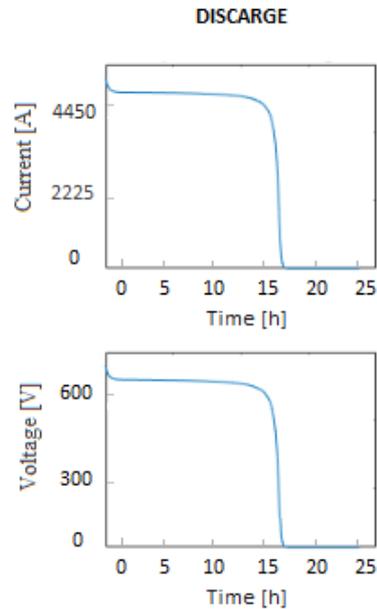


Figura 5.13. Durata della carica delle 10 batterie

La corrente massima prelevabile dalla batteria é correlata al tasso di scarica. Nel caso il tasso di scarica fosse 3C, si moltiplica 3 per la capacità delle batterie. Si esegue nel seguito la verifica che la corrente massima prelevabile sia maggiore o al massimo uguale a quella prelevata dall'inverter. Per determinare invece, la corrente di carica, si moltiplica la capacità delle batterie per il tasso di carica. In tabella(5.11) si riportano i risultati ottenuti per il gruppo batterie.

Tabella 5.11. Calcoli relativi al gruppo batterie

grandezza	valore	unità di misura
tensione da soddisfare	577,7	V
energia erogata per 16 h di autonomia	2834,86	kWh
numero batterie	5	-
celle in serie	0	-
celle in parallelo	5	-
capacità batterie	4480	kWh
corrente fornita	152,32	A
tasso di scarica	3C	-
corrente max prelevabile	13440	A
durata carica	3,84	h
tasso di carica	1C	-
corrente di carica	4480	A



Figura 5.14. Batteria agli ioni litio presa dal catalogo TESVOLT([16])

5.1.8 Motore Stirling

Per ricaricare le 10 batterie totali della nave, si ricorre ad un motore Stirling per ciascun gruppo formato da 5 batterie, in virtù della potenza elettrica prodotta dal generatore elettrico finale del motore, pari a 700 kW. Il motore Stirling rappresenta una soluzione alternativa per la ricarica del blocco batterie, grazie all'elevata efficienza, flessibilità e possibilità di alimentazione da parte di bio-combustibili. Il motore scelto (figura 5.15) ha le caratteristiche riportate in tabella (5.12):

Tabella 5.12. Dati relativi al motore Stirling([39])

grandezza	valore	unità di misura
Lunghezza	5,9	m
Altezza	5	m
Temperatura scambiatore caldo	260	°C
Temperatura scambiatore freddo	40	°C
Potenza termica in ingresso	2500	kW
Potenza elettrica	700	kW
Efficienza elettrica	0,28	-

L'efficienza elettrica del motore risulta essere del 28 %, definita come il rapporto tra potenza elettrica e potenza termica in ingresso:

$$\eta_e = \frac{P_{elet}}{P_{ter}} \quad (5.40)$$

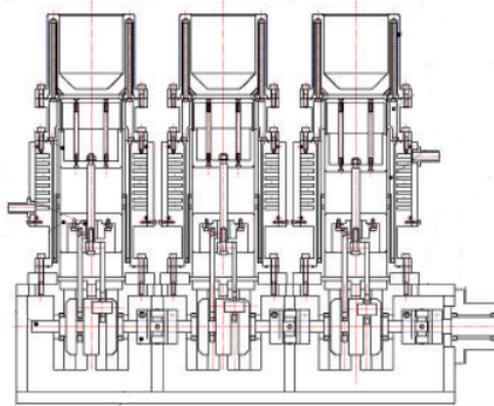


Figura 5.15. Schematic View of the Prototype Stirling Engine([39])

Prima che le batterie siano completamente scariche, il motore si deve attivare intorno alle 12,5 h di viaggio della nave e caricarle in circa 3,5 h(?), in maniera da poter far proseguire la nave senza che rimanga ferma in mare aperto.

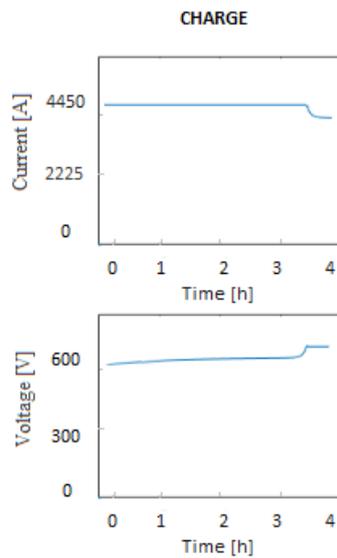


Figura 5.16. Tempo di ricarica delle batterie

Per una nave é importante definire la potenza adibita alle manovre di attracco. Questa potenza risulta inferiore rispetto alla potenza di propulsione principale. Per eseguire una manovra nel momento di avvicinamento al porto si deve dapprima definire il momento torcente come segue([32]):

$$Mt = Fv * A * Sl * 0,8 \quad (5.41)$$

- Fv forza del vento massima;
- Sl superficie laterale esposta al vento;
- A distanza dal punto di applicazione della forza del vento al centro di rotazione posto a poppa;
- 0,8 é un coefficiente di correzione utilizzato nel caso in cui la superficie esposta sia curva.

Dopo aver calcolato il momento torcente, si esegue il calcolo relativo alla forza di spinta che il bow thruster deve garantire nella manovra. La spinta si definisce come([32]):

$$F_{spinta} = \frac{Mt}{B} \quad (5.42)$$

B é la distanza tra il punto di applicazione del bow thruster e il centro di rotazione. La forza di spinta va moltiplicata per la velocità massima della nave durante una manovra per ottenere la potenza.

$$P_{manovra} = F_{spinta} * v_{max} \quad (5.43)$$

Nella tabella(5.13) si riportano i risultati ottenuti

Tabella 5.13. Calcoli relativi alle manovre di attracco

grandezza	valore	unità di misura
Fv	60	N
Sl	175	m^2
A	30	m
Mt	252000	Nm
B	60	m
F_{spinta}	4200	N
v_{max}	1,81	m/s
Potenza per un solo bow thruster	7,583	kW
Potenza per 2 bow thruster	15,166	kW

In figura si riporta uno schema utile per la comprensione delle grandezze utilizzate per il calcolo della potenza di manovra(figura 5.17)

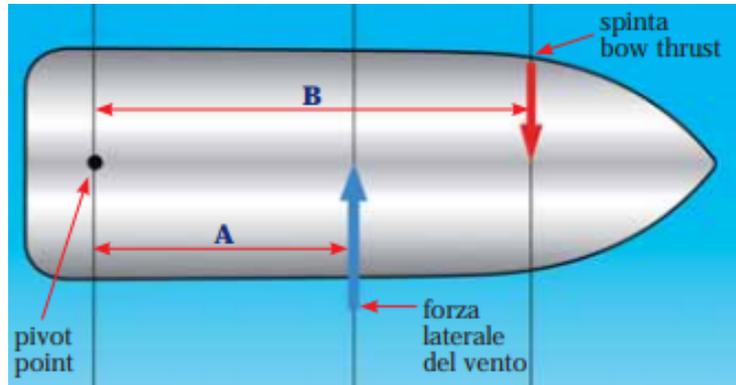


Figura 5.17. Schema per il calcolo della potenza di manovra([32])

5.2 Dimensionamento del sistema tradizionale

La propulsione tradizionale solitamente é costituita da due eliche.Ciascuna elica é posizionata su un proprio asse, movimentata da due motori diesel, collegati ad un riduttore con una sola uscita e due ingressi(5.18).La propulsione principale é affidata ai motori diesel. In questa applicazione si useranno due eliche e il sistema sar  così costituito:

1. due eliche principali;
2. due eliche di manovra;
3. due assi porta-elica;
4. due riduttori con due ingressi e una sola uscita sull'asse;
5. 4 diesel per la propulsione;
6. due giunti di collegamento.

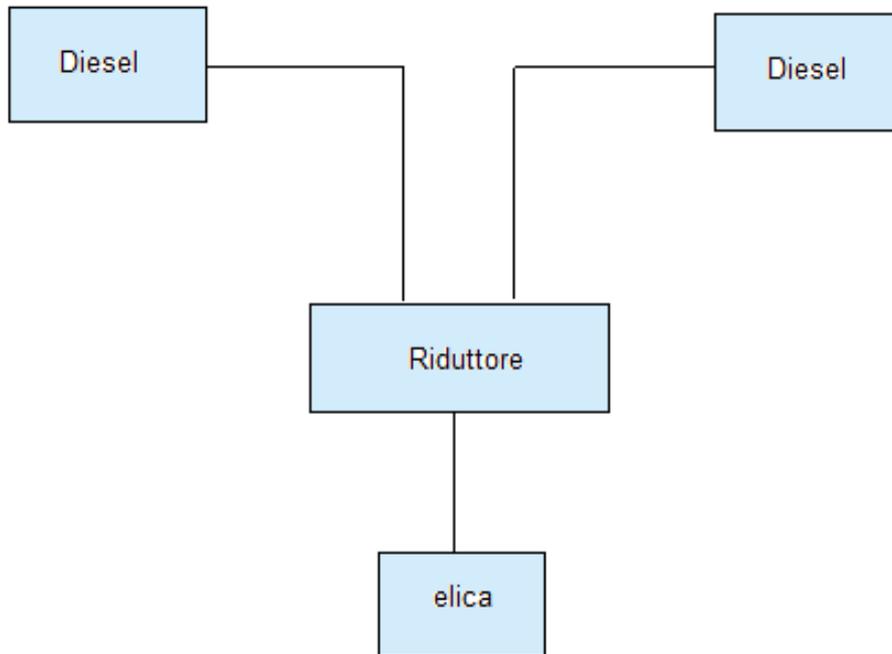


Figura 5.18. Schema per il calcolo del sistema tradizionale

Si preferisce utilizzare il motore diesel anziché una turbina a vapore perché genera elevate coppie e potenze in termini di prestazioni, ha dimensioni e pesi limitati, minor consumo specifico di combustibile, anche se per contro ha un'automazione più complessa ([12]). Il motore diesel a differenza dell'impianto a vapore è più soggetto ad usura a causa del continuo movimento degli stantuffi, e per tale motivo ha bisogno di più manutenzione ([12]). Il dimensionamento è stato eseguito considerando che durante le 24 h di viaggio la nave prosegue sempre con la massima velocità (e alla massima potenza). Si segue la procedura successiva:

- Dapprima si è considerata la potenza assorbita dall'asse porta-elica, calcolata in precedenza nel dimensionamento del sistema elettrico.
- Successivamente si è scelto un riduttore che potesse fornire la potenza all'asse

$$P_{rid} = P_{asse} \quad (5.44)$$

- Infine si sono scelti due motori diesel con una velocità che possa rispettare il rapporto di riduzione e che possano dare una potenza adeguata all'asse attraverso il riduttore, considerando il rendimento meccanico del riduttore η_{mr} :

$$P_{mot} = \frac{P_{asse}}{\eta_{mr}} \quad (5.45)$$

Si é scelto un riduttore della WÄRTSILÄ, con le seguenti caratteristiche riportate in tabella(5.14):

Tabella 5.14. Dati riduttore WÄRTSILÄ([36])

grandezza	valore	unità di misura
potenza del riduttore P_{rid}	2-25000	kW
rendimento meccanico riduttore η_{mr}	0,75	-
rapporto di riduzione i	4,8	-

I risultati ottenuti si riportano in tabella(5.15):

Tabella 5.15. Calcoli relativi al sistema tradizionale

grandezza	valore	unità di misura
potenza all'asse P_{asse}	118	kW
potenza richiesta ai motori P_{mot}	157,43	kW
velocità in uscita ω_u	480	rpm
velocità in ingresso ω_i	2300	rpm

La ω_i al riduttore rappresenta la velocità angolare che deve possedere ciascuno dei due motori diesel. Si scelgono due motori Diesel marini della VM MOTORI con le seguenti caratteristiche riportate in tabella (5.16):

Tabella 5.16. Calcoli relativi al motore diesel VM MOTORI([37])

grandezza	valore	unità di misura
cilindrata	1991 cc	-
corsa	92	mm
diametro	83	mm
numero cilindri	4	-
potenza massima	84,6	kW
coppia massima	310	Nm
peso	250	Kg
consumo	23	l/h

Il motore Diesel genera una potenza massima di 95 kW nel momento in cui ruota alla velocità massima di 3000 rpm. Invece se dovesse ruotare a un numero di giri inferiore, produrrà una potenza diversa. In particolare, con un numero di giri di 2300 rpm, produce circa 80 kW. Conteggiando due motori e raddoppiando la potenza si riesce a garantire la potenza asse P_{asse} . Nella tabella(5.17) si riassumono le condizioni reali di utilizzo di un singolo motore Diesel:

Tabella 5.17. Calcoli relativi al sistema tradizionale

grandezza	valore	unità di misura
potenza massima di esercizio	80	kW
rendimento motore(ipotizzato)	0,28	-
potenza assorbita dal motore	285,71	kW

5.3 Confronto delle emissioni tra sistema tradizionale ed elettrico

Le emissioni inquinanti rappresentano l'insieme delle sostanze nocive espulse dalla combustione. L'obiettivo è quello di ridurre una notevole quantità, soprattutto quelle prodotte dai mezzi di trasporto, perché incidono sulla salute umana provocando tumori e malattie cardiorespiratorie. I cambiamenti climatici, quali il buco dell'ozono, il surriscaldamento terrestre, le piogge acide e altre problematiche ambientali sono dovute alle emissioni. A tal proposito sono emesse delle normative che si propongono di limitare e ridurre le quantità, per sovvertire alle condizioni attuali.

In questo capitolo si mostrerà la quantità di emissioni (espresse in funzione del potere calorifico del combustibile g/GJ) emesse dal sistema di propulsione navale tradizionale che prevede la presenza di 4 diesel totali, e la notevole riduzione che ne comporta il sistema elettrico con l'uso di due Stirling adibiti alla ricarica delle batterie(5.19).

Prima di procedere con i calcoli si considerano due ipotesi:

- si alimentano i motori Diesel e Stirling con lo stesso tipo di combustibile, ovvero gasolio;
- si considera un funzionamento della nave con la massima potenza e massimo carico per 24 h di viaggio;

Secondo A.Fiumara, gli impianti che assumono una potenza superiore a 200 kW producono queste quantità di inquinanti principali, dopo aver condotto prove in laboratorio(tabella(5.18))([20]):

Tabella 5.18. Emissioni principali per impianti superiori a 200 kW di potenza([20])

emissioni	valore	unità di misura
Polveri	0,14	g/GJ
PM(particolato)	0,14	g/GJ
NOx(ossidi di azoto)	51,40	g/GJ
CO(monossido di carbonio)	2,00	g/GJ
CO2(anidride carbonica)	71,84	kg/GJ
SO2(anidride solforosa)	39,35	g/GJ
COT(carbonio organico totale)	0,26	g/GJ

Dapprima si calcolano le masse dei combustibili sulle ore di funzionamento di ciascun motore, in seguito si moltiplicano queste ultime per il potere calorifico inferiore del gasolio espresso in kJ/kg. Questi risultati, infine vanno poi moltiplicati per i g/GJ di emissioni inquinanti. Il potere calorifico del gasolio è di circa 10200 kcal/kg. Per quanto riguarda il sistema tradizionale, si conosce il consumo specifico di combustibile (sfoc) pari a 210 g/kWh per ciascuno dei 4 motori Diesel, invece per i due motori Stirling del sistema elettrico si conosce la potenza assorbita in ingresso, dalla quale si definisce la quantità di combustibile necessaria per l'alimentazione, una volta definito il PCI del gasolio:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{H_i} \quad (5.46)$$

I gas combustibili si definiscono come somma di una portata di aria e di combustibile in ingresso. La quantità di aria si calcola attraverso la portata α :

$$\alpha = \frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}} \quad (5.47)$$

In tabella(5.19) si riportano i risultati ottenuti per la definizione dei gas combustibili totali

Tabella 5.19. Risultati ottenuti

Sistema tradizionale		Sistema elettrico	
Grandezze	Valore	Grandezze	Valore
numero di motori Diesel	4	numero di motori Stirling	2
ore di funzionamento	24 h	ore di funzionamento	3,83 h
potenza erogata	314,85 kW	potenza erogata	1400 kW
potenza assorbita	1142,85 kW	potenza assorbita	5000 kW
massa di combustibile	5760000 g	massa di combustibile	1619615 g
massa di aria	80640000 g	massa di aria	22674615 g
massa gas combustibili	86400000 g	massa gas combustibili	24294230 g

In tabella(5.20) si mostrano le principali emissioni inquinanti, tralasciando ad esempio i radicali liberi,alcuni composti dello zolfo e composti alogenati.

Tabella 5.20. Emissioni inquinanti principali

Sistema tradizionale		Sistema elettrico	
Tipologia di emissioni	Valore	Tipologia di emissioni	Valore
Polveri	34,42 g	Polveri	9,68 g
PM	34,42 g	PM	9,68 g
NOx	12635,1 g	NOx	3552,77 g
CO	491,64 g	CO	138,24 g
CO2	17659591,56 g	CO2	4965581 g
SO2	9672,95 g	SO2	2719,87 g
COT	63,91 g	COT	17,97 g

La riduzione delle emissioni inquinanti ottenute con il sistema elettrico rispetto al caso tradizionale é circa il 72 %. Questo rappresenta un ottimo risultato sia dal punto di vista del risparmio di combustibile, sia un vantaggio in termini di rispetto per l'ambiente e per la salute umana.

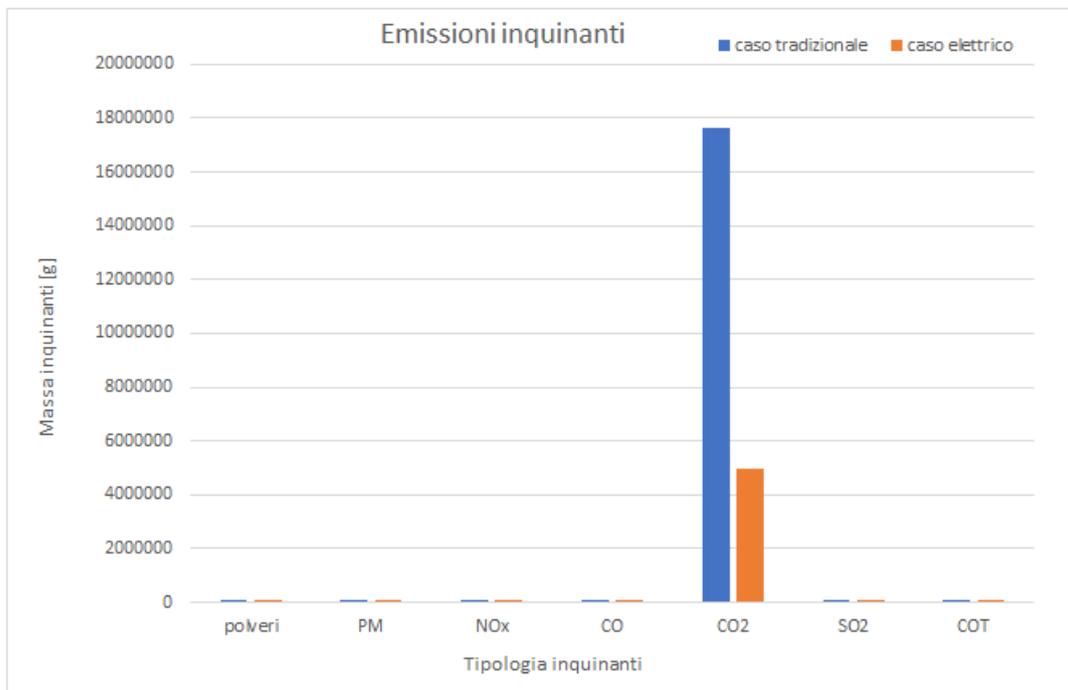


Figura 5.19. Quantità di inquinanti tra sistema elettrico e tradizionale

Dal grafico di figura(5.19) si nota che l'anidride carbonica(CO_2) é uno degli inquinanti principali della combustione. A seguire si ha una certa quantità di ossidi di azoto(NO_x) e di anidride solforosa(SO_2).Gli altri inquinanti compaiono in piccole percentuali.

Capitolo 6

Simulazione del carico richiesto dalla nave su 18 h di viaggio

Si é simulato in ultima parte un andamento delle velocità(e delle potenze) della nave trattata che rispecchiasse maggiormente la realtà, dato che difficilmente la nave percorre l'intero viaggio con la richiesta di massimo carico. Le richieste di carico dipendono dalle condizioni meteo-marine. In figura 6.1 si nota rispettivamente la variazione di velocità e della potenza durante 18 h di viaggio.

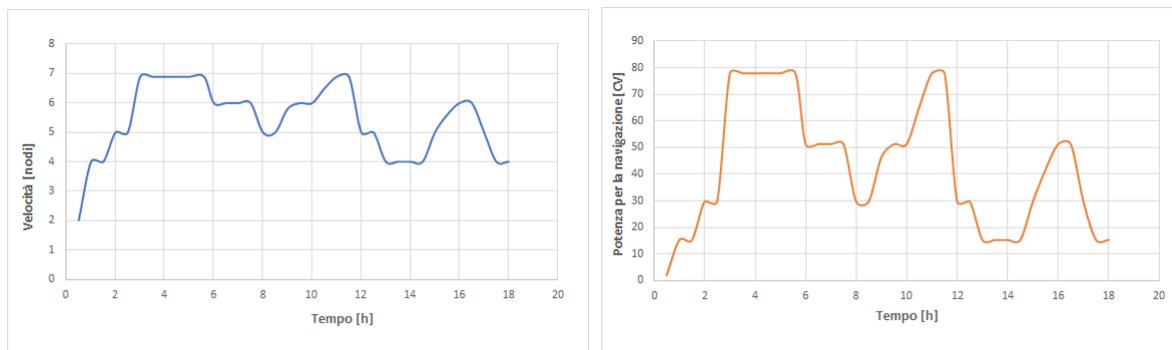


Figura 6.1. Andamento della velocità e potenza della nave

Sia per il caso elettrico che per quello tradizionale si sono adottate le stesse procedure impiegate nel dimensionamento precedente relativo alla richiesta di massimo carico da parte della nave(caso estremo) per 24 h.

Per il sistema elettrico si fa riferimento al seguente iter, considerando le richieste di potenza ogni 30 minuti:

1. si calcola la potenza richiesta dalla nave;
2. si effettua una maggiorazione del 20 %;

3. si definisce la potenza assorbita dall'elica;
4. si calcola la potenza richiesta dall'asse;
5. si calcola la potenza richiesta al motore;
6. si calcola la potenza assorbita dal motore, come l'80 % della potenza erogata dall'inverter;
7. si calcola la potenza assorbita dall'inverter;
8. si definisce l'energia totale richiesta alle batterie per 18 h di viaggio;
9. si stabilizza il tempo totale di ricarica delle batterie, alimentate dal generatore elettrico del motore Stirling.

Per il caso tradizionale si adotta la procedura successiva:

1. si parte dalla potenza richiesta dall'asse che dovrà rifornire il riduttore;
2. si determina la potenza richiesta ai motori considerando il rendimento meccanico del riduttore;
3. si calcola la potenza assorbita dai motori considerando il rendimento termodinamico.

In tabella(6.1) si riportano le potenze richieste alla batteria nel caso elettrico e tradizionale per 18 h di viaggio:

Tabella 6.1. Potenze della nave nelle 18 h di viaggio

Sistema tradizionale		Sistema elettrico	
Potenze richieste	Valore	Potenze richieste	Valore
0,5 h	31,69 kW	0,5 h	4,99kW
1 h	131,30 kW	1 h	20,68 kW
1,5 h	131,30 kW	1,5 h	20,68 kW
2 h	239,66 kW	2 h	37,76kW
2,5 h	239,66 kW	2,5 h	37,76 kW
3 h	562,24 kW	3 h	88,59 kW
3,5 h	562,24 kW	3,5 h	88,59 kW
4 h	562,24 kW	4 h	88,59 kW
4,5 h	562,24 kW	4,5 h	88,59 kW
5 h	562,24 kW	5 h	88,59 kW
5,5 h	562,24 kW	5,5 h	88,59 kW
6 h	377,34 kW	6 h	59,45 kW
6,5 h	377,34 kW	6,5 h	59,45 kW
7 h	377,34 kW	7 h	59,45 kW
7,5 h	377,34 kW	7,5 h	59,45 kW
8 h	239,67 kW	8 h	37,76 kW
8,5 h	239,67 kW	8,5 h	37,76 kW
9 h	363,55 kW	9 h	57,28 kW
9,5 h	377,34 kW	9,5 h	59,45 kW
10 h	377,34 kW	10 h	59,45 kW
10,5 h	483,19 kW	10,5 h	76,16 kW
11 h	562,24 kW	11 h	88,59 kW
11,5 h	562,24 kW	11,5 h	88,59 kW
12 h	131,30 kW	12 h	20,68 kW
12,5 h	131,30 kW	12,5 h	20,68 kW
13 h	131,30 kW	13 h	20,68 kW
13,5 h	131,30 kW	13,5 h	20,68 kW
14 h	131,30 kW	14 h	20,68 kW
14,5 h	131,30 kW	14,5 h	20,68 kW
15 h	131,30 kW	15,5 h	20,68 kW
15,5 h	350,15 kW	16 h	55,17 kW
16 h	377,34 kW	16,5 h	59,45 kW
16,5 h	377,34 kW	17 h	59,45 kW
17 h	131,30 kW	17,5 h	20,68 kW
17,5 h	131,30 kW	18 h	20,68 kW
18 h	131,30 kW	18,5 h	20,68 kW

I calcoli effettuati riguardano una sola elica, quindi se si dovessero considerare entrambe le eliche bisognerebbe raddoppiare i valori. Nel caso elettrico l'energia

richiesta da una sola elica durante le 18 h di viaggio é di circa il 66 %rispetto al totale complessivo posseduto dalle 5 batterie, di conseguenza si ricaricano grazie al supporto dello Stirling dopo circa 2,5 h. Invece nel sistema tradizionale i motori Diesel dovranno fornire una potenza di 3158,27 kW; ed assorbire 11279,53 kW. Sulla base di questi dati si calcolano le emissioni inquinanti prodotte. In tabella(6.2) si riportano i risultati ottenuti per la definizione dei gas combusti totali

Tabella 6.2. Risultati ottenuti

Sistema tradizionale		Sistema elettrico	
Grandezze	Valore	Grandezze	Valore
numero di motori Diesel	4	numero di motori Stirling	2
ore di funzionamento	18 h	ore di funzionamento	2,5 h
potenza erogata	6316,54 kW	potenza erogata	1400 kW
potenza assorbita	22559 kW	potenza assorbita	5000 kW
massa di combustibile	97455182,52 g	massa di combustibile	1070849 g
massa di aria	1364372555 g	massa di aria	14991882 g
massa gas combusti	1461827738 g	massa gas combusti	16062731 g

In tabella(6.3) si mostrano le principali emissioni inquinanti, tralasciando ad esempio i radicali liberi,alcuni composti dello zolfo e composti alogenati.

Tabella 6.3. Emissioni inquinanti principali

Sistema tradizionale		Sistema elettrico	
Tipologia di emissioni	Valore	Tipologia di emissioni	Valore
Polveri	582,27 g	Polveri	6,39 g
PM	582,27 g	PM	6,39 g
NOx	213776,47 g	NOx	2349,00 g
CO	8318,15 g	CO	91,40 g
CO2	298787972 g	CO2	3283116,52 g
SO2	163659,61 g	SO2	1798,31 g
COT	1081,35 g	COT	11,88 g

La riduzione delle emissioni inquinanti ottenute con il sistema elettrico rispetto al caso tradizionale é circa il 98 %(figura 6.2).

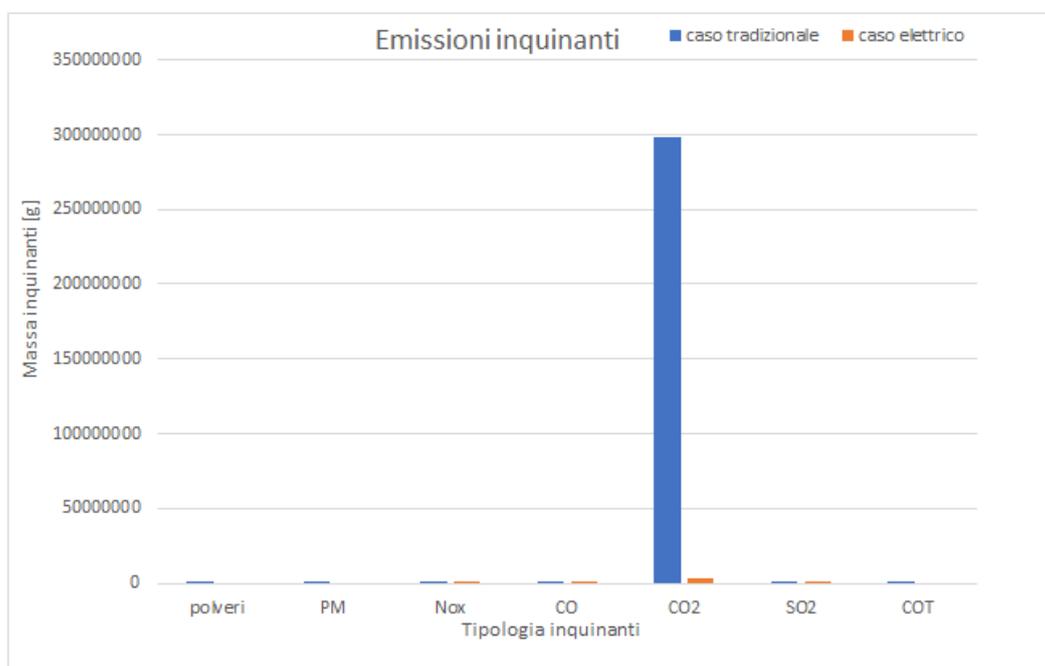


Figura 6.2. Quantità di inquinanti tra sistema elettrico e tradizionale

Capitolo 7

Impianti di bordo

A bordo di ogni nave sono presenti impianti di vario tipo adibiti a diverse funzioni. Di seguito si tratterà nello specifico l'impianto ad osmosi inversa, per acque reflue, di sentina, impianto luci e per finire quello di condizionamento e trattamento aria.

7.1 Impianto ad osmosi inversa

In ogni nave é presente un impianto che permette di trasformare l'acqua salata in acqua potabile attraverso dei dissalatori, in modo che questa possa essere utilizzata sia per i marinai a bordo che per le apparecchiature e altri servizi. I dissalatori consentono di intrappolare una ingente quantità di sali presenti e produrre acqua potabile dopo opportuni processi di purificazione chimica, fino ad ottenere un limite oltre il quale l'acqua non può essere ritenuta tale, ovvero di 500 p.p.m.. In figura(7.1) si riporta l'impianto presente nell'Unità Classe MINERVA, formato dai seguenti componenti:

- all'ingresso é presente una pompa di bassa pressione che preleva l'acqua di mare([29]);
- fitro sabbia-antracite opportunamente stratificato all'interno per eseguire le varie fasi di depurazione. L'antracite serve a depositare la grana più grossa, la sabbia invece intrappola le impurità più sottili([29]);
- filtro disoleatore e filtro da $5\mu m$ per purificare ulteriormente l'acqua([29]);
- pompa di alta pressione che spinge l'acqua di mare nei moduli a membrana del dissalatore([29]);
- dissalatore ad osmosi inversa con tre membrane di materiale poliammidico([29]);
- filtro a carbone attivo posto a valle del dissalatore per neutralizzare gli odori([29]);

- addolcitore finale per la correzione del PH dell'acqua prima di essere inviata all'utenze varie([29]);
- un impianto di sterilizzazione attraverso una soluzione di ipoclorito di sodio prelevato da un serbatoio e inviato attraverso degli eiettori([29]);
- un impianto di soluzione antincrostante che permette di inviare la soluzione sia prima della pompa di bassa pressione che dei filtri attraverso un eiettore([29]);
- serbatoio contenente una soluzione per il lavaggio chimico da inviare ai moduli del dissaltore attraverso la pompa di alta pressione([29]).

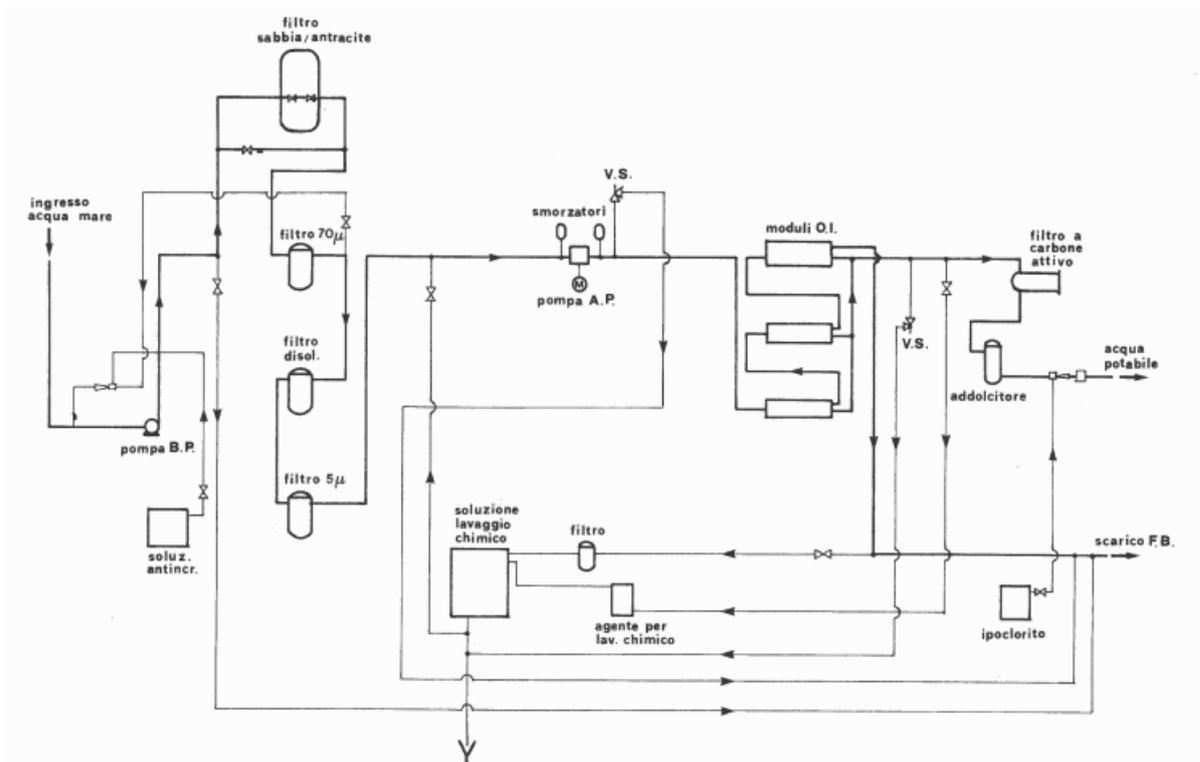


Figura 7.1. Schema circuitale dell'impianto ad O.I. di Nave Minerva([29])

In questa applicazione si sono considerati $20 m^3$ di acqua al giorno, corrispondenti ad $833 l/h$ su un equipaggio di 20 persone. Il dimensionamento dei componenti dell'impianto viene eseguito sulla base dell'ultimo dato. Dapprima si é scelta la pompa di bassa pressione dal catalogo ALBIN PUMP AB per prelevare l'acqua dal mare ad una pressione massima di 4 bar. In tabella(7.1) si riportano le caratteristiche principali della pompa([43]):

Tabella 7.1. Caratteristiche principali della pompa di bassa pressione

grandezza	valore	unità di misura
portata	1-900	l/h
pressione	0-4	bar
potenza	0,12-0,25	W

Successivamente si é scelto un sistema di filtraggio dal catalogo CULLIGAN (figura7.2) con una portata massima di $1 m^3/h$. In tabella(7.2) si riportano le principali caratteristiche([18]):

Tabella 7.2. Caratteristiche principali del sistema di filtraggio

grandezza	valore	unità di misura
portata massima di servizio	1	m^3/h
lunghezza	330	mm
altezza	980	mm
peso	90	kg

I filtri sono controllati da valvole a diaframma regolate da una valvola pilota che riceve informazioni da un sistema elettronico, adibito per l'alternanza delle fasi di filtraggio e fasi di servizio.



Figura 7.2. Sistema di filtraggio([18])

Il dissalatore(figura 7.3) scelto dallo stesso catalogo ha delle membrane semipermeabili che consentono di scindere l'acqua dalle sostanze organiche in essa presenti.L'acqua entra in questo dissalatore grazie alla pressione esercitata dalla pompa di alta pressione e successivamente si procede con la depurazione. La pressione operativa si aggira intorno a 14-18 bar, con temperatura dell'acqua di circa $20^{\circ}C$. La

salinità dell'acqua che può essere raggiunta é di circa 500 p.p.m. Le caratteristiche principali si evidenziano in tabella(7.3)([18]):

Tabella 7.3. Caratteristiche principali del dissalatore

grandezza	valore	unità di misura
potenza installata	1,5	kW
portata nominale	800	l/h
profondità	660	mm
larghezza	500	mm
altezza	1550	mm
peso	140	kg



Figura 7.3. Dissalatore con pompa di alta pressione([18])

Prima che l'acqua giunga nelle varie utenze viene neutralizzata attraverso degli addolcitori. L'addolcitore scelto dal medesimo catalogo(figura7.4), può raggiungere una portata massima di servizio di $18 \text{ m}^3/h$, nel caso fosse necessaria una quantità di acqua superiore per una qualunque eventualità. Il peso di questo componente é di 495 kg.



Figura 7.4. Addolcitore per la neutralizzazione dell'acqua potabile([18])

La potenza totale di questo impianto é di circa 2 kW.

7.2 Impianto di trattamento acque reflue

L'impianto é convenzionato per la depurazione di acque provenienti dagli scarichi di attività domestiche. Le acque reflue vengono sottoposte inizialmente ad una depurazione meccanica per dissociare i residui solidi da quelli liquidi; quindi si attiva un rotore a biodischi che si occupa di ossidare il putridume con un processo biologico, seguito da una sedimentazione e da una clorazione che elimina i batteri coliformi; alla fine del trattamento il liquido purificato può essere scaricato fuori dalla nave, e la poltiglia rimasta può essere posizionata nella cassa di raccolta, per poi essere gettata in mare o in un impianto di terra([29]).

In un primo stadio i liquami entrano in un separatore meccanico che intrattiene le particelle di una ben precisa dimensione grazie alla presenza di una griglia costituita da fori con un diametro inferiore alla grandezza delle particelle che riesce ad intrattenere. Successivamente un motore elettrico aziona un rotore a biodischi che ruotando invia ossigeno sufficiente per generare una pellicola di microrganismi sui vari dischi; tale pellicola si rompe nell'impatto dei liquami con i dischi stessi([29]). I fanghi che si depositano sul fondo sono aspirati da una pompa e posizionati in un serbatoio che deve essere svuotato periodicamente. Nel secondo stadio si procede con il lavaggio della poltiglia proveniente dalla fase di ossidazione, che decade in maniera molto rapida a causa dell'elevato peso specifico; mentre nell'ultima fase una pompa canalizza opportunamente la soluzione di ipoclorito di sodio nel flusso

residuo per neutralizzare i batteri presenti, per poi scaricare l'effluente fuori bordo, nel rispetto delle normative([29]). Uno schema si riporta nella figura 7.5

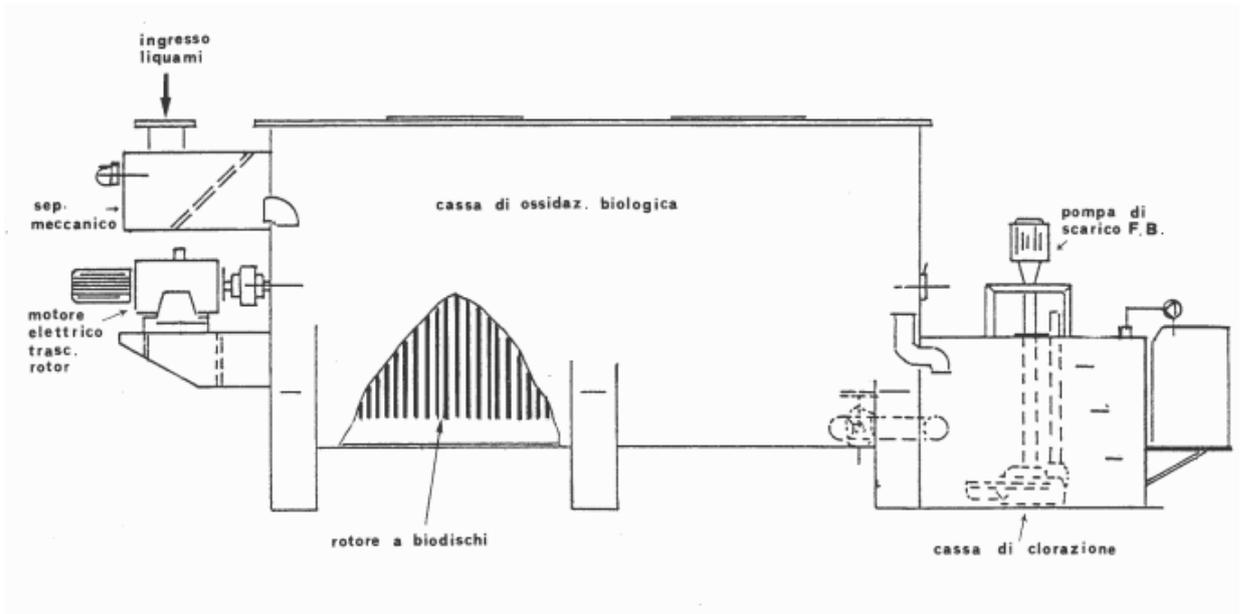


Figura 7.5. Impianto depuratore BIODISK FVN([29])

Per questa applicazione si é scelto un impianto che é in grado di trattare le acque reflue di un equipaggio che va da 10 ad un massimo di 440 persone. L'impianto ha le seguenti caratteristiche, come si nota dalla tabella(7.4)([42]):

Tabella 7.4. Caratteristiche dell'impianto di trattamento acque reflue

grandezza	valore	unità di misura
carico trattato(media)	840-30800	L/d
consumo energetico	2,25-11	kW
peso a secco	900-4200	kg

La potenza massima che questo impianto richiede é di 11 kW(figura 7.6).



Figura 7.6. Impianto di trattamento acque reflue([42])

7.3 Impianto di trattamento acque di sentina

Il petrolio e altre sostanze simili chimicamente, hanno la capacità di produrre dispersioni propense a diminuire l'energia posseduta per ravvicinare le gocce disperse, eliminando la zona di interposizione presente tra esse; inoltre la forza di gravità interviene per far accrescere le dimensioni di queste piccole quantità, a causa dei moti di salita o discesa dovuti alla diversa densità posseduta.

Le emulsioni, invece, sono miscele che tendono a essere durature nel tempo e difficilmente si separano, anche per la presenza di moti Browniani, che fortemente ne ostacolano il movimento, di conseguenza solamente delle forze di tipo meccanico come ad esempio la presenza di vibrazioni o di turbolenza, o il ricorso ad un emulsionante, che si adsorbe sulle gocce d'olio, ne ostacolerebbe l'unione([29]). Per la nave mercantile si è scelto un impianto(figura 7.7) che contiene un primo stadio separatore a piani coalescenti in cui vi arriva l'acqua oleosa prelevata dalla sentina attraverso una pompa. I piani coalescenti sono posizionati in camere rettangolari suddivise da un tubo verticale che porta le sostanze oleose in un duomo separatore posto sul coperchio dello stesso stadio. Invece l'acqua contenente i residui oleosi una volta decelerata cade sui piani coalescenti, e qui le particelle oleose di un certo diametro rimangono incollate al materiale oleofilo dei piani. L'olio raccolto dai piani viene direzionato verso il duomo. Il trattamento dell'acqua procede verso il secondo stadio di polishing, costituito da un serbatoio e da un duomo in superficie

adibito all'ulteriore raccolta di olio rimasto. Successivamente l'olio dal duomo viene riportato verso la pompa di aspirazione, mentre l'acqua depurata viene scaricata.



Figura 7.7. Impianto di trattamento acque di sentina([41])

Lo scarico dell'olio dal duomo viene gestito da una centralina elettronica, elettrovalvole specifiche e sonde poste sulla testata del duomo.

Le caratteristiche dell'impianto scelto si riportano in tabella(7.5)([41]):

Tabella 7.5. Caratteristiche dell'impianto di trattamento acque di sentina

grandezza	valore	unità di misura
portata nominale	0,25-5	m^3/h
potenza pompa	0,37-2,20	kW
peso	400-4500	kg

7.4 Impianto luci

Le luci sono indispensabili in una nave sia per illuminare gli alloggi interni, sia le merci all'esterno soprattutto nelle navi cargo. La nave deve disporre di fanali adeguati sia per la tipologia sia per le dimensioni, per evitare incidenti tra navi in giornate cupe e in assenza di luce. Per quanto riguarda i fanali di navigazione si

distinguono in fanali di via e quelli speciali(figura 7.8). I fanali di via sono quelli principali:

- fanale di testa d'albero(prua), di colore bianco, con visibilità fino a 225° ([30]);
- fanale laterale di dritta, di colore verde, con visibilità fino a $112,5^\circ$ ([30]);
- fanale laterale di sinistra, di colore rosso, con visibilità fino a $112,5^\circ$ ([30]);
- fanale di coronamento(a poppa), di colore bianco, con visibilità fino a 135° ([30]).

I fanali speciali servono per situazioni particolari di lavoro o di manovra per non collidere con altre imbarcazioni([30]):

- fanale di rimorchio, di colore giallo, con visibilità fino a 135° , utilizzato nelle attività di rimorchio([30]);
- fanale di fonda, di colore bianco, visibile a 360° , utilizzato dalle navi all'ancora([30]);
- fanali di colori rosso, verde e bianco, visibili a 360° utilizzati in circostanze specifiche([30]).

La nave é in grado di contenere un certo numero di container. Ognuno di questi é illuminato da una serie di luci utili al controllo delle stesse merci durante la navigazione. In media si considerano 3-4 luci per container.



Figura 7.8. Fanali di navigazione([21])

La potenza totale delle luci riportate in figura 7.8 ammonta a 3.2 kW, mentre la tensione é di 12/24 V.

7.5 Impianto di climatizzazione e di trattamento dell'aria

A bordo nave deve esserci una caldaia convenzionata al trattamento dell'acqua calda sanitaria sia nel caso estivo che invernale, a fornire la potenza necessaria alla batteria di pre-riscaldamento nell'UTA, e per soddisfare il carico termico invernale attraverso dei radiatori, convettori o aerotermi. Si deve prevedere inoltre, anche una centrale frigorifera per garantire la potenza alla batteria di raffreddamento e deumidificazione, e per sopperire alla potenza dispersa attraverso le strutture opache e delle finestre durante il periodo estivo.

Dapprima si è stabilito il carico invernale ed estivo della nave sulla base del quale è stato effettuato il dimensionamento. In seguito per completare la progettazione si è scelta una caldaia e una centrale termo-frigorigena. In corrispondenza dei componenti adibiti alla termoregolazione, si è inserito un impianto di trattamento dell'aria, definito UTA, per soddisfare il rinnovo dell'aria e per apportare aria salutare conforme alle normative. L'estrazione dell'aria è effettuata da degli estrattori predefiniti secondo un opportuno criterio. I dati di progetto iniziali si riportano nella tabella(7.6):

Tabella 7.6. Dati di progetto iniziali

grandezza	valore	unità di misura
temperatura esterna estate	32	°C
temperatura esterna inverno	0	°C
temperatura acqua di mare estate	32	°C
temperatura acqua di mare inverno	0	°C
umidità esterna	90	%
umidità interna inverno	50	%
umidità interna estate	50	%
temperatura interna inverno	23	°C
temperatura interna estate	26	°C

Il materiale più frequentemente usato nella costruzione delle navi è acciaio inox. Si decide di fare una coibentazione non solo degli interni ma anche degli esterni, in modo che se si trasportassero viveri si possano conservare al meglio senza ulteriore spesa di energia per il raffreddamento degli stessi. La coibentazione si effettua con una vernice termoisolante che assume le seguenti caratteristiche(tabella(7.7)):

Tabella 7.7. Dati relativi alla coibentazione

grandezza	valore	unità di misura
spessore coibentazione	0,008	m
conducibilità termica	0,022	$W/(mK)$

Per i carichi termici invernali della nave, si conteggiano i diversi contributi:

- Potenza termica scambiata attraverso le superfici laterali a contatto con l'aria e acqua;
- Potenza termica scambiata attraverso la superficie superiore a contatto con l'aria;
- Potenza termica scambiata attraverso la superficie inferiore a contatto con il mare;

Per la potenza termica dispersa si fa riferimento alla seguente formula:

$$P_{ter} = U * A * \Delta T \quad (7.1)$$

- U é la trasmittanza;
- A é la superficie ;
- ΔT é la differenza di temperatura esistente tra interno e esterno.

La trasmittanza si esprime come:

$$U = \left(\frac{1}{hi} + \Sigma \left(\frac{s}{\lambda} \right) + \frac{1}{he} \right)^{-1} \quad (7.2)$$

Dove

- λ é la conducibilità [$W/(mK)$];
- s é lo spessore [m];
- hi e he sono rispettivamente i coefficienti convettivi interni ed esterni [$W/(m^2K)$].

Alla potenza termica dispersa si sottraggono i contributi relativi all'apporto di calore dovuto all'illuminazione, apparecchiature e persone, che nel caso invernale é considerato positivo. Per valutare la potenza totale dispersa, si deve sommare agli altri contributi la dispersione dovuta ai ponti termici, come il 10 % della potenza totale. I calcoli si riportano nella tabella (7.8):

Tabella 7.8. Calcoli relativi al carico termico invernale

grandezza	valore	unità di misura
spessore totale nave	0,4	<i>m</i>
spessore totale(escluso l'isolante)	0,392	<i>m</i>
conducibilità termica acciaio	17	$W/(mK)$
coefficiente convettivo acciaio-aria	23	$W/(m^2K)$
coefficiente convettivo acciaio-acqua	500	$W/(m^2K)$
differenza di temperatura	23	$^{\circ}C$
superficie laterale esposta aria	361,9	m^2
superficie laterale esposta acqua	163,1	m^2
superficie superiore(o inferiore)	973	m^2
potenza termica superficiale	108219,2	<i>W</i>
ponti termici	10821,92	<i>W</i>
potenza totale	119041	<i>W</i>

Il carico termico estivo tiene conto sia delle dispersioni attraverso l'involucro, sia della radiazione attraverso le pareti vetrate;il secondo termine tiene invece conto dei carichi endogeni.Nel carico endogeno é inclusa la generazione di calore dovuta alla presenza all'interno della nave di un impianto di illuminazione, della presenza del personale e delle apparecchiature come i motori adibiti alla propulsione. Per il calcolo dei carichi estivi é stata utilizzata la stessa formula per i carichi invernali. Per i carichi endogeni esiste una normativa UNI 10349 relativa al contributo dovuto all'illuminazione, apparecchiature e persone(tabella(7.9)).

Tabella 7.9. Normativa sui carichi endogeni

grandezza	valore	unità di misura
Illuminazione	20	W/m^2
Apparecchiature	40	W/m^2
Persone	50	$W/persona$

Di seguito si riportano i risultati per i carichi estivi relativi alla nave(tabela(7.10)):

Tabella 7.10. Calcoli relativi al carico termico estivo

grandezza	valore	unità di misura
Illuminazione	19460	W
Apparecchiature	38920	W
Persone	1000	W
Potenza attraverso le strutture opache	40294,31	W
Potenza trasmessa attraverso le finestre	1208,83	W
Potenza totale	100883	W

Per quanto riguarda il carico irradiato attraverso le finestre si considera il 3 % della potenza attraverso le strutture opache, non avendo a disposizione i dati relativi al numero di finestre e alla tipologia di vetro.

Per i ricambi d'aria si fa riferimento alla normativa UNI 10339(tabella(7.11)):

Tabella 7.11. Normativa UNI 10339 sui ricambi d'aria nei locali

grandezza	valore	unità di misura
soggiorno e camera da letto	11	$l/(s * persona)$
cucine	10	$l/(s * persona)$
bagni	11	$l/(s * persona)$
stiva	9	$l/(s * persona)$

Nello specifico, per la nave saranno necessari i seguenti ricambi(tabella(7.12)):

Tabella 7.12. Ricambi d'aria nella nave secondo la normativa UNI 10339

grandezza	valore	unità di misura	valore	unità di misura
soggiorno e camera da letto	220	$l/(s)$	792	m^3/h
cucine	200	$l/(s)$	720	m^3/h
bagni	220	$l/(s)$	792	m^3/h
stiva	180	$l/(s)$	648	m^3/h

Prima di scegliere l'unità per il trattamento dell'aria sono stati sommati tutti i volumi di ricambio d'aria definiti nella tabella precedente per ottenere la portata totale di ventilazione secondo la normativa UNI 10339. I calcoli relativi al caso estivo e al caso invernale sono stati trattati separatamente. Le condizioni estive sono solitamente le più critiche, di conseguenza si è ottenuto dapprima un risultato per queste e poi si è esaminato il caso invernale per appurare che il risultato ottenuto per il caso estivo fosse adeguato anche ad esso.

7.5.1 Caso estivo

Lo scopo é quello di abbattere solo il carico latente, non quello termico. In tutti i locali della nave si introdurrà aria alla stessa temperatura di 26°C. Volendo ottenere un'umidità relativa del 50 % si calcola in primo luogo la portata di vapore che è necessario immettere con la relativa umidità specifica. Si è scelta come umidità specifica di riferimento 10,048 gvap/kgaria nelle condizioni di immissione che è risultato essere il valore massimo al fine di assicurare il controllo dell'umidità. Di seguito viene riportata la formula utilizzata:

$$x_I = x_A - \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_e} \quad (7.3)$$

Dove \dot{m}_e sarà uguale per l'inverno e per l'estate:

$$\dot{m}_e = \rho_a * \dot{V}_e \quad (7.4)$$

Con \dot{V}_e la somma della portata di ventilazione necessaria per il ricambio d'aria di tutti i locali. Invece \dot{m}_v è la portata di vapore prodotta dalle persone, trovata moltiplicando l'emissione di vapore acqueo per persona (80g/h, da normativa UNI 10339).

In tabella(7.13) si riportano i risultati ottenuti

Tabella 7.13. Normativa UNI 10339 sui ricambi d'aria nei locali

grandezza	valore	unità di misura
volume di ricambio totale \dot{V}_e	2952	m^3/h
portata di ventilazione \dot{m}_e	3616,2	kg/h
portata di vapore endogeno \dot{m}_v	1600	gv/h
portata di immissione \dot{m}_i	3616,2	kg/h

Dopo aver definito \dot{m}_i , ovvero la portata di immissione da introdurre per controllare l'umidità relativa dell'ambiente, si deve verificare che:

$$\dot{m}_i \geq \dot{m}_e \quad (7.5)$$

Questa condizione assicura la sovrappressione dell'impianto. Se é verificata si procede con il caso invernale, altrimenti si pone

$$\dot{m}_i = \dot{m}_e \quad (7.6)$$

In questo caso si può notare che $\dot{m}_i = \dot{m}_e$, di conseguenza si può procedere con il caso invernale.

7.5.2 Caso invernale

Si ripetono i calcoli effettuati per il caso estivo e si mettono a confronto le due portate per poi scegliere la portata maggiore al fine del dimensionamento dell'unità di trattamento aria. Tale portata risulta essere in entrambi i casi uguale a quella di ventilazione. Oltre al riscaldamento in inverno ci sarà la necessità di umidificare l'aria in ingresso. Sarà dunque richiesta la presenza di una batteria di preriscaldamento, di un modulo di umidificazione e di una batteria di post-riscaldamento. Al fine di ottenere la potenza assorbita da tali moduli è stata tracciata la trasformazione sul diagramma di Carrier per l'aria umida (7.9). Nelle tabelle successive si riportano le grandezze termodinamiche di ciascun punto presente nel diagramma di Carrier.

Punto E-Condizioni di aria esterne

Tabella 7.14. Punto E nel diagramma di Carrier

grandezza	valore	unità di misura
T_E	0	$^{\circ}C$
Φ_E	90	%
x_E	3,9	$gvap/Kgaria$
h_E	10	kJ/Kg

Punto B-Condizioni a valle della batteria di pre-riscaldamento

Tabella 7.15. Punto B nel diagramma di Carrier

grandezza	valore	unità di misura
T_B	20	$^{\circ}C$
Φ_B	29	%
x_B	3,9	$gvap/Kgaria$
h_B	24	kJ/Kg

Punto C-Condizioni a valle dell'umidificazione

Tabella 7.16. Punto C nel diagramma di Carrier

grandezza	valore	unità di misura
T_C	10	$^{\circ}C$
Φ_C	100	%
x_C	7,96	$gvap/Kgaria$
h_C	24	kJ/Kg

Punto I-Condizioni di immissione

Tabella 7.17. Punto I nel diagramma di Carrier

grandezza	valore	unità di misura
T_I	23	$^{\circ}C$
Φ_I	41	%
x_I	7,96	$gvap/Kgaria$
h_I	43	kJ/Kg

Punto A-Condizioni ambiente interno

Tabella 7.18. Punto A nel diagramma di Carrier

grandezza	valore	unità di misura
T_A	23	$^{\circ}C$
Φ_A	50	%
x_A	8,4	$gvap/Kgaria$

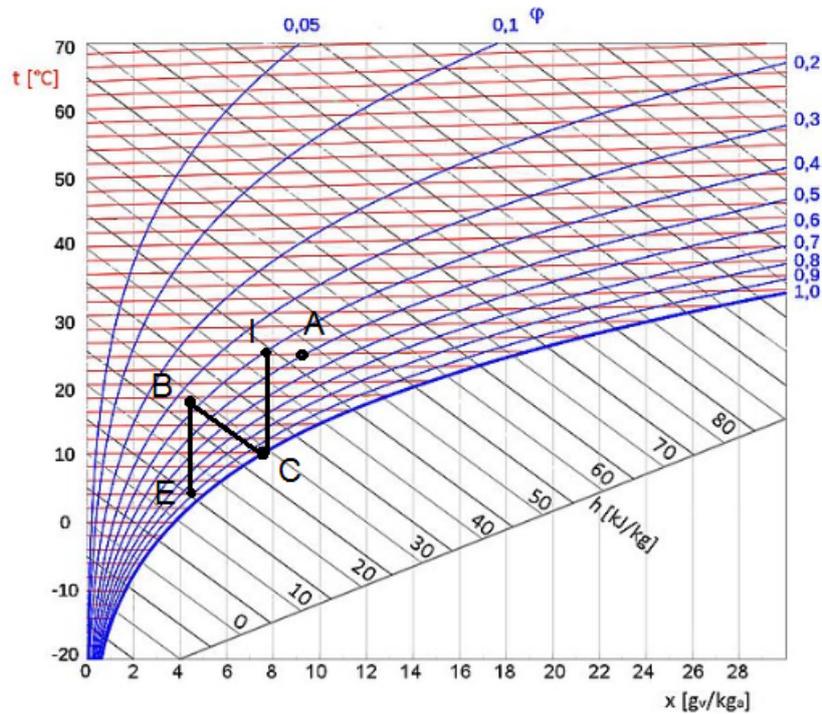


Figura 7.9. Diagramma di Carrier per il caso invernale

Per il calcolo della potenza di pre-riscaldamento e di post-riscaldamento si usano le seguenti formule:

$$Q_{pre} = \dot{m}_i * (h_B - h_E) \quad (7.7)$$

$$Q_{post} = \dot{m}_i * (h_I - h_B) \quad (7.8)$$

Invece per la portata di umidificazione si fa riferimento alla formula:

$$m_{umid} = \dot{m}_i * (x_I - x_E) \quad (7.9)$$

I risultati ottenuti per il caso invernale si riportano in tabella(7.19):

Tabella 7.19. Punto A nel diagramma di Carrier

grandezza	valore	unità di misura
potenza di pre-riscaldamento	14	<i>kW</i>
potenza di post-riscaldamento	19	<i>kW</i>
umidificazione	0,0041	<i>kgvap/s</i>

Anche nel caso invernale la portata da immettere é uguale a quella di ventilazione($\dot{m}_i = \dot{m}_e$), ovvero di 3616,2 *kg/h*.

Per quanto riguarda il caso estivo si avrà una batteria di raffreddamento, un deumidificatore e di una batteria di post riscaldamento. Di seguito si riportano i punti principali delle trasformazioni(figura 7.10)

Punto E-Condizioni di aria esterne

Tabella 7.20. Punto E nel diagramma di Carrier

grandezza	valore	unità di misura
T_E	32	$^{\circ}C$
Φ_E	90	%
x_E	25	<i>gvap/Kgaria</i>
h_E	90	<i>kJ/Kg</i>

Punto B-Condizioni a valle della batteria

Tabella 7.21. Punto B nel diagramma di Carrier

grandezza	valore	unità di misura
T_B	15	$^{\circ}C$
Φ_B	80	%
x_B	10,048	<i>gvap/Kgaria</i>
h_B	46	<i>kJ/Kg</i>

Punto I-Condizioni di immissione

Tabella 7.22. Punto I nel diagramma di Carrier

grandezza	valore	unità di misura
T_I	26	$^{\circ}C$
Φ_I	48	%
x_I	10,048	<i>gvap/Kgaria</i>
h_I	50	<i>kJ/Kg</i>

Punto A-Condizioni ambiente interno

Tabella 7.23. Punto A nel diagramma di Carrier

grandezza	valore	unità di misura
T_A	26	$^{\circ}C$
Φ_A	50	%
x_A	10,49	<i>gvap/Kgaria</i>

Per definire la potenza di raffreddamento e post-riscaldamento si usano le seguenti formule:

$$Q_{raffr} = \dot{m}_i * (h_B - h_E) \quad (7.10)$$

$$Q_{post-risc} = \dot{m}_i * (h_I - h_B) \quad (7.11)$$

In tabella(7.24) si riportano i risultati relativi alle potenze del caso estivo

Tabella 7.24. Punto A nel diagramma di Carrier

grandezza	valore	unità di misura
potenza di deumificazione e raffreddamento	-44,2	<i>kW</i>
potenza di post-riscaldamento	4	<i>kW</i>

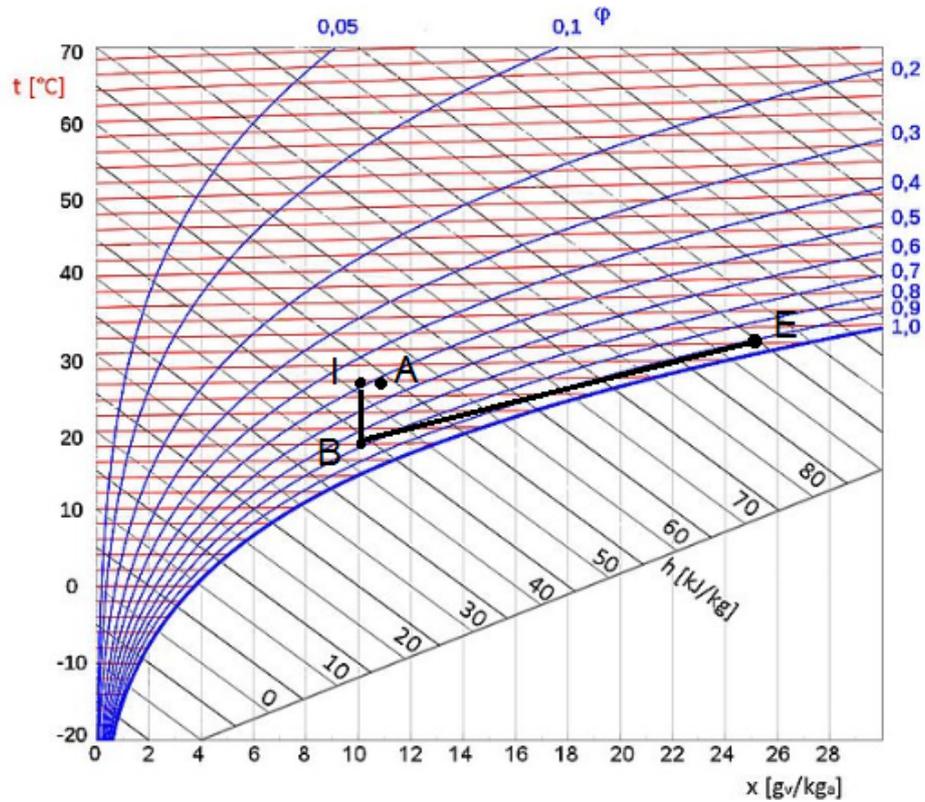


Figura 7.10. Diagramma di Carrier per il caso estivo

Dopo aver calcolato le potenze necessarie per le batterie di pre-riscaldamento nel caso invernale e raffreddamento e deumidificazione nel caso estivo si procede con la scelta di queste nel catalogo di OCEAN SABIANA. Per il post riscaldamento, invece, si è considerata la potenza maggiore tra il caso estivo e invernale (nel nostro caso è risultato maggiore quella nel caso invernale con una potenza di 19 KW), e si è scelta una batteria elettrica con una potenza di 24 KW dal catalogo di BH-QE SSR/BUS. In tabella(7.25) si riportano le caratteristiche principali([38]):

Tabella 7.25. Caratteristiche della batteria di post-riscaldamento

grandezza	valore	unità di misura
potenza	24	kW
tensione	400(trifase)	V
stadi	1:4	-
resistenze	12	-
dimensioni	450x450x800	mm

Per quanto riguarda l'UTA, si è scelto il modello 3 dal catalogo OCEAN SABIANA in modo da garantire con $3000 m^3/h$ di aria massimi erogabili, i $2952 m^3/h$ richiesti con una leggera sovrappressione. Si è scelta la configurazione 3 (figura 7.11), così definita:

- Aspirazione dell'aria dall'esterno (SFS);
- Una batteria di preriscaldamento;

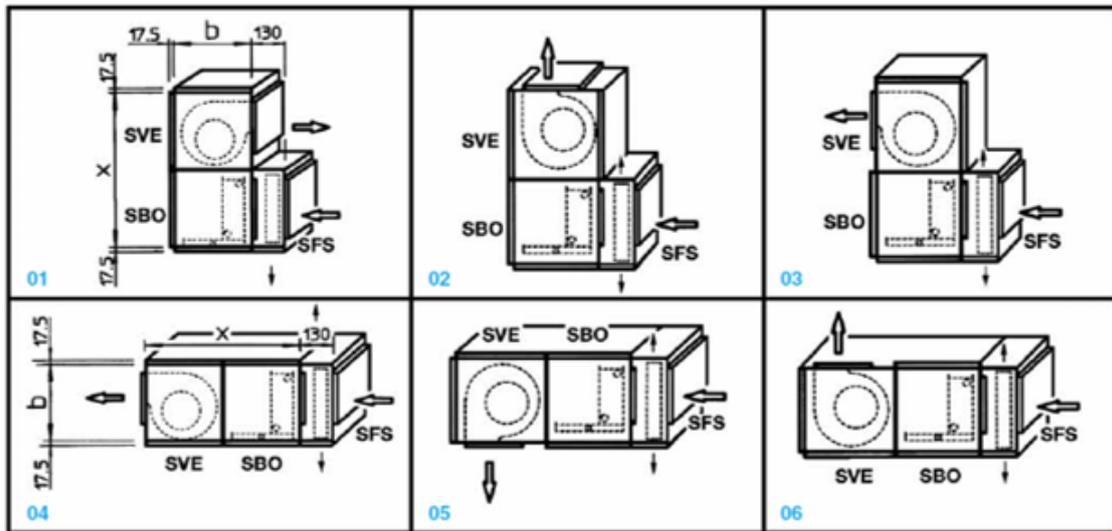


Figura 7.11. Struttura UTA ([19])

- Una batteria di raffreddamento o deumidificazione (caso estivo) o una batteria di umidificazione (caso invernale) indicata con SBO;
 - Un ventilatore per l'aspirazione dell'aria e la mandata verso la batteria elettrica di post-riscaldamento e infine verso la rete aria. (SVE);
- Per il riscaldamento si è scelta una batteria ad acqua a 3 ranghi avente come temperature in entrata e in uscita dell'acqua $50^{\circ}C$ e $45^{\circ}C$. In tabella (7.26) si riportano le caratteristiche della batteria di riscaldamento:

Tabella 7.26. Caratteristiche della batteria di riscaldamento UTA([19])

grandezza	valore	unità di misura
numero di ranghi	3	-
resa termica	16,4	<i>kW</i>
temperatura ingresso acqua	50	°C
temperatura uscita acqua	45	°C
temperatura uscita aria	20	°C

La batteria di raffreddamento ha invece un numero di ranghi pari a 6 (ovvero due coppie da tre ranghi) e lavora tra le temperature di 7°C e 12°C. In tabella(7.27) si riportano le caratteristiche della batteria di raffreddamento:

Tabella 7.27. Caratteristiche della batteria di raffreddamento UTA([19])

grandezza	valore	unità di misura
numero di ranghi	6	-
potenza termica sensibile	25	<i>kW</i>
potenza termica totale	44,6	<i>kW</i>
efficienza	0,56	°C

A bordo nave si avrà bisogno di una centrale frigorifera, presa dal catalogo AERMEC che lavori in estate sia per fornire la potenza di raffreddamento alla batteria, sia per il raffrescamento utile a compensare i carichi termici estivi. In tabella(7.28) si riportano le potenze che deve fornire la centrale frigorifera:

Tabella 7.28. Potenze centrale frigorifera

grandezza	valore	unità di misura
carichi termici estivi	100,88	<i>kW</i>
batteria di raffreddamento	44,2	<i>kW</i>
potenza totale	145,1	<i>kW</i>

La caldaia (presa dal catalogo RODI DUAL), invece, servirà a fornire acqua calda sanitaria sia in estate che in inverno, e a sopperire in inverno i carichi termici invernali e in aggiunta la potenza della batteria di pre-riscaldamento. In tabella(7.29) si portano i risultati ottenuti:

Tabella 7.29. Potenze caldaia

grandezza	valore	unità di misura
carico termico invernale	119	<i>kW</i>
batteria di pre-riscaldamento	14	<i>kW</i>
acqua calda sanitaria inverno	44,6	<i>kW</i>
acqua calda sanitaria estate	33,44	<i>kW</i>
potenza totale	177,7	<i>kW</i>

Per il calcolo della potenza necessaria a fornire l'acqua calda sanitaria (tabella (7.30)) si é considerata una temperatura di ingresso dell'acqua e di uscita pari a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ in inverno, invece nel caso estivo le temperature di ingresso e in uscita sono rispettivamente pari a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabella 7.30. Potenze acqua calda sanitaria in estate e in inverno

grandezza	valore	unità di misura
portata d'acqua	833,33	l/h
calore specifico acqua	4816	$J/(KgK)$
temperatura ingresso acqua estate	20	$^{\circ}\text{C}$
temperatura ingresso acqua inverno	10	$^{\circ}\text{C}$
temperatura uscita acqua	50	$^{\circ}\text{C}$
potenza estate	33,44	kW
potenza inverno	44,6	kW

Capitolo 8

Conclusioni

Si conclude affermando che un sistema elettrico rispetto ad uno tradizionale comporta sia maggiori ingombri a livello strutturale, sia delle problematiche di controllo elettronico e di progettazione. La sostituzione, però, porta a numerosi benefici, come si evidenzia in questo lavoro di tesi:

- autonomia della nave per molte ore di viaggio, dovuta al supporto di un sistema di batterie che viene ricaricato in circa 3,5 h dal motore Stirling nel caso in cui la nave per 24 h di viaggio dovesse richiedere la massima potenza soprattutto nell'affrontare delle condizioni meteo-marine non ottimali;
- risparmio delle emissioni inquinanti, come conseguenza di un impiego minore di combustibile, che risulta proporzionale al tempo di attivazione del motore Stirling. La percentuale di risparmio è legata alle ore di viaggio della nave e alla velocità con cui prosegue, da cui dipende il tempo di ricarica e di utilizzo del motore Stirling. La riduzione delle emissioni è un problema ad oggi molto sentito, in quanto incidono fortemente a livello ambientale e della salute umana. Per questo motivo molte organizzazioni emettono dei regolamenti con l'obiettivo di sensibilizzare soprattutto il genere umano ad adottare comportamenti che non danneggiano l'ecosistema e l'uomo stesso;
- l'impiego del motore Stirling convenzionato alla ricarica delle batterie è un'ottima scoperta poiché ha un tempo limitato di ricarica, e ha un'efficienza confrontabile e a volte superiore a quella dei motori a combustione interna. Inoltre è un motore molto versatile poiché si può alimentare con fonti energetiche rinnovabili e biocombustibili. Le vibrazioni e i rumori sono limitati, essendo un motore silenzioso rispetto a quelli Diesel e a benzina;
- facilità di eseguire manovre e movimenti più complessi.
- possibilità di poter progettare un nuovo motore Stirling che sia in parte alimentato dai fumi di scarico della caldaia per poter eliminare tutte le emissioni

di quest'ultima e ridurne altre prodotte dal motore diminuendo il combustibile all'ingresso.

Appendice A

Tecnica del Pulse Width Modulation(PWM)

Per la regolazione della velocità del motore elettrico si ricorre ad un inverter DC/AC in grado di variare il rapporto V/f , che deve mantenersi fisso. La variazione della frequenza comporta la variazione della velocità angolare del motore. L'inverter include la tecnica del Pulse Width Modulation(PWM). R. Ilardo afferma che " *il termine inglese "Pulse Width Modulation" fa riferimento ad una tecnica di regolazione della potenza elettrica, consistente nel modulare la larghezza, ovvero la durata temporale, di una serie di impulsi.* ([22])" Questo tipo di modulazione genera anche delle problematiche relative alla difficoltà di avviamento del motore con basse tensioni, e spreco di potenza e calore in caso si voglia inserire una resistenza per abbassare la potenza ([22]). La potenza che riesce a produrre il motore dipende dalla forma degli impulsi ([22]). In figura (A.1) si nota che la potenza è minima qualora la larghezza degli impulsi è stretta, invece, sarà media nel momento in cui ho degli impulsi più larghi, e massima qualora gli impulsi occupano tutta la durata temporale ([22]).

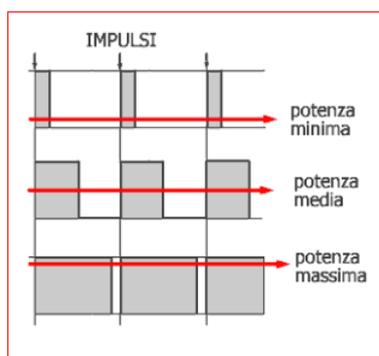


Figura A.1. Tecnica del PWM([22])

Il discorso espresso in precedenza può essere ricondotto al concetto del duty-cycle, ovvero il rapporto della durata reale dell'impulso su quella massima possibile([22]), denominato anche fattore di modulazione m . In questa applicazione l'inverter avendo un duty-cycle di 0,8 riesce ad inviare al motore l'80 %della potenza posseduta. Dopo aver costruito uno schema Simulink sul controllo dei motori elettrici(A.2), si ottiene una tensione in ingresso del motore definita da una serie di impulsi molto stretti ma anche molto ravvicinati, tali da riempire il periodo di durata massimo dell'impulso.Sugli impulsi si può immaginare di ricalcare un andamento sinusoidale, tipico dei motori a corrente alternata.

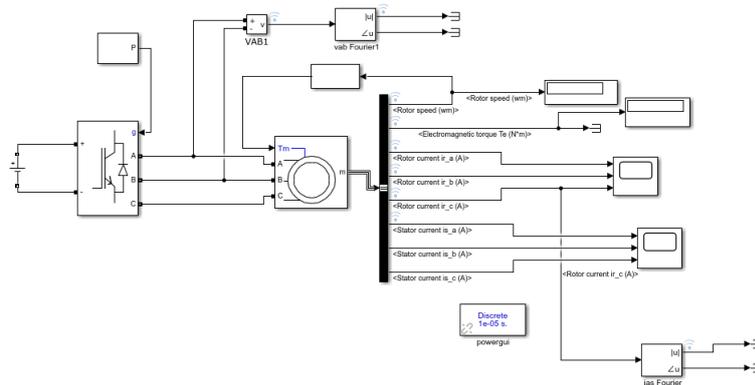


Figura A.2. Schema Simulink per il controllo di velocità del motore elettrico([23])

Il valore della tensione é di 400 V, come definito nella sezione relativa alla definizione delle caratteristiche elettriche del motore(A.3):

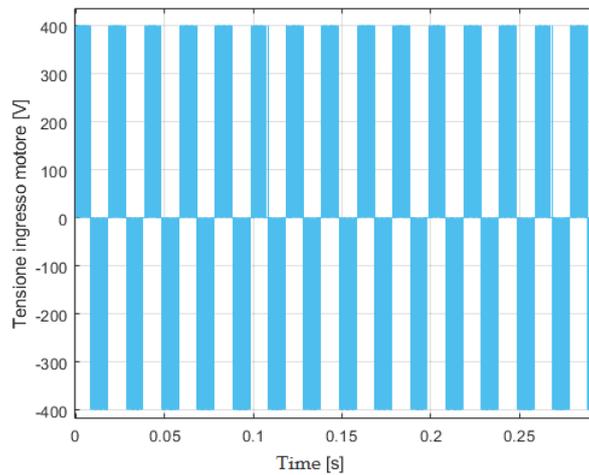


Figura A.3. Tensione del motore modulata dalla tecnica del PWM

Appendice B

Le armoniche

Le armoniche di tensione o di corrente nei sistemi elettrici si originano principalmente dalla presenza di componenti elettronici come gli inverter, trasformatori e UPS. Il THD (livello di distorsione delle armoniche), è un parametro che indica il numero di armoniche relative ad una forma d'onda di corrente o di tensione ([23]). Ci sono armoniche di vario ordine (secondo, terzo, quarto, etc.), ma più aumenta l'ordine più si ottiene un'armonica con un'ampiezza minore, che influisce poco sul risultato ([23]). Si calcola in percentuale con la seguente formula ([23]):

$$THD = 100 * \sqrt{\sum_{h=2}^H \left(\frac{U_h}{U_1}\right)^2} \quad (B.1)$$

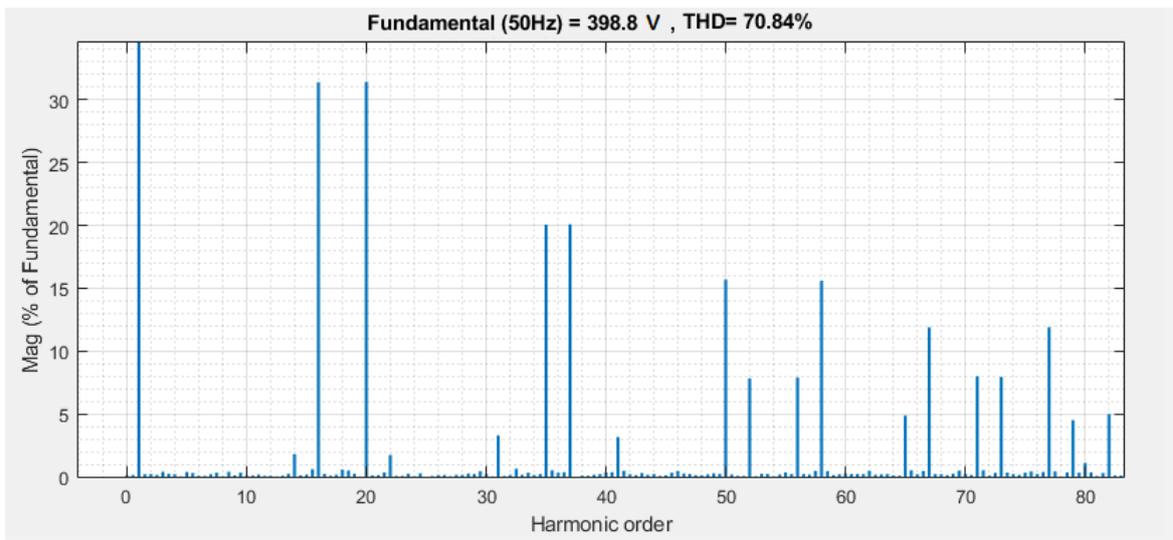


Figura B.1. THD % relativo alla tensione della nave

Le armoniche incidono negativamente sul sistema elettrico, modificando la forma dell'onda che non risulta più perfettamente sinusoidale([23]). Solo se si escludessero le armoniche secondarie e si conservasse quella fondamentale, l'onda sarebbe perfettamente sinusoidale([23]). Dalla figura(B.1) si nota che la distorsione armonica totale del sistema elettrico della nave é di circa il 71 %, e l'armonica fondamentale é relativa alla frequenza di 50 Hz, con una tensione di circa 400V, che rappresenta la tensione in ingresso del motore. Questo risultato implica la possibilità di adottare dei filtri per ridurre il THD e il dovere di costruire dei cavi elettrici con conduttori molto grandi a causa della dispersione di correnti che generano surriscaldamento per effetto Joule, implicando di conseguenza perdite di potenza.

Nel grafico si nota come il 32% delle armoniche totali sono rappresentate dalla 16th(18-2) e dalla 20th(18+2) armonica, ottenute dalla successiva relazione([24]):

$$(n * 18 + -k) \tag{B.2}$$

K rappresenta il numero di cicli utilizzati nella simulazione, e in tal caso se ne considerano 2.

Bibliografia

- [1] "Impatto ambientale della navigazione." Wikipedia, L'enciclopedia libera. 3 feb 2020, 10:04 UTC. 8 feb 2020, 10:20 <//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Impatto_ambientale_della_navigazione&oldid=110601510>
- [2] C.W.Mohd Noor, M.M.Noor, R.Mamat." Biodiesel as alternative fuel for marine diesel engine applications: A review", in Renewable and Sustainable Energy Reviews 94, (2018):127-42
- [3] "I vantaggi ambientali e sociali del trasporto merci via mare, I costi esterni della navigazione a confronto con strada, rotaia e aereo", Friends of the Earth International, Roma,(2001).
- [4] D.Patrucco, Dal trasporto aereo e marittimo il rischio del 40% delle emissioni globali al 2050, [Online] Disponibile a : <https://www.qualenergia.it>,(2018)
- [5] L.Secondino, Emissioni,il Diesel delle navi fa più danni delle auto. [Online]. Disponibile a: <http://www.money.it> (2018)
- [6] Wikipedia contributors. "Stirling engine." Wikipedia, The Free Encyclopedia. Wikipedia, The Free Encyclopedia, 31 Jan. 2020. Web. 1 Feb. 2020.
- [7] M.Calì,P.Gregorio, Termodinamica, Esculapio,(2006)
- [8] G.Palucci, Determinazione del rendimento complessivo di un sistema di generazione e stoccaggio di 15 kWh di energia elettrica ottenuta attraverso la combustione di biomassa e l'impiego di un motore Stirling e di celle a Litio-ione, Tesi di Laurea Triennale, Politecnico Di Torino, (2016)
- [9] Ruijie Li, Applications of Stirling engine in sustainable development context-experimental and numerical study, Université Paris Nanterre, Paris, (2017)
- [10] Z.M.Ding,L.G.Chen, F.R.Sun."Performance optimization of a linear phenomenological law system Stirling engine", in Journal of The Energy Institute 88,(2015):36-42
- [11] A.Vega, I propulsori navali. [Online]. Disponibile a: <http://www.istitutonauticokr.gov.it/wp-content>,(2019)
- [12] A.Boesso, Nozioni di macchine marine, Poligrafico Accademia Navale, Livorno,(2004)
- [13] G.Trincas, C.Chisari, Esercitazioni di Propulsione Navale, Università degli Studi di Trieste,(2006-2007)

- [14] G.Trincas, Fondamenti ed Applicazioni di Propulsione Navale, Dipartimento di Ingegneria Navale, del Mare e per l'Ambiente, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Trieste, (2006-2007)
- [15] Electric Motors and Generators for Marine Application, The WEG Group, Brochure 50059833
- [16] Tesvolt, TPS POWER STORAGE, The all-rounder for grid networks and industry, EN-A11-180530
- [17] SINAMICS Drives, SIEMENS, SINAMICS G130 Drive Converter Chassis Units, SINAMICS G150 Drive Converter Cabinet Units, Catalog D 11, (2008)
- [18] Culligan, PRODOTTI E IMPIANTI PER IL TRATTAMENTO DELL'ACQUA, BI0290, (2015)
- [19] Ocean SABIANA, Termocondizionatori Ocean con Sezione Filtro Elettrostatico Crystall, ISO 9001 - Cert. n° 0545/3
- [20] A.Fiumara, COMBUSTIBILI ED INQUINAMENTO. La ricerca: obiettivi, metodologia ed evidenze scientifiche
- [21] Hella marine, Vision and Innovation, (2019)
- [22] R. Ilardo, Regolazione della velocità con PWM (parte prima). [Online]. Disponibile a: <http://www.raffaeleilardo.it/pwmsp1.htm>, (2020)
- [23] Armoniche: cosa sono e come si creano. [Online] Disponibile a : <https://www.voltimum.it> [06/02/2020]
- [24] Simulate Variable Speed Motor Control. [Online] Disponibile a : <https://it.mathworks.com/solutions/power-electronics-control/motor-control.html> [06/02/2020]
- [25] Anon, Propulsione elettrica navale, Sistemi Elettrici Navali Cap.7, s.n, s.l, n.d
- [26] M.Fracchia, G. Sciutto. "La propulsione diesel-elettrica nei trasporti navali", AEI, vol.81, N.4, (1994).
- [27] G.Trincas, Progetto dell'elica, Dipartimento di Ingegneria Navale, del Mare e per l'Ambiente, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Trieste, (2009-10)
- [28] F.Alessandrini, G.B. Appetechi, M.Conte, Studio di fattibilità tecnica sull'applicabilità delle batterie litio nelle reti elettriche, Stato dell'arte e limiti scientifici e tecnologici, ENEA
- [29] R.Gargiulo, Nozioni di impianti di bordo, Poligrafico Accademia Navale, Livorno, (2004)
- [30] "Luci di navigazione." Wikipedia, L'enciclopedia libera. 13 gen 2020, 19:57 UTC. 8 feb 2020, 11:26 <[//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Luci_di_navigazione&oldid=110017560](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Luci_di_navigazione&oldid=110017560)>.
- [31] G.B. Griva, Macchine elettriche, La macchina asincrona, Politecnico di Torino, (2015)
- [32] A. Mancini, Funzionamento idrodinamico ed "effetti collaterali", Il bow thruster. [Online] Disponibile a : <https://docplayer.it/28144437-Funzionamento-idrodinamico-ed-effetti-collaterali.html> [09/12/2019]

- [33] R.Poli, Azionamenti elettrici di elevata potenza per applicazioni nella propulsione navale, Ateneo di Padova,(2010).
- [34] Corso di Macchine II, La propulsione navale, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Lecce
- [35] Capitolo 8, Interazione Elica-Carena,
http://dinmats.altervista.org/download/propulsione_navale/cap_08.pdf
- [36] WÄRTSILÄ, RIDUTTORE PER NAVE / PER MOTORE / DOPPIO INGRESSO / USCITA SEMPLICE. [Online] Disponibile a :
<https://www.nauticexpo.it/prod/waertsilae-corporation/product-24872-259403.html> [16/01/2020]
- [37] VM MOTORI, HIGH PERFORMANCE DIESEL ENGINES THE POWER OF ENGINEERING . [Online] Disponibile a : <https://www.vmmotori.it> [06/02/2020]
- [38] BH-QE SSR/BUS, LINEA INDUSTRIALE,BATTERIE ELETTRICHE, Catalogo, (2017)
- [39] K.Hirata, M. Kawada, "Discussion of Marine Stirling Engine Systems", Tokyo, (2005)
- [40] D. D'Elia, Nave mercantile da 600 tonnellate a propulsione elettrica. [Online] Disponibile a : <https://www.tomshw.it/automotive/nave-mercantile-da-600-tonnellate-a-propulsione-elettrica/>,(2017)
- [41] Fountom Marine, SEPARATORE PER NAVE / ACQUA / OLIO / VERTICALE / PER ACQUA DI SENTINA. [Online] Disponibile a:<https://www.nauticexpo.it/fabbricante-barca/separatore-nave-20285.html> [04/02/2020]
- [42] Fountom Marine, Separatore per nave,SISTEMA DI TRATTAMENTO DI ACQUE REFLUE / PER NAVE / BIOLOGICA / A MEMBRANA. [Online] Disponibile a : <https://www.nauticexpo.it/prod/fountom-marine/product-194386-545677.html> [04/02/2020]
- [43] Albin Pump AB, POMPA AD ACQUA / PER PRODOTTI CHIMICI / PER PRODOTTI AGROALIMENTARI / ELETTRICA. [Online] Disponibile a : <https://pdf.directindustry.it/pdf/albin-pump-ab-38606.html> [20/01/2020]