

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA

SCUOLA POLITECNICA

DIME

**Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica,
Gestionale e dei Trasporti**



TESI DI LAUREA MAGISTRALE

IN

INGEGNERIA MECCANICA-ENERGIA E AERONAUTICA

**ANALISI ENERGETICA E STUDIO DI FATTIBILITÀ DI
REATTORI MODULARI COMPATTI PER PROPULSIONE
NAVALE MERCANTILE**

**Energy analysis and feasibility study of small modular reactors for
merchant ship propulsion**

Relatore:

Chiar.mo Prof. Ing.

Guglielmo Lomonaco

Allievo:

Gabriele Daturi

Giugno 2023

Sommario

L'innovazione tecnologica è sempre di più guidata dalle necessità di ridurre le emissioni di gas climalteranti. Le scelte politiche di molte organizzazioni e Paesi hanno un ruolo fondamentale nel direzionare lo sviluppo delle nuove tecnologie. La tecnologia nucleare è sicuramente una delle alternative a disposizione per far fronte a questi requisiti. Attualmente già decisamente matura nel campo della produzione di energia elettrica è però una soluzione molto poco nota al grande mercato globale nel settore del trasporto marittimo civile e mercantile; il settore navale rappresenta una voce non trascurabile in termini di emissioni globali ed è in espansione, dunque la strada verso la net zero carbon emissions non può prescindere dalla necessità di trovare una soluzione solida e fattibile anche in questo campo. In tale ottica recenti studi si stanno occupando di rendere realizzabile l'implementazione della tecnologia nucleare nel contesto marittimo servendosi di reattori modulari compatti (SMR, Small modular Reactors). Contemporaneamente l'avanzamento tecnologico dei reattori nucleari a fissione sta mirando verso la quarta generazione. Quello che ci si propone nella seguente tesi è dare un contributo attraverso valutazioni tecniche che consentano di comprendere in quale modo questo connubio tecnologico possa essere percorribile. L'idea chiave è quella di rendere possibile l'implementazione del reattore modulare per soddisfare l'intera domanda energetica della nave. Le considerazioni verranno esposte previa contestualizzazione del settore navale attuale e dello stato dell'arte dei reattori modulari compatti. Risulta necessario infatti una conoscenza di tutti i fattori che ruotano attorno a questi due mondi per poter in maniera attendibile trarre delle conclusioni sensate sulla fattibilità dell'idea, sui suoi pregi e sui suoi limiti. Per sostenere la tesi proposta ci si concentrerà innanzitutto su una parte iniziale che ripercorre l'esperienza ad oggi maturata sulla propulsione navale, in particolare quella nucleare, per poi trattare nello specifico l'attuale stato dell'arte degli SMR. Tali approfondimenti porranno le basi per la parte centrale della trattazione che si concentrerà sulle possibilità reali di utilizzo di SMR per soddisfare la domanda energetica di imbarcazioni civili. Nella parte conclusiva si vuole sostenere la tesi proposta scegliendo opportunamente una tipologia di reattore compatto ed una tipologia di nave per effettuare dei calcoli di natura energetica. Valutando la richiesta energetica dell'imbarcazione si vogliono confrontare due soluzioni specifiche, di cui una completamente nucleare e una ibrida nucleare-diesel. I calcoli relativi a questi due casi studio avranno l'obiettivo finale di trarre delle conclusioni sulla fattibilità energetica dell'abbinamento nave-SMR e dare un contributo ai fini di tale applicabilità.

Infine in una breve appendice verrà considerata in via del tutto preliminare la potenziale fattibilità di una soluzione ibrida nucleare-fotovoltaico, evidenziandone le criticità che, almeno ad oggi, rendono difficilmente applicabile tale soluzione.

Abstract

The technologic innovation is increasingly driven by the need to reduce climate-changing gas emissions. The policy choices of many organizations and countries play a key role in directing the development of new technologies. Nuclear technology is certainly one of the alternatives available to meet these requirements. Currently it is already definitely mature in the field of power generation; however, it is a very unfamiliar solution to the large global market in the civil and merchant shipping sector. The shipping sector represents a non-negligible element in terms of global emissions and it is in expansion, so the road to net zero carbon emissions cannot be separated from the need to find a robust and feasible solution in this field as well. In this perspective, recent studies are dealing with making it feasible to implement nuclear technology in the maritime context by making use of Small Modular Reactors (SMRs). Meanwhile, the technological advancement of nuclear fission reactors is aiming toward the Generation-IV. What we aim to do in the following thesis is to contribute through technical evaluations in order to understand if and how this technological combination can be viable. The key idea is to make it possible to implement the Small Modular Reactor to meet the entire energy demand of the ship. Considerations will be given after contextualizing the current naval industry and the state of the art of SMRs. Indeed, in order to draw sensible and reliable conclusions about the feasibility of the idea, its merits and limitations, it is necessary to acquire a knowledge of all the factors revolving around these two worlds. To support the proposed thesis, we will first focus on an initial section reviewing the current experience on naval propulsion, particularly nuclear propulsion, and then we will specifically deal with the current state of the art of SMRs. These insights will lay the foundation for the central part of the discussion, which will focus on the real possibilities of using SMRs to meet the energy demand of civilian ships. In the concluding section, we want to support the proposed thesis by appropriately choosing a compact reactor type and a vessel type to make energy calculations. Assessing the vessel's energy demand, we want to compare two specific solutions, one of which is fully nuclear and one is a nuclear-diesel hybrid. The calculations for these two case studies will have the ultimate goal of drawing conclusions about the energy feasibility of ship-SMR coupling and make a contribution toward that applicability.

Finally, in a short appendix, the potential feasibility of a nuclear-photovoltaic hybrid solution, will be considered at a preliminary level, highlighting its critical issues that, at least to date, make this solution difficult to applicable.

INDICE

Sommario	I
Abstract	II
INDICE	III
1. Introduzione	- 1 -
1.1 Impatto ambientale settore navale	- 1 -
1.2 Motori e combustibili navali	- 3 -
2. Impianti navali nucleari	- 6 -
2.1 Impianti navali	- 6 -
2.1.1 Impianto propulsivo	- 6 -
2.1.2 Impianti ausiliari	- 8 -
2.1.3 Generatori	- 9 -
2.2 Propulsione navale nucleare	- 10 -
2.2.1 Settore militare	- 11 -
2.2.2 Settore civile	- 12 -
2.2.3 Caratteristiche impianti nucleari navali	- 13 -
3. Small Modular Reactors (SMRs)	- 16 -
3.1 Generalità e aspetti tecnologici sugli SMR	- 16 -
3.2 Prospettive e sviluppi futuri	- 17 -
3.3 SMRs per applicazioni navali	- 20 -
3.3.1 KTL-40S	- 21 -
3.3.2 ACPR-50S	- 22 -
3.3.3 RITM 200S e RITM 400	- 23 -
3.3.4 mPower	- 23 -
3.3.5 MRX (Marine Reactor X)	- 24 -
3.3.6 NEREUS	- 25 -
3.3.8 CorePower MCR	- 25 -
3.3.8 MicroURANUS	- 26 -
3.3.9 Gen4 Energy SMR	- 27 -
3.4 Conclusione	- 27 -
4. Aspetti tecnologici della propulsione con SMRs	- 28 -
4.1 Considerazioni specifiche per navi con propulsione nucleare	- 28 -
4.1.1 Propulsione	- 28 -

4.1.2 Conversione energetica	- 30 -
4.1.3 Schermatura, protezione e posizionamento	- 32 -
4.1.4 Refueling	- 34 -
4.1.5 Propulsione di emergenza	- 34 -
4.1.6 Sistemi di sicurezza	- 34 -
4.2 All-electric ships	- 35 -
4.3 Pressurized Water Reactors	- 35 -
4.3.1 Caratteristiche tecnologiche	- 36 -
4.3.2 Ciclo Rankine con PWR	- 37 -
4.4 HTR/VHTR	- 40 -
4.4.1 Caratteristiche tecnologiche	- 40 -
4.4.2 Caratteristiche dell'impianto	- 42 -
4.5 Lead-bismuth fast reactor	- 46 -
4.5.1 Caratteristiche tecnologiche	- 46 -
4.6 Molten Salt Reactor	- 47 -
4.7 Tipologie di navi	- 49 -
4.7.1 Navi portacontainer	- 51 -
4.7.2 Navi cisterna (petroliere – Oil Tanker)	- 52 -
4.7.3 Navi portarinfuse (Bulk Carrier Ship)	- 53 -
4.7.4 Navi passeggeri	- 53 -
4.8 Conclusioni	- 55 -
5. Casi studio reattore-nave	- 58 -
5.1 Descrizione del caso studio	- 58 -
5.1.2 Dati energetici della nave	- 59 -
5.2.3 Dati design del reattore	- 63 -
5.2 Caso 1: doppio SMR	- 63 -
5.2.1 Funzionamento a pieno carico	- 63 -
5.2.2 Funzionamento a carico parziale	- 68 -
5.3 Caso 2: SMR + motore diesel	- 71 -
5.3.1 Funzionamento a pieno carico	- 72 -
5.3.2 Funzionamento a carico parziale	- 72 -
5.4 Confronto dei due casi e scenario delle emissioni	- 78 -
APPENDICE	- 81 -
Propulsione Navale Ibrida Nucleare-Fotovoltaica	- 81 -

A.1. Superficie captante dei moduli	- 81 -
A.2. Dispositivo di stoccaggio elettrico	- 83 -
A.3. Soleggiamento	- 84 -
A.4 Conclusione	- 85 -
CONCLUSIONI	- 87 -
Bibliografia	- 88 -

1. Introduzione

1.1 Impatto ambientale settore navale

Il settore navale è in continuo sviluppo ed espansione ed è destinato negli anni a venire a confermare tale trend a causa dell'incremento delle operazioni commerciali e quindi dei trasporti. A conferma di tale affermazione la Figura 1.1 mostra quale sia stato l'incremento della flotta mondiale di navi mercantili e passeggeri nell'arco di un solo anno tra il 2020 e il 2021 (espressa in migliaia di tonnellate di peso a vuoto). Ciò è spiegabile oltre che grazie allo sviluppo economico e quindi alla crescita del commercio anche al fatto che tutt'oggi il trasporto di merci via mare laddove possibile è quello più conveniente in termini di efficienza e quindi anche di costi e di emissioni di gas serra. Tuttavia queste constatazioni portano con sé evidenti preoccupazioni in merito all'inquinamento e all'aumento dei gas climalteranti che il trasporto marittimo può determinare. Il trasporto via mare è principalmente un business internazionale e quindi il suo impatto ambientale è regolato dall'International Maritime Organization (IMO) attraverso la Marine Environment Protection Committee (MEPC); nonostante ciò, tale settore è rimasto per anni uno dei più problematici e meno regolati nell'ambito dei sistemi di trasporto. Proprio la crescita del commercio e quindi del traffico marittimo ha portato la IMO a stabilire un piano regolatorio che, almeno in parte ha portato ad una necessaria responsabilizzazione anche nel settore navale.

Gli impatti negativi del trasporto navale sono a danno dell'ambiente marino e dell'atmosfera; per quanto riguarda il primo ci si riferisce allo scarico di rifiuti nocivi, olii e carburante mentre per il secondo si parla delle emissioni tipiche di sistemi facenti uso di

Table 1 World fleet by principal vessel type, 2020–2021 (thousand dead-weight tons and percentage)					
Principal types	2020		2021		Percentage change 2021 over 2020
Bulk carriers	879 725	42.47%	913 032	42.77%	3.79%
Oil tankers	601 342	29.03%	619 148	29.00%	2.96%
Container ships	274 973	13.27%	281 784	13.20%	2.48%
Other types of ships:	238 705	11.52%	243 922	11.43%	2.19%
<i>Offshore supply</i>	84 049	4.06%	84 094	3.94%	0.05%
<i>Gas carriers</i>	73 685	3.56%	77 455	3.63%	5.12%
<i>Chemical tankers</i>	47 480	2.29%	48 858	2.29%	2.90%
<i>Other/not available</i>	25 500	1.23%	25 407	1.19%	-0.36%
<i>Ferries and passenger ships</i>	7 992	0.39%	8 109	0.38%	1.46%
General cargo ships	76 893	3.71%	76 754	3.60%	-0.18%
World total	2 071 638		2 134 640		3.04%

Figura 1.1 – Evoluzione e incremento della flotta di navi nel mondo per tipologia dal 2020 al 2021.

combustibili fossili come fonte di energia primaria. Si tratta dunque di emissioni di gas climalteranti quantificabili tramite la CO_{2e} (CO₂ equivalente) e di composti inquinanti quali gli ossidi di zolfo (SO_x), gli ossidi di azoto (NO_x) ed il particolato (PM).

Innanzitutto non si può trascurare l'effetto dei gas serra, comunemente noti come GHG (Greenhouses Gases), che rappresentano il nemico numero uno nell'odierna sfida tecnologica verso la decarbonizzazione. Chiaramente un aumento dei traffici marittimi con propulsione convenzionale avrà come diretta conseguenza un aumento delle emissioni di GHG nonostante l'implementazione di sistemi sempre più efficienti e l'utilizzo di dispositivi di risparmio energetico. Le stime della IMO [1] indicano che le emissioni di CO_{2e} dovute al settore navale rispetto a quelle globali sono aumentate del 9.3% nell'arco di 6 anni (dal 2,72% nel 2012 al 2.89% nel 2018). I dati aggiornati al 2018 corrispondono a 1056 milioni di tonnellate di CO_{2e}. Se ci si riferisce invece alle sole imbarcazioni che effettuano viaggi internazionali le tonnellate di CO_{2e} emesse nel 2018 sono 740 milioni rappresentando circa il 2% di quelle globali. I dati riportati evidenziano come il peso del trasporto internazionale sia preponderante, determinando il 70% delle emissioni dell'intero settore dei trasporti marittimi. Una proiezione dello scenario mette in luce quanto segue: utilizzando come base le emissioni del 2008 ci si può aspettare un aumento fino al 130% di tali emissioni entro il 2050 [1]. Chiaramente non si tratta di stime precise, in quanto fortemente dipendenti da numerose variabili tecnico-economiche difficilmente prevedibili; tuttavia, aldilà della variabilità della stima, questi dati indicano in maniera netta che il percorso verso la decarbonizzazione dei trasporti via mare rappresenta una sfida non priva di difficoltà. Tale stima effettuata dalla IMO prevede infatti che non vi sia una grande modifica nelle tecnologie propulsive ad oggi utilizzate, se non nell'efficientamento dei sistemi energetici.

In ambito marittimo vengono utilizzati alcuni indicatori che consentono di apprezzare la cosiddetta "carbon intensity", termine generico per descrivere la quantità di gas serra emessi. Si fa spesso riferimento al EEDI (Energy Efficiency Design Index) il quale è il principale indice tecnico che è finalizzato ad un'adozione di sistemi propulsivi e di potenza più efficienti e quindi che emettono meno CO_{2e}.

A partire dal 2013 si richiede un livello minimo dell'EEDI, che di fatto rappresenta le emissioni specifiche per unità massa e velocità dell'imbarcazione, tipicamente espresso in g CO₂/t/nm, che deve essere rispettato e migliorato ogni 5 anni per tutti i modelli prodotti. L'indice è personalizzato per tipologia di progetto e di nave prodotta. Tale regime regolatorio internazionale imposto dal MEPC copre le tipologie di navi che sono insieme responsabili del 85% delle emissioni di CO_{2e} totali. Tali tipologie sono le seguenti: navi cisterna (tanker ships), navi portarinfuse (bulk carrier ships), navi portacontainer, navi cargo generiche e navi passeggeri. Le novità regolatorie hanno portato i costruttori ed i proprietari a fare uso di un piano di gestione energetica della nave (SEEMP, Ship Energy Efficiency Management Plan) che consente di adottare soluzioni di miglioramento delle performance che vengono monitorate attraverso indicatori come il EEOI (Energy Efficiency Operational Indicator) che a sua volta consente di valutare la CO_{2e} emessa per unità di massa e velocità della nave. Le soluzioni tecnologiche adottabili sono quello di un efficientamento dei sistemi energetici e propulsivi. Ad esempio è possibile implementare sistemi di recupero termico ed ottimizzazione dei flussi o più direttamente utilizzare combustibili alternativi e meno inquinanti. La Figura 1.2 riporta il trend in miglioramento delle emissioni di CO_{2e} per singola imbarcazione misurato tramite gli indicatori di "carbon intensity"; dal momento in cui i dati riportati sono relativi al periodo tra il 2008 e il 2012, cioè prima delle novità

regolatorie del 2013, la causa di tale diminuzione delle emissioni, come suggerito dalla IMO, è da ricercarsi nel miglioramento e ottimizzazione dei progetti così come nell'aumento della taglia e nella diminuzione della velocità media di alcune imbarcazioni. Questi miglioramenti rappresentano però ad oggi ancora troppo poco per far fronte all'incessante crescita e sviluppo del settore e ciò è confermato dalla stessa Figura 1.2 che evidenzia come le emissioni assolute dell'intera flotta siano in continuo aumento. Dunque seppur tale piano abbia buone prospettive, difficilmente riuscirà a compensare il continuo aumento della domanda e la necessità di ridurre le emissioni fino all'ideale situazione di *net zero carbon emissions*.

La MEPC ha posto un occhio di riguardo sulle elevate emissioni di zolfo nel 2020; in relazione a questa classe di inquinanti, il settore navale ha sempre avuto grandi responsabilità. Diversi studi dimostrano come la presenza di ossidi di zolfo in atmosfera, oltre a provocare le piogge acide sia correlabile all'aumento di mortalità in zone portuali [2]. Uno studio del 2009 [3], non troppo recente ma decisamente esplicativo della situazione mise in luce come 16 tra le più grandi navi del mondo emettevano una quantità di zolfo comparabile a quello di 800 milioni di autovetture (quindi approssimabile a tutto il parco macchine mondiale). Il legame che c'è tra i sistemi di trasporto marittimo con le emissioni di ossidi di zolfo è dovuto alla tipologia di motori e combustibili ad oggi più diffusi; per meglio comprendere tale aspetto vengono nella sezione successiva brevemente descritti i sistemi propulsivi e i combustibili utilizzati.

Year	Global anthropogenic CO ₂ emissions	Total shipping CO ₂	Total shipping as a percentage of global	Voyage-based International shipping CO ₂	Voyage-based International shipping as a percentage of global	Vessel-based International shipping CO ₂	Vessel-based International shipping as a percentage of global
2012	34,793	962	2.76%	701	2.01%	848	2.44%
2013	34,959	957	2.74%	684	1.96%	837	2.39%
2014	35,225	964	2.74%	681	1.93%	846	2.37%
2015	35,239	991	2.81%	700	1.99%	859	2.44%
2016	35,380	1,026	2.90%	727	2.05%	894	2.53%
2017	35,810	1,064	2.97%	746	2.08%	929	2.59%
2018	36,573	1,056	2.89%	740	2.02%	919	2.51%

Year	EEOI (gCO ₂ /t/nm)				AER (gCO ₂ /dwt/nm)				DIST (kgCO ₂ /nm)				TIME (tCO ₂ /hr)			
	Vessel-based		Voyage-based		Vessel-based		Voyage-based		Vessel-based		Voyage-based		Vessel-based		Voyage-based	
	Value	Change	Value	Change	Value	Change	Value	Change	Value	Change	Value	Change	Value	Change	Value	Change
2008	17.10	-	15.16	-	8.08	-	7.40	-	306.46	-	350.36	-	3.64	-	4.38	-
2012	13.16	-23.1%	12.19	-19.6%	7.06	-12.7%	6.61	-10.7%	362.65	18.3%	387.01	10.5%	4.32	18.6%	4.74	8.1%
2013	12.87	-24.7%	11.83	-22.0%	6.89	-14.8%	6.40	-13.5%	357.73	16.7%	380.68	8.7%	4.18	14.6%	4.57	4.1%
2014	12.34	-27.9%	11.29	-25.6%	6.71	-16.9%	6.20	-16.1%	360.44	17.6%	382.09	9.1%	4.17	14.4%	4.54	3.5%
2015	12.33	-27.9%	11.30	-25.5%	6.64	-17.8%	6.15	-16.9%	366.56	19.6%	388.62	10.9%	4.25	16.6%	4.64	5.7%
2016	12.22	-28.6%	11.21	-26.1%	6.58	-18.6%	6.09	-17.7%	373.46	21.9%	397.05	13.3%	4.35	19.3%	4.77	8.7%
2017	11.87	-30.6%	10.88	-28.2%	6.43	-20.4%	5.96	-19.5%	370.97	21.0%	399.38	14.0%	4.31	18.2%	4.79	9.2%
2018	11.67	-31.8%	10.70	-29.4%	6.31	-22.0%	5.84	-21.0%	376.81	23.0%	401.91	14.7%	4.34	19.1%	4.79	9.2%

Figura 1.2 - In alto, emissioni di CO₂e assolute (milioni di tonnellate) e percentuali relative al settore marittimo. In basso, alcuni degli indicatori utilizzati per il monitoraggio della CO₂e

1.2 Motori e combustibili navali

Innanzitutto i due sistemi propulsivi utilizzati sono la propulsione a idrogetto e ad elica. Il primo è spesso utilizzato in alcune applicazioni militari e per traghetti di media bassa potenza in virtù delle elevate velocità e manovrabilità. La propulsione ad elica rappresenta

la grandissima maggioranza delle applicazioni in ambito civile e mercantile; in questo caso l'albero motore con la sua rotazione e per mezzo dell'elica genera la spinta propulsiva. Ai fini di questo elaborato si prenderà sempre in considerazione il sistema a elica, tranne quando espressamente specificato.

Per quanto riguarda gli impianti motore a combustibile fossile si può fare la seguente classificazione:

- Ciclo Diesel
- Ciclo Brayton-Joule
- Ciclo a vapore

Tra questi, quello di gran lunga più diffuso oggi è il motore a combustione interna con ciclo Diesel (utilizzato da circa il 90% delle navi mercantili). La sua decisa affermazione rispetto alla turbina a vapore, sua storica concorrente, è giustificata dalle seguenti caratteristiche: elevati rendimenti, ampio campo di funzionamento a carico parziale, affidabilità operativa e minori costi di manutenzione.

Le turbine a gas (Ciclo Brayton-Joule) sono spesso usate in campo militare in virtù delle elevate potenze in relazione all'ingombro e della rapidità di regolazione/avviamento. I rendimenti in gioco sono relativamente bassi e ciò non ne giustifica l'utilizzo al di fuori dal contesto militare. Le emissioni di SOx sono più contenute per via del combustibile gassoso utilizzato così come quelle di NOx grazie ai notevoli eccessi d'aria.

La comprensione dell'attuale scenario del trasporto navale deriva anche dalla conoscenza del combustibile utilizzato nei più diffusi motori diesel navali. Questi motori consentono un corretto funzionamento utilizzando olii combustibili meno raffinati e costosi rispetto ai più noti combustibili diesel utilizzati in campo automotive (fatta eccezione per la fase di avviamento che generalmente si serve di motori ad hoc con diesel raffinato); questa caratteristica d'altra parte rappresenta una particolare criticità in relazione alle emissioni di inquinanti. L'utilizzo di olii combustibili navali denominati bunker fuel¹ ha subito negli ultimi anni delle regolamentazioni rilevanti per l'inquinamento atmosferico. La classificazione dei bunker fuels è la seguente:

- Heavy Fuel Oil (HFO)
- Marine Diesel Oil (MDO)
- Marine Gas Oil (MGO)
- Low Sulphur Heavy Fuel Oil (LSHFO)

Al giorno d'oggi la stragrande maggioranza delle applicazioni si serve di HFO, che è anche il combustibile più economico e di peggior qualità, abbassando dunque i costi operativi ma rappresentando una problematica in termini inquinanti. Il MDO e il MGO rappresentano rispettivamente due distillati di qualità crescente e superiore al HFO. Il LSHFO è un prodotto di raffineria proveniente dall' Heavy Fuel Oil, nato in seguito alle regolamentazioni imposte dall' International Maritime Organization. L'HFO infatti contiene

¹ Il termine "bunker" deriva dal nome inglese dei contenitori nei quali è immagazzinato l'olio combustibile, in particolare i bunker tank delle imbarcazioni e i bunker nei siti portuali.

al proprio interno tenori di zolfo di circa il 3.5%; ciò ha portato la IMO a due soluzioni alternative: l'imposizione di un limite fissato al 0.5% dei tenori di zolfo (da cui la nascita del LSHFO) oppure l'utilizzo di *scrubbers*² deputati all'abbattimento degli inquinanti; quest'ultima soluzione è ad oggi la più adottata per motivi economici. Per poter soddisfare i requisiti sempre più stringenti la ricerca sta portando i principali attori del settore (armatori, produttori di combustibili e costruttori di motori) ad orientarsi sempre di più verso la possibilità di utilizzare soluzioni alternative; alcune di queste sono già in uso seppur in scala molto ridotta, come il LNG (Liquefied Natural Gas) ed il metanolo, altre ancora in fase sperimentale come E-fuels (combustibili di sintesi ottenuti da idrogeno "verde", "blu" o "viola") ed ammoniaca [4]. Di seguito si raffigura la ripartizione dei combustibili sulle navi mercantili più diffuse con una proiezione fino al 2030. È evidente come si stia andando verso la diminuzione del HFO a favore di soluzioni ad oggi molto poco praticate come il LNG.

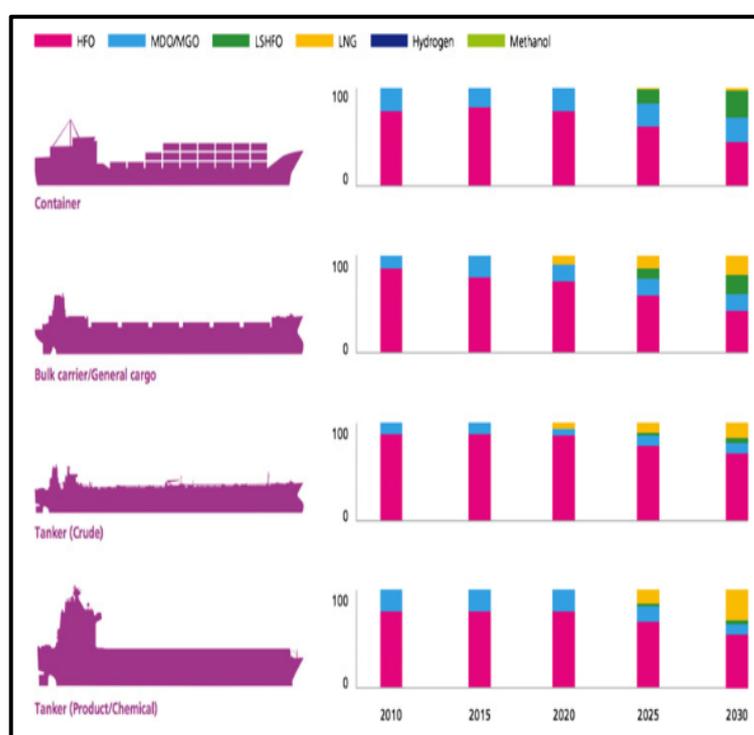


Figura 1.3 – Attuale scenario dei combustibili utilizzati per navi mercantili [46]

Mentre per il più diffuso ciclo Diesel è chiaramente necessario l'utilizzo di motori a combustione interna, il ciclo Rankine ed il ciclo Brayton-Joule sono implementabili con una qualsiasi fonte di calore esterna e questo aprirebbe le porte a scenari futuri che consentono l'utilizzo della tecnologia nucleare. Tale prospettiva verrà indagata nel corso della seguente trattazione ed aprirebbe uno scenario completamente nuovo, non privo di complicazioni ma che sicuramente potrebbe dare un contributo tutt'altro che trascurabile nel percorso di decarbonizzazione del trasporto via mare.

² Lo scrubber è un'apparecchiatura che consente di abbattere la concentrazione di sostanze presenti in una corrente gassosa, solitamente polveri e microinquinanti acidi.

2. Impianti navali nucleari

2.1 Impianti navali

Il seguente capitolo è finalizzato alla descrizione di quella che è la tecnologia nucleare nel contesto navale; per fare ciò è però necessaria una parte introduttiva propedeutica relativa agli impianti navali visti da un'ottica più generale.

Vengono dunque descritti i principali sistemi necessari al funzionamento di una nave. L'insieme di tutti gli impianti navali, opportunamente collegati tra di loro concorre alla corretta logica di funzionamento ed alla corretta suddivisione dei flussi energetici. Chiaramente ogni tipologia di imbarcazione avrà al proprio interno sistemi differenti, layout ed organizzazioni diversi a seconda dell'uso e della fonte primaria utilizzata. Lo scopo non è quello di fornire una descrizione approfondita degli impianti navali, bensì quello di conoscerne l'esistenza e la finalità; in questo modo è possibile nei capitoli successivi fare delle valutazioni sui sistemi della nave, comprendere i flussi e le linee energetiche al suo interno, capire come la sua domanda di potenza viene organizzata.

2.1.1 Impianto propulsivo

L'impianto di propulsione, detto anche apparato motore, è sicuramente il sistema nave principale in quanto caratterizza il fine ultimo dell'imbarcazione e cioè il movimento. L'apparato motore è costituito schematicamente da un motore primo, una linea di trasmissione e da un propulsore che converte l'energia meccanica in spinta. Il motore primo ha bisogno a sua volta di numerosi sistemi ausiliari per il suo funzionamento come rappresentato in Fig. 2.1.

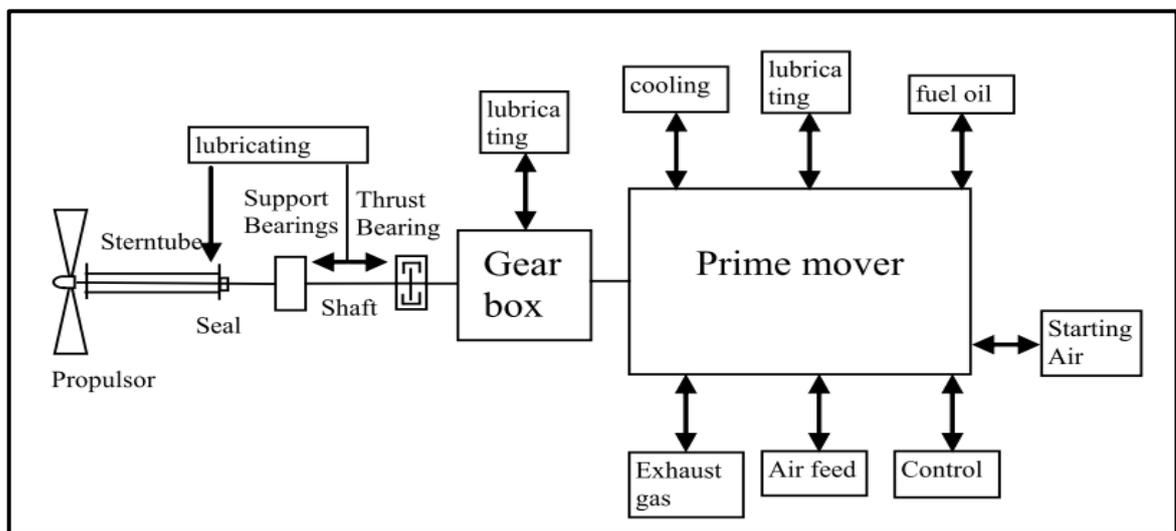


Figura 2.1 – Schema dell'apparato motore della nave

Ai fini dell'applicazione con fonte primaria nucleare è interessante mettere in risalto l'utilizzo della turbina a gas, della turbina a vapore e del motore elettrico; per quanto riguarda quest'ultima soluzione, tipicamente oggi il motore primo è un motore diesel ma è

possibile implementare soluzioni con la tecnologia nucleare e per questo motivo in Fig. 2.2 viene raffigurato uno schema logico della propulsione elettrica che verrà poi descritto più nel dettaglio nei capitoli seguenti.

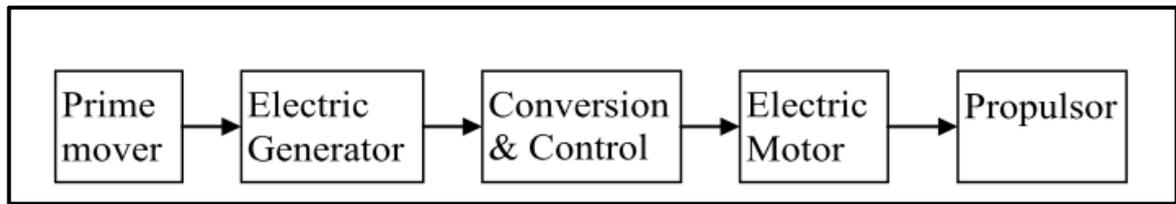


Figura 2.2 – Schema logico propulsione elettrica

Risulta interessante definire il rendimento propulsivo in maniera tale da inserirlo in quella che sarà la catena dei rendimenti e valutare dunque le perdite energetiche. Il rendimento propulsivo è il rapporto tra la potenza richiesta dalla carena della nave e la potenza erogata dal o dai motori primi, come segue:

$$\eta_P = \frac{P_e}{n \cdot k_e \cdot P_b}$$

Dove:

- P_e = Potenza effettiva (effetto utile)
- n = numero di propulsori (linee d'assi)
- k_e = numero di motori primi per propulsore
- P_b = Potenza erogata dal singolo motore

Esistono numerosi layout del sistema propulsivo e la scelta dipende da numerosi fattori che non verranno approfonditi in questa sede; è bene però descrivere quelli che sono gli schemi più utilizzati per poter meglio comprendere la trattazione nelle sezioni successive. Come già parzialmente accennato, si anticipa che l'obiettivo sarà quello di indagare la fattibilità dell'implementazione di uno Small Modular Reactor (SMR) come fonte termica e come conseguenza di ciò i motori primi compatibili saranno la turbina a gas e la turbina a vapore. Sarà poi possibile fare delle considerazioni progettuali per valutare la bontà di uno schema piuttosto che di un altro. Ad esempio esistono sistemi con diverse linee d'asse alcune delle quali trascinano direttamente l'elica, altri sistemi invece prevedono che una o più linee d'asse siano collegate ad un generatore elettrico che produrrà elettricità per uno o più fini (propulsione e/o soddisfacimento della richiesta elettrica della nave), altre soluzioni ancora possono implementare dei sistemi più o meno complessi che consentano un miglioramento della gestione dei flussi energetici come l'utilizzo di impianti combinati turbogas/turbina a vapore o impianti cogenerativi. La scelta del layout è estremamente complessa ed esula dai fini della tesi ma è necessario avere un'idea delle possibilità a disposizione anche in relazione al tipo di reattore scelto, come verrà spiegato in seguito. A titolo puramente esemplificativo viene raffigurato in Figura 2.3 lo schema COGES propulsion (Combined Gas Turbine Electric & Steam System) [5] di Rolls-Royce, che utilizza turbine a gas di concezione aeronautica ed è studiato come sistema propulsivo per navi cisterna.

Come è possibile notare questo sistema è quello di un classico ciclo combinato con caldaia a recupero più un turbogas di taglia ridotta; il tutto va a formare tre linee d'asse differenti con tre generatori differenti. Questa soluzione non prevede dunque accoppiamento diretto tra motore primo ed elica.

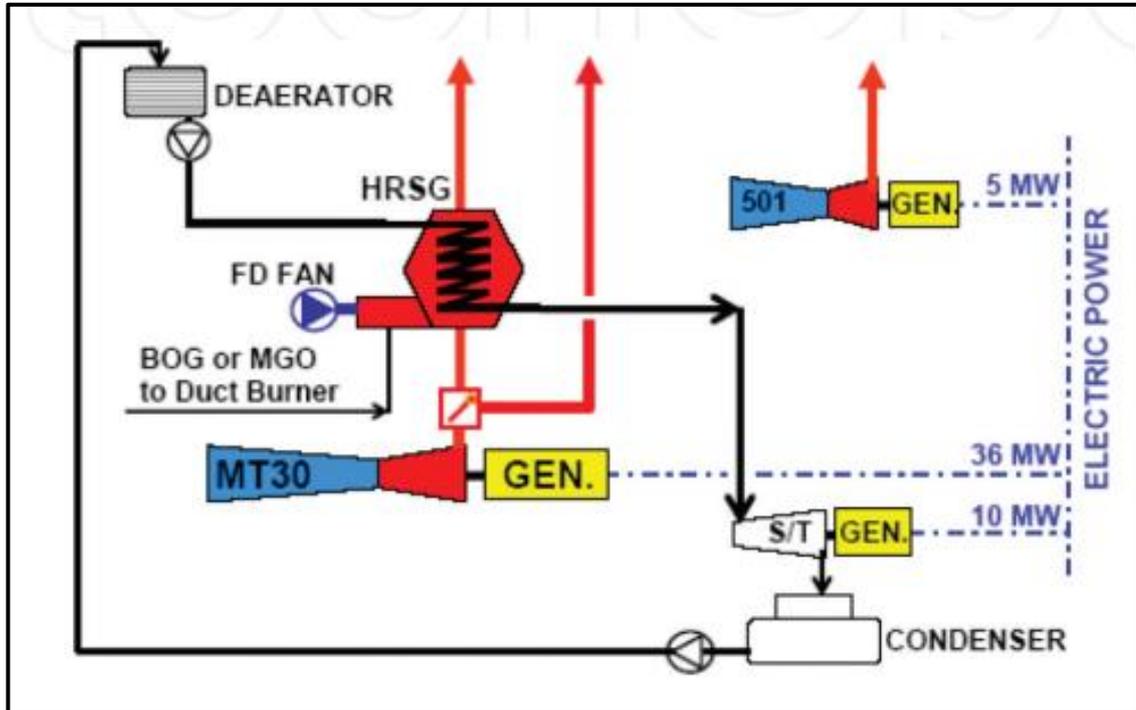


Figura 2.3 – Schema impianto propulsivo COGES sviluppato da Rolls-Royce per navi cisterna

2.1.2 Impianti ausiliari

Con impianti ausiliari si intendono tutti gli impianti che sono legati al corretto funzionamento della nave e che danno un fondamentale contributo alla sua normale operatività. Tali impianti possono essere direttamente o indirettamente legati al corretto funzionamento dell'impianto propulsivo piuttosto che ad altri aspetti secondari ma non di certo trascurabili. Tali impianti si servono di componenti ingombranti, complessi ed energivori, dunque sono fondamentali la loro corretta progettazione e dimensionamento. Vi sono alcuni di questi impianti che sono comuni a tutte le navi, mentre altri sono peculiari per ogni tipologia di imbarcazione in base al sistema propulsivo montato o in base allo scopo stesso della nave. Per rendere più chiara la precedente affermazione vengono di seguito presentati alcuni esempi. Si pensi ad esempio ad un sistema propulsivo con motori Diesel; evidentemente sarà di fondamentale importanza un circuito del combustibile che riesca a convogliare, purificare, pompare, distribuire in maniera adeguata il combustibile alle utenze che lo necessitano (sistema propulsivo, motori secondari, ...). Lo stesso sistema di convoglio sarà invece assente (o estremamente ridotto e semplificato) in una nave con reattore nucleare, che al massimo può avere un sistema Diesel ausiliario di taglia molto ridotta. Si pensi ora ad

una nave passeggeri: in questo tipo di nave gli ausiliari che soddisfino il benessere dei paganti sono estremamente onerosi (condizionamento ambientale, hoteleria, ...) e questo è il motivo per cui la taglia di queste navi tipicamente solo per metà ha fini propulsivi, mentre per l'altra metà deve soddisfare i servizi ausiliari. Ancora, i boilers dell'impianto del vapore saranno in numero e dimensione maggiori in una nave cisterna rispetto ad una nave portarinfuse per via della grande necessità di calore per trattare opportunamente il fluido trasportato. Queste considerazioni devono quindi far riflettere sul fatto che la potenza necessaria per far funzionare questi impianti è estremamente variabile e ripartita diversamente a seconda dell'applicazione. Quello che si può fare è descrivere brevemente le tipologie di impianti ausiliari che tipicamente sono comuni a tutte le grandi navi per applicazione civile e mercantile. Vengono suddivisi in due macro gruppi ossia quelli che sono parte dell'apparato motore e quelli che invece solitamente stanno fuori da esso. Si citano di seguito gli impianti ausiliari con lo scopo di rendere nota la loro presenza e quindi la necessità di tenerne conto ai fini di valutazioni energetiche. Eventualmente verrà descritto il funzionamento di alcuni di essi nei successivi capitoli solo se strettamente necessario per rendere la trattazione più esplicativa.

Impianti apparato motore:

- 1) Circuito combustibile
- 2) Refrigerazione macchinari
- 3) Olio lubrificante
- 4) Gas di scarico
- 5) Ventilazione apparato motore
- 6) Vapore per ausiliari
- 7) Impianti a olio diatermico

Impianti fuori apparato motore (impianti scafo):

- 1) Sentina
- 2) Zavorra
- 3) Antincendio
- 4) Acqua potabile
- 5) Acque nere
- 6) Ombrinali
- 7) Impianto di governo della nave

Tutti questi impianti rappresentano un costo e un consumo più o meno importante in quanto composti da numerosi componenti quali: pompe, compressori, scambiatori di calore, valvole, depuratori, condotti, trasmissioni, centraline.

2.1.3 Generatori

Lo scopo dei generatori è quello di fornire potenza elettrica a tutte le utenze della nave che ne necessitano. I gruppi elettrogeni tradizionalmente sono costituiti da motori diesel ma ancora una volta si evidenzia il fatto che nel caso di utilizzo di reattore nucleare è possibile muovere una o più turbine che alimentino i generatori; in alcuni casi, per tale scopo si può

utilizzare anche l'albero stesso collegato all'elica. L'energia elettrica prodotta in corrente alternata sarà poi distribuita dall'apposito impianto elettrico. I moderni impianti di potenza elettrica producono corrente alternata trifase a 440 V e 60 Hz oppure 380 V e 50 Hz. Laddove vengano utilizzati motori elettrici per la propulsione invece, la potenza elettrica è prodotta a valori che vanno dai 3kV ai 18kV. L'elevato voltaggio consente a parità di potenza di avere ridotte dimensioni dei cavi del motore elettrico, chiaramente sarà necessario un adeguato isolamento delle apparecchiature e dei cavi, nonché l'utilizzo di trasformatori per distribuire l'elettricità alle utenze minori.

2.2 Propulsione navale nucleare

I reattori navali si sono diffusi principalmente in ambito militare in particolare per sottomarini, portaerei e, in misura minore, per incrociatori e cacciatorpediniere. Per quanto riguarda applicazioni civili, invece, la propulsione nucleare non ha avuto storicamente un grande successo su grande scala: le applicazioni erano piuttosto ridotte ed economicamente non competitive con i combustibili fossili. Nonostante ciò, l'interesse verso questo tipo di soluzione sta tornando a galla grazie alle novità tecnologiche degli SMR ed alla loro potenziale competitività rispetto ai combustibili fossili, destinata ad aumentare in futuro.

L'ottimistica prospettiva del loro utilizzo risiede soprattutto nel loro praticamente nullo impatto in termini di GHG e nell'azzeramento di emissioni inquinanti in particolare di ossidi di zolfo, nonché nell'eliminazione di rischi ambientali quale la perdita di bunker fuel nell'ambiente marino. La buona parte dei reattori marini ad oggi in uso è costituita da PWR, ed in passato LBFR (Lead-bismuth fast reactor). I sistemi utilizzati prevedono l'utilizzo di turbine a vapore collegate direttamente all'albero principale oppure che trascinano un generatore che a sua volta alimenta un motore elettrico.

È possibile formulare alcune osservazioni relative ai reattori per applicazione navale che differiscono per svariati aspetti dai reattori terrestri. Innanzitutto la taglia è ridotta, non solo in termini di potenza ma anche dal punto di vista dello spazio occupato (si parla al massimo di poche centinaia di MW termici). Il fatto che siano fisicamente piccoli è una prerogativa fondamentale, dettata da requisiti di spazio ridotto all'interno della nave; ciò implica che la densità di potenza debba essere tipicamente molto elevata e comporta quindi un primo elemento di criticità operativa. Ulteriori criticità operative sono caratterizzate dalla necessità di lavorare in condizione tutt'altro che statiche a causa delle condizioni di viaggio in mare. L'arricchimento è tipicamente più elevato dei reattori terrestri (tale caratteristica è più esasperata nel settore militare) al fine di garantire elevate densità di potenza ed elevati burn-up; ciò, oltre a destare preoccupazioni in termini di potenziale proliferazione, introduce notevoli differenze soprattutto nella tipologia di combustibile utilizzato. Trattandosi di un'applicazione ben diversa rispetto alla produzione di energia elettrica, l'elevato arricchimento è giustificabile anche per poter supplire all'accumulo dello Xe^{135} (Xenon) in momenti di funzionamento a basso carico o a motore spento; come noto infatti a causa dell'accumulo di Xe^{135} è richiesto un tempo dell'ordine di alcune ore/giorni affinché la reattività torni a livelli tali da autosostenere le reazioni a catena di fissione. Tale problematica, che nei grandi reattori per applicazioni terrestri a basso arricchimento rappresenta solo un problema economico, invece nei trasporti marittimi e ancor di più in ambito bellico costituisce una problematica non da poco. Una sostanziale differenza rispetto al core dei reattori di potenza è che il combustibile è sottoposto ad elevato bombardamento

neutronico per via dell'arricchimento e dunque per garantire un elevato burn-up il combustibile è costituito da uranio-zirconio, uranio-alluminio o particolari combustibili metallico-ceramici. Così come accade anche in alcuni reattori terrestri vengono utilizzati veleni bruciabili quale l'ossido di gadolinio per garantire un margine di reattività a lungo termine.

Come verrà approfondito in seguito, il ricorso alla propulsione nucleare consente di eliminare le operazioni di rifornimento del carburante che verrebbero sostituite dal refueling; tale operazione diventa quindi delicata ma estremamente poco frequente grazie all'elevato burn-up, ossia dell'ordine degli anni e in alcuni casi della decina di anni a seconda delle caratteristiche del reattore.

2.2.1 Settore militare

La grande diffusione della propulsione nucleare nei sottomarini è dovuta al fatto che l'eliminazione del combustibile fossile consente di non rendere l'aria necessaria al funzionamento del dispositivo, la quale servirà solo per la vivibilità umana del veicolo e per eventuali servizi ausiliari. Il combustibile nucleare utilizzato storicamente per i sottomarini aveva elevatissimi livelli di arricchimento (sopra il 90%) il che consentiva di avere dei burn-up molto alti con evidenti conseguenze positive in termini di autonomia del sistema e del refueling. In condizioni belliche infatti era ed è una caratteristica imprescindibile quella di rendere il veicolo operativo ed indipendente per lunghi periodi di tempo senza essere facilmente rintracciabile e senza riaffiorare in superficie. Altro aspetto rilevante è la possibilità, grazie ad un elevato arricchimento, di avere dei reattori con alta densità di potenza. Aspetti critici dei sottomarini a propulsione nucleare sono:

- La "scia termica" che viene scaricata in mare (anche quando il sottomarino è fermo per via del calore di decadimento scaricato in mare) che crea zone a bassa densità che affiorano in superficie e sono facilmente individuabili;
- Il forte rumore delle pompe di circolazione del refrigerante rende facilmente individuabile il convoglio.

I moderni reattori sono progettati per durare fino a 50 anni nelle navi portaerei e 30-40 anni nei sottomarini. Le attuali navi montano principalmente sistemi di propulsione a getto anziché ad elica e delle potenze termiche installate variabili da poche decine di MW_t fino a 400 MW_t per grandi imbarcazioni.

Il primo prototipo disponibile in ambito militare fu sviluppato da Westinghouse per la marina militare statunitense (US Navy); fu denominato Submarine Thermal Reactor (STR) e rappresentò il modello su cui si basò il reattore S1C (S=Submarine, 1=primo della sua generazione, C=Combustion Engineering) montato sul primo sottomarino a propulsione nucleare, denominato USS Nautilus operativo dal 1955. La prima nave da guerra nucleare fu invece la portaerei USS Enterprise, che montava un reattore A1W (A=Aircraft Carrier, 1=primo della sua generazione, W=Westinghouse) il quale deriva da una riprogettazione del primo prototipo STR. Successivamente o parallelamente tutte le organizzazioni militari degli altri paesi adottarono nella loro flotta sottomarini e navi con propulsione nucleare, in primis

l'Unione Sovietica. Le Figura 2.4, 2.5 e 2.6 rappresentano tre delle più note navi in campo militare ad oggi operative nel mondo.



Figura 2.4 – Portaerei USS Gerald R. Ford (Reattori: 2 x A1B)



Fig. 2.5 – Portaerei francese Charles De Gaulle (Reattori: 2 x AREVA K15)



Fig. 2.6 - Incrociatore da battaglia russo Kirov (Reattori: 2 x KN-3)

2.2.2 Settore civile

Storicamente in campo mercantile vi sono pochi esempi di navi a propulsione navale che sono state effettivamente operative. Tra queste si possono elencare l'americana NS Savannah, la nave cargo tedesca Otto Hahn, la giapponese Mutsu e la russa Sevmorput, quest'ultima l'unica ad essere ancora operativa in seguito ad un ammodernamento. Decisamente più successo hanno avuto le navi mercantili rompighiaccio russe; la diffusione dei reattori a fissione in questo tipo di nave è dovuto alle elevate potenze richieste (necessità di avanzamento rompendo strati di ghiaccio di spessore fino a 3 metri) e alle critiche condizioni di esercizio che possono richiedere lunghi periodi di tempo senza rifornimento. A tal proposito la nave rompighiaccio Lenin che fu varata nel 1957 fu la prima nave con propulsione nucleare in assoluto mai entrata in operazione. Nonostante il continuo rinnovamento e sviluppo delle navi rompighiaccio russe questo rimane un settore di nicchia

con requisiti che si discostano di molto da quelli della normale flotta mercantile; ad ogni modo si può evidenziare che i reattori a fissione hanno legami con il settore marittimo sin dagli anni 50' del secolo scorso.

Un secondo campo estremamente circoscritto in cui la propulsione nucleare ha trovato terreno fertile è quello delle piattaforme nucleari galleggianti. Si tratta di centrali nucleari trasportabili di taglia ridotta rispetto alle tradizionali centrali terrestri (dai 100 MWe fino agli 800 MWe) montate su grandi piattaforme galleggianti che hanno il compito di distribuire energia elettrica on-demand in zone del mondo particolarmente inospitali e isolate dalla rete. Risulta evidente che la fonte di cui si serve il sistema propulsivo sia proprio quella nucleare. Già alla fine degli anni 60' fu impiegato negli USA questo tipo di applicazione, mentre al giorno l'ultimo innovativo esempio di questo tipo è la piattaforma russa Akademik Lomonosov, operativa dal 2020; la piattaforma Lomonosov è peraltro la prima e per ora unica applicazione di SMR in campo navale. In altri Paesi, in primis Stati Uniti e Cina, sono attualmente attivi progetti mirati alla consegna sul mercato di reattori modulari destinati a piattaforme galleggianti; rendendo questo tipo di soluzione più accessibile al mercato globale si aprirebbero nuove prospettive anche relativamente al trasporto ed alla distribuzione di energia elettrica. Gli arricchimenti necessari per i reattori di navi civili non richiedono generalmente gli esasperati livelli di arricchimento richiesti dal settore militare. Per completezza si riportano in Tabella 2.1 le caratteristiche di alcune tra le navi nucleari commerciali citate.

Ship name	Ship type	Country	Reactor type	General particulars					Output (MW)	Built	Decommissioned
				LoA (m)	B (m)	D (m)	T (m)	∇ (GT)			
Mutsu	Cargo	Japan	PWR × 1	130.0	19.0	13.2	6.9	8242	36	1972	1996
Savannah	Container	USA	PWR × 1	181.5	23.8	15.2	9	13,599	80	1962	1977
Otto Hahn	Ore Carrier	Germany	FDR × 1	172.0	23.4	14.5	9.2	14,040	38	1968	1982
Sovetski Souz	Icebreaker	Russia	OK-900A × 2	149.7	28.1	15.7	9.0	23,000	171 × 2	1989	In service
Vaygach	Icebreaker	Russia	KLT-40M × 1	149.7	28.1	15.7	9.0	20,791	171	1989	In service
Taimyr	Icebreaker	Russia	KLT-40M × 1	151.8	29.2	15.2	8.1	20,791	171	1989	In service
Sevmorput	Icebreaker	Russia	KLT-40M × 1	260.0	32.0	18.3	12	33,900	135	1988	In service
Let Pobedy	Icebreaker	Russia	OK-900A × 2	159.6	30.0	17.2	11.1	23,439	171 × 2	2007	In service
Artika	Icebreaker	Russia	PWR × 2	147.9	29.9	17.2	11	20,665	171 × 2	1975	2008
Lenin	Icebreaker	Russia	PWR × 2	134.0	27.6	16.1	10.5	19,240	159 × 2	2008	1989

Tabella 2.1 – Caratteristiche di alcune tra le più note navi nucleari commerciali

2.2.3 Caratteristiche impianti nucleari navali

Come già accennato vi sono più tipologie di impianto e per ogni tipo di impianto vi sono reattori differenti. Una prima considerazione da fare è che avrà dei risvolti progettuali degni di nota è il peso elevato degli impianti propulsivi nucleari rispetto ai tradizionali sistemi propulsivi navali. La tipologia di reattore che storicamente ha avuto più successo in campo propulsivo è il PWR, quindi ci si sofferma principalmente su di esso; nonostante si parli sempre di reattore pressurizzato bisogna però considerare che nell'arco degli anni sono stati sviluppati dei concept design sempre più all'avanguardia passando dagli ormai obsoleti reattori di II generazione ai più moderni reattori di III/III+ generazione. Lo scopo non è quello di descrivere come funziona un impianto ma piuttosto di evidenziarne le peculiarità,

soprattutto in comparazione con impianti tradizionali di grossa taglia. La netta imposizione dei reattori pressurizzati sui bollenti in ambito navale è dovuta a più di una motivazione: innanzitutto la densità di potenza dei PWR è circa doppia rispetto a quella dei BWR e come già detto questo è un requisito importante per la propulsione navale. In secondo luogo la presenza delle sollecitazioni dovute al moto ondoso mal si adatta ad un impianto che lavori con vapore all'interno del core e delle tubazioni; inoltre come già noto per le centrali nucleari terrestri l'assenza di un secondario rende il personale operativo più esposto ad eventuali radiazioni e questa è un'eventualità da evitare in condizioni complesse come quelle di viaggio in mare.

L'impianto viene costruito all'interno di una sezione apposita denominata *compartment reactor* (vano reattore). I componenti dell'impianto lato nucleare sono gli stessi di una tradizionale centrale, vale a dire un vessel che racchiude il core, tubazioni primarie, pressurizzatore, scambiatori di calore (generatori di vapore), pompe per la circolazione del refrigerante (acqua leggera), valvole. Vi è poi la schermatura costituita da piombo.

Per rendere l'idea delle dimensioni di un reattore si riportano in Tabella 2.2 i dati del reattore montato sul convoglio Sevmorput.

	Altezza [m]	Diametro [m]
Vessel	4,6	1,8
Core	1	1,2

Tabella 2.1 – Dimensioni reattore montato su Sevmorput

La Tabella 2.2 mostra inequivocabilmente le ridotte dimensioni di questo reattore che genera una potenza termica di 135 MWt. Non indifferente caratteristica dei PWR installati su imbarcazioni è la ridotta efficienza causata dalle necessità di lavorare spesso a carichi parziali. Questo aspetto potrebbe essere parzialmente superato dalla propulsione con motore elettrico che introduce comunque delle difficoltà in termini di stoccaggio dell'energia elettrica stessa. Il circuito primario è costituito da almeno due loop chiusi ed al suo interno circola acqua leggera opportunamente purificata; è estremamente importante la presenza di un impianto di desalinizzazione in quanto i componenti risulterebbero soggetti ad aggressivi fenomeni corrosivi da parte di acqua radioattiva e non desalinizzata, fenomeno ancora più accentuato in ambito marino. Il concetto di ridondanza è implementato al fine di rendere indipendenti i loop del circuito primario con le relative pompe e generatori di vapore. Come noto l'utilizzo di acqua leggera pressurizzata come refrigerante consente di avere un benefico effetto di autoregolazione al variare della domanda da parte del circuito secondario; un aumento della potenza termica prelevata dal generatore infatti provoca una diminuzione di temperatura del refrigerante all'uscita dello stesso, un conseguente aumento di densità all'interno del core che determina un aumento del rapporto di moderazione ed una maggior potenza erogata dal reattore come richiesto dal secondario tendendo ad un punto di equilibrio stabile del sistema. Tale caratteristica, già molto apprezzata nelle centrali nucleari è decisamente benefica per un sistema che per natura non lavora a punto fisso come quello propulsivo. La normale regolazione della potenza avviene variando la portata elaborata dalle pompe di circolazione che consentono in questo modo di variare la reattività all'interno del core. Per variazioni di carico più drastiche il controllo della reattività avviene utilizzando le barre di controllo, così come nelle fasi di avviamento e di spegnimento del reattore.

Bisogna tenere presente che di norma viene sempre utilizzato un generatore ausiliario Diesel che consente in condizioni di reattore spento di fornire potenza elettrica ed un generatore di emergenza nonché un sistema di stoccaggio di energia elettrica. Di seguito viene raffigurato un tipico schema d'impianto PWR per applicazione navale.

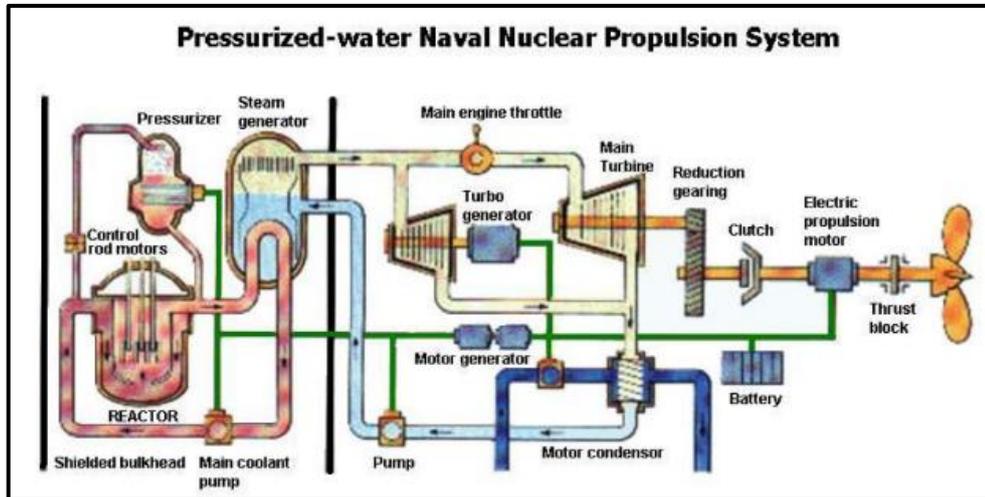


Fig 2.7 – Impianto PWR di sottomarino della marina militare britannica

Come si evince dalla Figura 2.8, parte del vapore alimenta la turbina principale che trascina direttamente l'elica; parte del vapore prodotto invece alimenta una turbina che non è collegata all'albero di propulsione bensì ad un generatore che alimenta le utenze necessarie tra le quali i riscaldatori del pressurizzatore, le pompe di circolazione del primario ed i sistemi di controllo del core. Vi è inoltre una batteria di stoccaggio.

Come già anticipato, una non trascurabile criticità operativa dei propulsori nucleari è quella dell'accumulo dello Xenon. Lo Xe^{135} è un potentissimo veleno neutronico (la sua sezione d'urto di cattura con assorbimento è molto più alta di quella di fissione) ed un suo eccessivo accumulo nel reattore riduce la reattività impedendo l'autosostentamento della reazione a catena. Quando il reattore incontra momenti operativi di bassi tassi di fissione e quindi di bassa potenza la dinamica di formazione dello Xe^{135} in seguito al decadimento beta dello I^{135} fa sì che si verifichi un forte aumento della concentrazione di veleno neutronico, portando di fatto allo spegnimento del reattore ed all'impossibilità di riavviarlo fino a che la concentrazione di Xenon non scenda al di sotto di una certa soglia. La dead time del reattore per tradizionali reattori a basso arricchimento si aggira intorno alle 40 ore mentre per reattori navali ad alto arricchimento la dead time si riduce drasticamente fino ad annullarsi per livelli di arricchimento molto alti.

I reattori veloci refrigerati a piombo-bismuto ebbero pochissime applicazioni (8 sottomarini Alfa-class sovietici tra gli anni 70' e gli anni 90') a causa delle problematiche operative derivanti dalla gestione del refrigerante metallico, ancora molto complesse da superare per i tempi; ancora meno successo ebbero i reattori refrigerati a sodio. Le prospettive tecnologiche della IV generazione hanno riportato a galla la possibilità di utilizzare i reattori veloci con refrigerante metallico, il che consentirebbe di superare le criticità e sfruttarne i vantaggi.

3. Small Modular Reactors (SMRs)

3.1 Generalità e aspetti tecnologici sugli SMR

Gli SMR (reattori modulari compatti) sono reattori nucleari avanzati che forniscono potenze elettriche fino a 300 MW_e. Sono fisicamente di piccola taglia (Small) rispetto ai tradizionali reattori; sono modulari (Modular), il che significa che è possibile costruire i vari componenti (tipicamente standardizzati) in fabbrica, assemblarli e trasportarli nel sito di installazione. La novità, nonché uno dei punti di forza di questi reattori risiede proprio nella loro taglia e nella modularità: questi due aspetti comportano notevoli semplificazioni nella catena di produzione, nella progettazione e nella fabbricazione che si riflettono in una intrinseca semplicità e ripetibilità rispetto alle opere di costruzione di grandi impianti, nonché in una netta riduzione dei tempi di costruzione. Possono essere installati in maggior numero nello stesso sito in modo da incrementare gradatamente la potenza installata e a ciò si lega il fatto che è possibile gradatamente sostituire impianti a combustibile fossile con delle unità di SMR. Possono rendersi particolarmente competitivi nel soddisfare la domanda elettrica di zone poco accessibili che non si adattano alla costruzione di grandi impianti che necessitano di non indifferenti infrastrutture correlate alla rete elettrica; quest'ultimo aspetto rende particolarmente promettenti la sottocategoria dei microreattori modulari di poche decine di MW_e di potenza.

Il design di questi reattori è semplice e ha già fin dal progetto il target della sicurezza intrinseca e passiva (safety by design); ciò significa che i sistemi di sicurezza non sono complessi e dipendenti dalla funzionalità della linea elettrica e/o dagli operatori bensì sono basati su fenomeni fisici che non necessitano né di alimentazione né di interventi esterni per la loro effettività. Questo aspetto, oltre che avere un risvolto benefico sui costi può anche avere una risonanza positiva sull'opinione pubblica.

Ulteriore caratteristica che li distingue positivamente dai reattori di grossa taglia è la minor frequenza del refuelling che per alcune tipologie di SMR può arrivare anche ad una ogni 30 anni [6].

Alcune delle applicazioni potenziali degli SMR potrebbero essere:

- elettricità in rete;
- elettricità fuori dalla rete,
- calore per il settore industriale;
- calore per edifici;
- fornitura di acqua potabile;
- desalinizzazione;
- produzione di idrogeno e/o di combustibili sintetici;
- propulsione navale.

Vale la pena evidenziare che normalmente un singolo SMR si può sfruttare contemporaneamente per più di uno degli scopi appena elencati.

È importante notare che non necessariamente un reattore di piccola taglia rientra automaticamente nella definizione di SMR; nel capitolo precedente si è parlato di reattori per propulsione navale che furono sviluppati sin dagli anni 50' ma questi non contemplavano

nella loro logica progettuale tutti gli aspetti appena descritti, peculiari dei reattori modulari. Questo, come verrà esposto in seguito, rappresenta una differenza che non solo è basata su aspetti tecnologici ma si riflette anche su aspetti economici.

Di seguito vengono descritti i principali vantaggi dei reattori modulari:

- **Sicurezza:** sono progettati sulla base dell'esperienza di oltre sessant'anni di funzionamento di centrali nucleari convenzionali ed implementano nelle loro logiche di funzionamento sistemi di sicurezza avanzati ed una maggior flessibilità. Utilizzano sistemi passivi ed intrinsecamente sicuri e dunque non richiedono sistemi attivi di sicurezza e potenza elettrica di riserva necessaria. Ciò ha una diretta conseguenza anche sulla semplicità del progetto e di esercizio. Questi aspetti si ripercuotono su una maggior facilità della scelta del sito in quanto verrebbero notevolmente ridotti e semplificati le off-site emergency planning zones (EPZ)
- **Flessibilità:** viene definita flessibilità "l'abilità dell'energia nucleare di fornire servizi all'orario e nel luogo richiesti dall'utilizzatore finale..." [7]. Gli SMR sono progettati per garantire un'ottima flessibilità a supporto delle fonti rinnovabili nella fornitura di energia elettrica. Facendo leva sulla possibilità degli impianti multi-unità, gli SMR migliorano notevolmente la capacità di adattarsi alla struttura della rete
- **Competitività:** anziché puntare sull'approccio dell'economia di scala, da sempre utilizzato nell'ambito delle grandi centrali, gli SMRs ben si adattano all'economia di serie. Tale concetto già ampiamente applicato nell'industria navale ed aeronautica consiste nel creare una filiera di distribuzione efficiente ed un'industria specializzata nel settore dei reattori compatti [8]
- **Gestione del combustibile esausto:** una delle criticità da sempre esistente nel settore è quella della gestione del ciclo del combustibile. Numerosi progetti di SMR si adattano all'utilizzo di combustibile alternativo (in modo particolare i reattori a spettro veloce) derivante dal riprocessamento di combustibile esausto; questo approccio (che è uno dei concetti chiave alla base della sostenibilità della IV generazione) consentirebbe un'ottimizzazione della gestione dei rifiuti nucleari.

3.2 Prospettive e sviluppi futuri

Ad oggi le opzioni tecnologiche sulle quali gli investimenti stanno avanzando progetti di ricerca sono: reattori ad acqua leggera, reattori veloci, reattori ad alta temperatura moderati a grafite, reattori a sali fusi (alcuni dei quali sono a spettro veloce). I primi citati sono anche i più affidabili e più noti, ma, come si vedrà, ogni tipologia ha dei vantaggi che giustificano lo sforzo nel percorso verso il loro sviluppo fino al loro ingresso sul mercato.

Oggi vi sono oltre 80 progetti, alcuni dei quali sono in fase pre-progettuale, altri in attesa di licenza, altri ancora sono già stati approvati. La NEA ha selezionato in particolare 21 progetti che spiccano per la loro affidabilità, il loro stato di completamento nel percorso di approvazione e la loro ottimistica prospettiva in vari campi del mercato globale (Figura 3.1). La NEA ha messo in luce come oltre all'aspetto della fattibilità tecnica sia necessario perseguire parallelamente un avanzamento anche nelle seguenti dimensioni: licensing,

ricerca di siti appropriati (siting), finanziamenti, catena produttiva e fabbricazione, engagement (inteso come miglioramento del rapporto con l'opinione pubblica) e ciclo del combustibile. L'obiettivo è quello di rendere gli SMR competitivi attraverso un'economia

Name	Design organisation	Headquarter (city/region)	Country	Thermal power (MWth)	Outlet temperature (°C)	Spectrum (thermal/fast)	Fuel type
ARC-100	ARC Clean Technology	Saint John, New Brunswick	Canada	286	510	Fast	Metallic UO ₂
CAREM	CNEA ¹	Buenos Aires	Argentina	100	326	Thermal	UO ₂ pellets
ACPR50S	CGN ²	Shenzhen	China	200	321.8	Thermal	UO ₂ pellets
ACP100	CNNC ³ and NPIC ⁴	Hainan Province	China	385	319.5	Thermal	UO ₂ pellets
Nuward	EDF ⁵	Paris	France	540	307	Thermal	UO ₂ pellets
BWRX-300	GE-Hitachi/Hitachi-GE	Wilmington, North Carolina	United States	870	287	Thermal	UO ₂ pellets
Hermes	Kairos Power	Alameda, California	United States	35	585	Thermal	TRISO pebble
SEALER-55	Leadcold Reactors	Stockholm	Sweden	140	432	Fast	Metallic UO ₂
Stable Salt Reactor - Wasteburner	Moltex Energy	Saint John, New Brunswick	Canada	750	590	Fast	Molten salt fuel
VOYGR	NuScale Power	Portland, Oregon	United States	250	321	Thermal	UO ₂ pellets
Aurora	OKLO	Sunnyvale, California	United States	4	500	Fast	Metallic UO ₂
Rolls-Royce SMR	Rolls-Royce SMR Ltd	Manchester	United Kingdom	1 358	325	Thermal	UO ₂ pellets
KLT-40S	Rosatom	Moscow	Russia	150	316	Thermal	UO ₂ pellets
RITM-200N	Rosatom	Moscow	Russia	190	321	Thermal	UO ₂ pellets
RITM-200S	Rosatom	Moscow	Russia	198	318	Thermal	UO ₂ pellets
Sodium	TerraPower	Bellevue, Washington	United States	840	500	Fast	Metallic UO ₂
HTR-PM	INET ⁶	Beijing	China	500	750	Thermal	TRISO pebble
MMR	Ultra Safe Nuclear	Seattle, Washington	United States	15	630	Thermal	TRISO prismatic
U-Battery	Urenco	Stoke Poges	United Kingdom	10	710	Thermal	TRISO prismatic
eVinci	Westinghouse Electric Company	Cranberry Township, Pennsylvania	United States	13	750	Thermal	TRISO
XE-100	X-energy	Rockville, Maryland	United States	200	750	Thermal	TRISO-X pebble

(1) Argentina's National Atomic Energy Commission; (2) China General Nuclear Power Group; (3) China National Nuclear Corporation; (4) Nuclear Power Institute of China; (5) Electricité de France; (6) Tsinghua University Institute of Nuclear and New Energy Technology.

Figura 3.1 - SMRs valutati nella NEA dashboard

di serie. Sono stati effettuati studi che dimostrerebbero un reale beneficio economico della produzione in fabbrica anziché direttamente nel sito di installazione [9]. Chiaramente sarà possibile sfruttare questo tipo di aspetto con una massiva produzione di reattori, che di fatto consentirebbe un abbattimento dei costi. Una novità è quella dell'entrata di numerosi attori privati all'interno di questo settore; l'interesse verso questo tipo di tecnologia sta attirando numerosi investitori che non hanno a che vedere con organismi governativi e che possono dare un notevole contributo nello sviluppo e nella distribuzione degli SMR. Questo sforzo privato è un chiaro segnale che gli SMR possono rappresentare una soluzione tecnologica realizzabile ed economicamente percorribile verso la decarbonizzazione. Tale considerazione, ovviamente, non può però prescindere dalla necessità di prendere decisioni politiche forti e comuni da parte dei governi e degli organismi internazionali. Per questo motivo sono di fondamentale importanza gli aspetti regolatori e politici che devono essere opportunamente rivisti; questo passaggio non è per nulla banale perché richiede una

profonda conoscenza della tecnologia sul mercato. Ogni Paese ha delle regolamentazioni a sé e questo potrà determinare delle sostanziali differenze nella competitività economica a seconda dell'area geografica. Ad ogni modo, nonostante una completa armonizzazione in campo regolatorio e del licensing non sia possibile a livello internazionale sarebbe opportuno andare verso quella direzione.

Un ruolo fondamentale è ricoperto dai dimostratori e dagli impianti pilota che hanno il ruolo di dimostrare la reale competitività; vi sono numerosi aspetti tecnologici innovativi che hanno bisogno di essere validati attraverso l'operatività di un impianto e su cui è necessario acquisire esperienza. Questo passaggio aiuterebbe inoltre l'arrivo di nuovi investimenti nel settore. Vengono individuate in prospettive due linee di distribuzione di SMR:

1. SMR tecnologicamente pronti e con un processo di licenze in stato avanzato, potenzialmente in entrata a breve-medio termine (2030'-2040'), i quali giocheranno un ruolo centrale nel processo di decarbonizzazione verso gli obiettivi del 2050
2. SMR ancora indietro nella trafila progettuale e di licensing che potranno dare un contributo oltre che nella produzione di energia elettrica, calore e idrogeno anche nella sostenibilità a lungo termine ottimizzando il ciclo del combustibile

Tra i reattori attualmente in stato di maggior avanzamento vi è una vasta gamma di concept progettuali con potenzialità di applicazione diverse, con differenti potenze in output, temperature operative, arricchimenti, tecnologie utilizzate e cicli del combustibile; alcuni di essi si rifanno all'esperienza della ben nota tecnologia dei LWR mentre altri sono basati su concept progettuali più avanzati come quelli dei reattori a spettro veloce o ad alta temperatura. Di seguito (Figura 3.2 e Figura 3.3) vengono riportate due immagini che rendono l'idea della varietà disponibile.

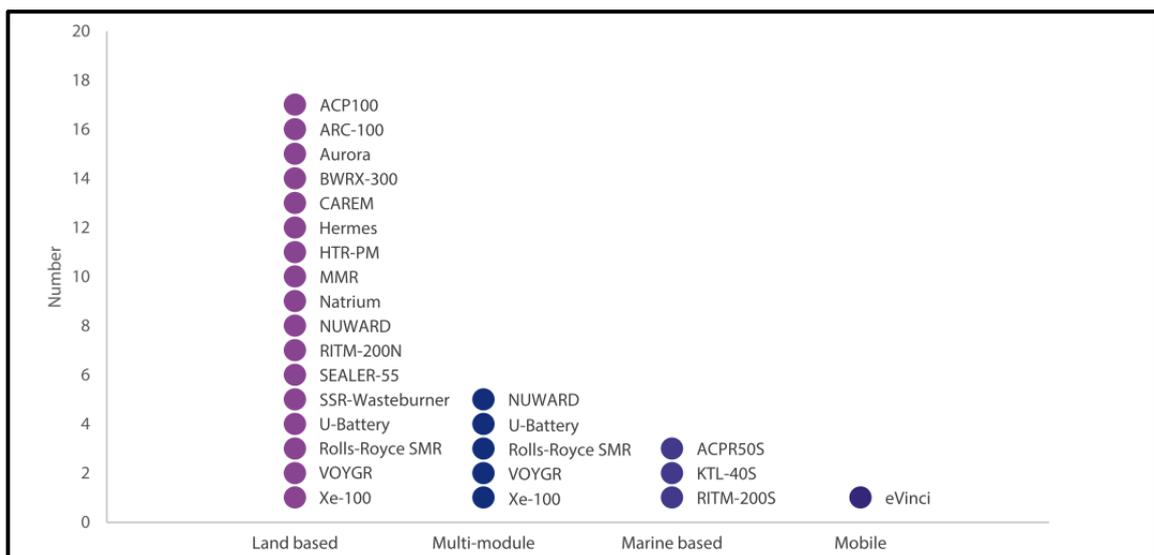


Figura 3.3 – SMRs suddivisi per concept

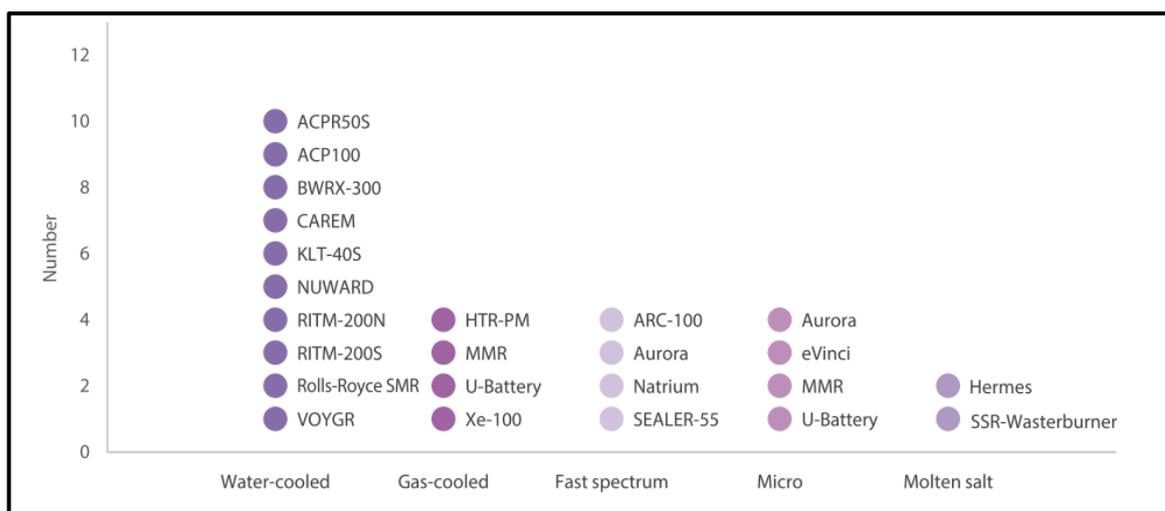


Figura 3.4 – SMRs suddivisi per tecnologia

3.3 SMRs per applicazioni navali

Ci si sofferma in questo paragrafo sui reattori modulari studiati con la finalità di soddisfare le richieste energetiche di convogli marittimi. Attualmente i reattori più studiati sono i cosiddetti *marine-based SMRs*, pensati per diventare delle centrali nucleari trasportabili su piattaforme galleggianti, ma vi sono svariati design di SMR finalizzati all'installazione su vere e proprie navi. Si può iniziare con una prima classificazione come segue:

1. **LWR:** derivano dall'enorme esperienza maturata nel campo dei reattori termici refrigerati con acqua leggera
2. **FNR:** i reattori a spettro veloce refrigerati con metalli fusi hanno delle grandi potenzialità in campo propulsivo grazie alla loro compattezza rispetto ai reattori termici. Già noti da tempo, anche in campo propulsivo, sono oggetto delle ricerche relative alla IV generazione e molto promettenti soprattutto per la capacità di ottimizzare il ciclo del combustibile
3. **HTR:** reattori ad alta temperatura refrigerati a gas e moderati a grafite. Non commercialmente molto diffusi ma hanno riscosso un grande successo soprattutto per la loro elevata sicurezza intrinseca e per il fatto di mettere a disposizione energia a temperature elevate disponibile per applicazioni alternative (cogenerazione, idrogeno, desalinizzazione)
4. **MSR:** reattori avanzati a sali fusi a spettro veloce o termico. Sono ancora distanti in termini di pre-licensing e con delle criticità notevoli a livello operativo; sono anch'essi facenti parte della IV generazione e sono oggetto di numerosissime ricerche per le loro potenzialità in termini di ottimizzazione e chiusura del ciclo di combustibile. Nonostante la loro maggior distanza dall'entrata nel mercato vengono citati in quanto negli ultimi anni vi sono stati numerosi investimenti e la

start-up inglese CorePower è in prima linea sullo sviluppo tecnologico di questi reattori in campo navale [10]

3.3.1 KTL-40S

Attualmente è l'unico SMR utilizzato per propulsione navale sulla piattaforma russa Akademik Lomonosov, operativa dal 2020. È sostanzialmente un pressurizzato sviluppato da Rosatom con un output termico di 150 MW ed elettrico di 70 MW. Il KTL-40S è stato sviluppato principalmente sulla scorta dell'esperienza del KLT-40M montato su navi rompighiaccio russe. Akademik Lomonosov è composto da due unità con fini di produzione di energia elettrica e cogenerativi. Il combustibile utilizzato è composto da UO_2 catalogato come HALEU (High-Assay Low-Enriched Uranium) che per definizione ha un arricchimento compreso tra il 5% e il 20% [11]. Di seguito, in Figura 3.5 è rappresentato il layout dell'impianto, lato primario.

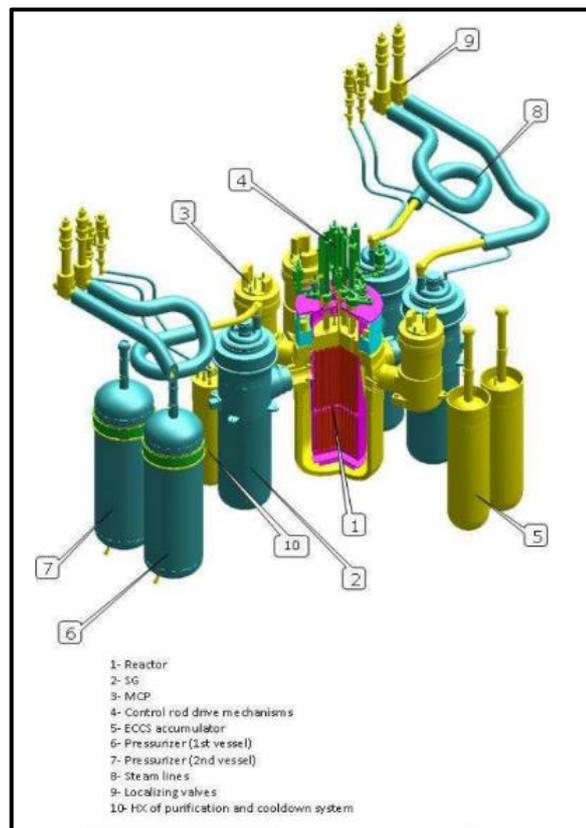


Figura 3.5 – Layout impianto KLT-40S, lato primario

3.3.2 ACPR-50S

Reattore ad acqua pressurizzata sviluppato da *China General Nuclear Power Group (CGN)*, è in grado di erogare 200 MW di potenza termica. Pensato per far parte di un impianto nucleare galleggiante (FNPP – Floating Nuclear Power Plant). Attualmente è in fase di completamento il dimostratore. Il progetto è basato sull'omologo modello di reattore modulare per applicazione terrestre (*land-based*). Il combustibile utilizzato è del tipo a basso arricchimento (LEU - Low Enriched Uranium). Di seguito in Tabella 3.1 si riportano le specifiche tecniche del reattore [12].



Figura 3.6 – Render della piattaforma nucleare progettata da CGN

Reattore	ACPR50S
Potenza termica	200 MWt
Potenza elettrica	~ 60 MWe
Intervallo refueling	2,5 anni
Life time	40 anni
Temperatura media refrigerante	310 °C
Pressione primario	15,5 MPa
Arricchimento	<5%
Controllo reattività	<ul style="list-style-type: none">• 16 barre di controllo Ag-In-Cd• Veleno bruciabile solido (Gd)
Tipo di generatore di vapore	2 x scambiatori a tubi elicoidali a singolo passaggio (Once-through)
Pompe principali primario	2 x Canned-motor pumps

Tabella 3.1 – Specifiche tecniche ACPR50S

3.3.3 RITM 200S e RITM 400

Deriva dall'esperienza del reattore di III⁺ generazione RITM 200 utilizzato per la propulsione di navi rompighiaccio. Sviluppato da Rosatom rappresenterà l'upgrade del KTL-40S presente su Akademik Lomonosov. Il progetto prevede una nuova piattaforma che dovrà fornire energia allo stabilimento minerario di Baimskaya, nei pressi dello stretto di Bering. Parallelamente si sta sviluppando un omologo reattore più potente, il RITM 400 che rappresenterà la fonte termica per la nuova serie di navi rompighiaccio. Di seguito in Figura 3.7 e Tabella 3.2 vengono raffigurati il reattore RITM 400 ed una scheda delle sue caratteristiche tecniche.

Other technical features of RITM-400 RU	
Thermal power, MW	315
Steaming capacity, t/h	450
Steam temperature, °C	295
Steam pressure, MPa	3,8
Feed water temperature, °C	105
Core energy content, TWh	6,0
Rate of change of capacity (normal/allowable), % Nnom/s	0,1/1,0
Service life before disposal, h	320 000
Lifetime of replaceable equipment, years	20
Service life before renovation, h	160 000
Unit mass of two RUs, t	3920
Unit dimensions of two RUs, m	9 × 18,2 × 17,5



Tabella 3.2 – Specifiche tecniche RITM 200S

Figura 3.7 – RITM 200S

3.3.4 mPower

Reattore modulare pressurizzato sviluppato da Generation mPower LLC (USA) con un output di 195 MW_e. Viene citato in quanto designato dalla Royal Academy of Engineering [13] come uno degli SMR che si possono adattare alla propulsione navale mercantile, nonostante il suo concept progettuale nasca per produzione di energia elettrica, cogenerazione e/o desalinizzazione. È un PWR integrale il che significa che contempla la presenza dei generatori di vapore all'interno dello stesso modulo. Di seguito viene riportata la Tabella 3.3 che riassume i principali parametri tecnici, affiancati ad una raffigurazione del reattore.



MAJOR TECHNICAL PARAMETERS	
Parameter	Value
Technology developer, country of origin	BWX Technologies, Inc., United States of America
Reactor type	Integral PWR
Coolant/moderator	Light water / Light water
Thermal/electrical capacity, MW(t)/MW(e)	575 / 195
Primary circulation	Forced circulation
NSSS Operating Pressure (primary), MPa	14.8
Core Inlet/Outlet Coolant Temperature (°C)	290.5 / 318.9
Fuel type/assembly array	UO ₂ pellet / 17x17 square
Number of fuel assemblies in the core	69
Fuel enrichment (%)	< 5
Core Discharge Burnup (GWd/ton)	< 40
Refuelling Cycle (months)	24
Reactivity control mechanism	Control rods
Approach to safety systems	Passive
Design life (years)	60
Plant footprint (m ²)	157 000
RPV height/diameter (m)	27.4 / 4.15
Seismic Design (SSE)	0.3g
Distinguishing features	In-vessel control rod drives mechanism
Design status	Conceptual design

Tabella 3.3 – Specifiche tecniche mPower

3.3.5 MRX (Marine Reactor X)

Reattore pressurizzato integrale sviluppato da JAERI (Japan Atomic Energy Research Institute), il quale nacque con l'idea di rivoluzionare l'esperienza fallimentare della nave nucleare Mutsu sotto l'aspetto economico. Fornisce 100 MW di output termico ed è appositamente pensato per propulsione navale civile nonostante sia riadattabile per utilizzi più convenzionali. Dal momento in cui il suo concept design risale all'anno 1996 ad oggi non racchiude appieno tutte le logiche tecnologiche dei reattori modulari compatti. Nonostante ciò sicuramente l'MRX contiene molti dei principi fondanti degli SMR: modularità con l'obiettivo di un'economia di serie, sistemi passivi di sicurezza tipici della III⁺ generazione, attività operative semplici e meno operatore-dipendenti [14]. Un aspetto particolarmente innovativo, già accennato nei capitoli precedenti, è quello di rivoluzionare il trasporto marittimo attraverso vascelli in grado di raggiungere velocità molto più elevate rispetto alle tradizionali navi con motori diesel; in questo caso la necessità di risparmiare carburante viene meno e la velocità dell'imbarcazione non gioca più un ruolo cruciale sul consumo di combustibile. Di seguito in Figura 3.8 e Figura 3.9 alcune immagini descrittive dell'impianto e del reattore.

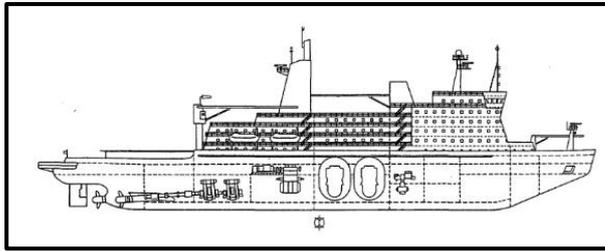


Figura 3.8 – Illustrazione esplicativa di due MRX su nave rompighiaccio [14]

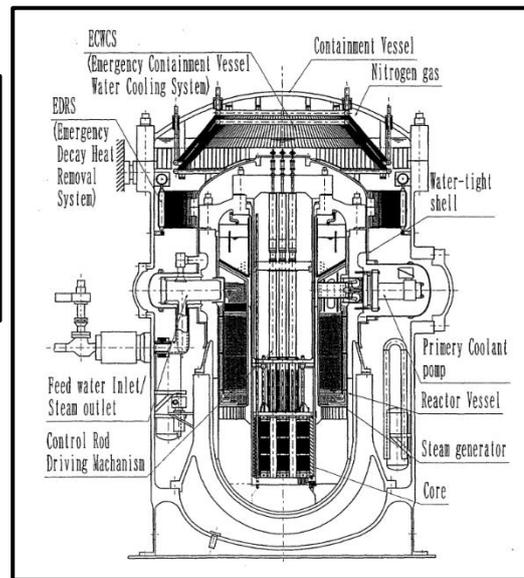


Figura 3.9 – Disegno del MRX

3.3.6 NEREUS

NEREUS [15] (Naturally safe, Efficient, Reactor, Easy to operate, Ultimately simple, Small) è un reattore ad alta temperatura refrigerato a gas. Si tratta della versione a 20 MW_t (8 MW_e) dell'impianto HTR refrigerato a elio e moderato a grafite sviluppato in Germania. Nella filosofia di questo reattore pebble-bed progettato alla fine degli anni 90' vi era espressamente anche la possibilità di renderlo disponibile per la propulsione navale data la sua piccola taglia. Anche in questo caso nelle logiche progettuali del reattore non vi sono tutti i dettami peculiari degli SMR ma è interessante citarlo in quanto rappresenta la base per tutti i progetti futuri di HTR e VHTR che si vogliono avvicinare ad applicazioni propulsive. L'HTR di tipo pebble-bed infatti è un reattore che ha avuto modo di essere ampiamente studiato e provato in particolare in Cina e Sud-Africa. NEREUS fu approfonditamente studiato e fu particolarmente apprezzato non tanto per la sua reale applicazione quanto per poter provare la competitività tecnologica dei reattori a gas ad alta temperatura nel settore navale; fra le altre, una grande novità sarebbe stata la possibilità di utilizzare le turbine a gas per scopo propulsivo diversamente da tutte le altre applicazioni nucleari che si servivano di turbine a vapore.

3.3.8 CorePower MCR

È un reattore a sali fusi in fase di studio e sviluppo da parte di Core Power, una start up britannica che ha come principale scopo quello di sviluppare tecnologie nucleari in ambito marittimo; è ancora piuttosto lontano nelle varie tappe di design e si stima che il primo dimostratore sarà pronto non prima del 2025. Non si hanno ancora dati dettagliati in relazione al progetto ma si tratta di un reattore MCR (Molten Chloride Reactor) e rappresenta una tipologia di reattore avanzato con caratteristiche della IV generazione; ha come

principale obiettivo l'utilizzo su navi per propulsione e su piattaforme per propulsione/distribuzione di energia elettrica. Il suo progetto deriverà dalla collaborazione con svariate compagnie e fondi di finanziamento, in primis TerraPower; il reattore verrà appunto sviluppato a partire dall'esperienza di TerraPower la quale ricopre un ruolo di spicco nello sviluppo e nella ricerca di reattori a sali fusi. Nel prossimo capitolo verranno esposti i motivi per cui questa tecnologia è ritenuta promettente ma anche i motivi per cui ad oggi rimane ancora la più distante in termini di fattibilità a breve termine. In Figura 3.10 un'immagine illustrativa del progetto di CorePower.



Figura 3.10 Render di nave portacontainer, per possibile applicazione del MCR CorePower [10]

3.3.8 MicroURANUS

Reattore a spettro veloce refrigerato a piombo-bismuto (LBR – Lead-bismuth cooled reactor) in fase di sviluppo da parte dell'istituto di ricerca sud coreano UNIST. Può contare di una potenza elettrica di 20 MW e ha come principale obiettivo quello di essere distribuito come reattore a fini propulsivi per navi mercantili. Per raggiungere tale scopo è studiato appositamente per non avere bisogno delle operazioni di refueling, che sarebbero necessarie dopo circa 40 anni, cioè di fatto alla fine della sua vita operativa. I sistemi di sicurezza passivi sono studiati per raggiungere il massimo grado di affidabilità in scenari catastrofici in mezzo

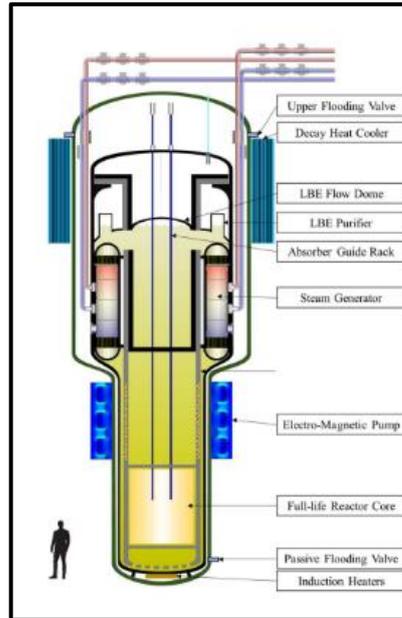


Figura 3.11 – Reattore LBR MicroUranus

al mare. Si stima che intorno al 2028 possa iniziare la costruzione del primo dimostratore [16].

3.3.9 Gen4 Energy SMR

Questo reattore compatto refrigerato a piombo-bismuto è stato sviluppato dall'americana Gen4 Energy; il reattore, con un output elettrico di 25 MW, un diametro di 1.5 m ed un'altezza di 2.5 m si dimostra particolarmente vantaggioso per scopi propulsivi, anche grazie agli elevati standard di sicurezza passiva ed all'intervallo di refueling di circa un decennio. Molte delle sue caratteristiche hanno portato Lloyd's Register³ ad intraprendere uno studio in collaborazione con Gen4 Energy riguardo all'applicabilità del suddetto reattore per fini propulsivi su navi di tipo cisterna.

3.4 Conclusioni

La panoramica esposta relativa agli SMR e alle sue possibili soluzioni in campo navale a questo punto della trattazione consente di comprendere quali potrebbero eventualmente le tecnologie che meglio si adattano a tale scopo; tutti gli aspetti considerati in questo capitolo verranno considerati nel prossimo capitolo, che invece avrà un'impostazione più energetico-impiantistica e dove l'obiettivo sarà di selezionare le migliori tecnologie per lo scopo desiderato.

³ È un'organizzazione britannica non governativa di classificazione marittima, di consulenza ingegneristica e finanziaria. Ha come finalità per i propri clienti la promozione della sicurezza, lo sviluppo e il miglioramento delle performance dei progetti e della sostenibilità ambientale.

4. Aspetti tecnologici della propulsione con SMRs

L'obiettivo del seguente capitolo è quello di comprendere in quale modo sia possibile accoppiare la tecnologia nucleare con la propulsione navale. In una prima parte verranno fatte considerazioni generali riguardanti l'accoppiamento dei reattori SMR ed i sistemi della nave. Verranno successivamente selezionati gli impianti nucleari che meglio si adattano a tale scopo e verranno fatte valutazioni su quali soluzioni tecnologiche è possibile implementare a seconda delle necessità dell'imbarcazione e di quello che il reattore è in grado di offrire. A tale scopo vengono presi in considerazione le tipologie di SMR che per differenti motivi hanno caratteristiche adeguate alla propulsione, in particolare: PWR, HTR/VHTR, MSR, LFR. Ognuna di queste ha dei vantaggi e delle criticità in relazione alla propulsione navale, dunque è possibile che determinate tipologie di imbarcazione si adattino bene ad un reattore che invece non è ottimizzato per un altro tipo di vascello. In un paragrafo a parte verrà discussa inoltre la prospettiva tecnologica relativa alle *All electric ships*, il cui futuro è strettamente legato anche alla tecnologia nucleare.

4.1 Considerazioni specifiche per navi con propulsione nucleare

4.1.1 Propulsione

I due sistemi propulsivi che è possibile utilizzare sono il *Fuel-direct* e il *Fuel-electric*. Di seguito viene spiegata la differenza e proposta la soluzione che si adatta a seconda dei casi.

Nel *Fuel-direct* il motore⁴ principale trascina direttamente l'albero motore a fini propulsivi, con unico intermezzo il riduttore di velocità (gearbox), mentre dei motori ausiliari ed indipendenti alimentano dei generatori elettrici che dovranno soddisfare la richiesta elettrica della nave. La fonte termica proviene comunque dallo SMR che però suddivide il proprio output termico a seconda dell'utilizzo. I vantaggi e gli svantaggi di questa soluzione sono [17]:

Vantaggi:

- Elevata efficienza in condizioni di design dovuta a minori perdite per conversione energetica; la propulsione avviene direttamente
- Costo inferiore dovuto alla maggior semplicità dei sistemi richiesti

Svantaggi:

- Efficienza sfavorevole in funzionamento a carico parziale
- Vincoli legati al layout dell'impianto in quanto il motore essendo direttamente legato all'albero, dev'essere collegato direttamente ad esso

⁴ Da questo punto in avanti ogni qual volta si utilizzerà il termine "motore" si intende un sistema in cui il motore primo sia una turbina (a vapore o a gas) la cui fonte di calore sia quella nucleare.

Nella seconda opzione proposta, *Fuel-electric* i motori alimentano i generatori che forniscono potenza elettrica. Tale potenza elettrica verrà opportunamente distinta: una parte di essa fornirà energia ai motori elettrici per la propulsione, mentre l'altra parte verrà distribuita alla rete elettrica della nave per tutte le sue necessità. Di seguito vengono descritti i pro e i contro di questa soluzione.

Vantaggi:

- Flessibilità nel layout dell'impianto propulsivo: i generatori possono essere posizionati in qualsiasi zona della nave senza necessità di rimanere in linea con l'albero e le turbine possono essere posizionate trasversalmente in modo da ottimizzare gli spazi
- Buona efficienza anche a carico parziale grazie alla distribuzione del carico sui generatori; nel caso precedente si aveva un solo motore principale che in condizioni di off-design poteva subire delle forti variazioni di carico, le quali adesso vengono ripartite in maniera più efficiente

Svantaggi:

- Minor efficienza a pieno carico per via delle maggiori perdite di conversione energetica
- Maggior costo dovuto alla maggior complessità del sistema

Bisogna tenere in considerazione inoltre tre aspetti significativi in relazione alla presenza dello SMR come fonte termica primaria; come già discusso precedentemente è bene che il reattore lavori il meno possibile a carico parziale per via dell'accumulo di Xe; pertanto la soluzione *Fuel-electric* consentirebbe, grazie all'utilizzo di batterie per lo stoccaggio di energia elettrica, di ridurre questa problematica, garantendo un picco di potenza laddove richiesto ed accumulando energia laddove vi sia una sovrapproduzione. Questa considerazione nasconde comunque delle criticità che verranno meglio dettagliate in seguito. Il secondo aspetto di cui bisogna tenere conto è che data la forte componente di modularità e serialità che caratterizza gli SMR è bene che anche i motori ad essi accoppiati abbiano almeno in parte queste caratteristiche così da garantire la miglior adattabilità possibile tra il lato reattore ed il lato propulsore.

Il terzo aspetto è legato alla posizione dell'impianto nucleare all'interno della nave; il suo enorme peso obbliga a posizionarlo al centro della nave, il che significa che una soluzione *Fuel-direct* comporterebbe una lunghezza elevatissima dell'albero (vedi Figure 4.1 e 4.2).

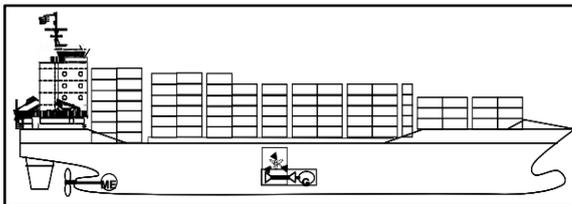


Figura 4.1 – Fuel-direct system

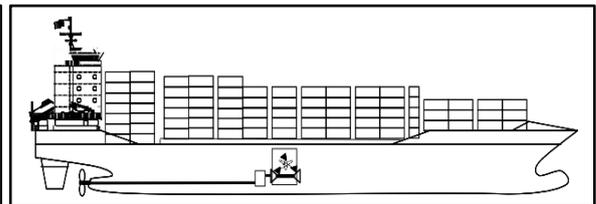
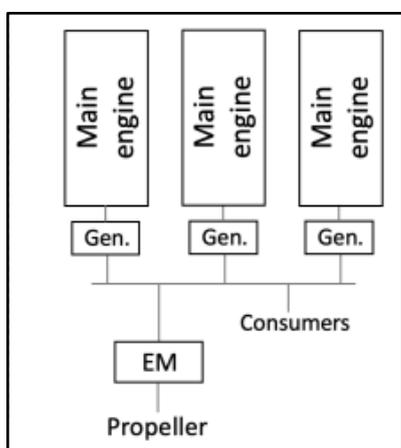


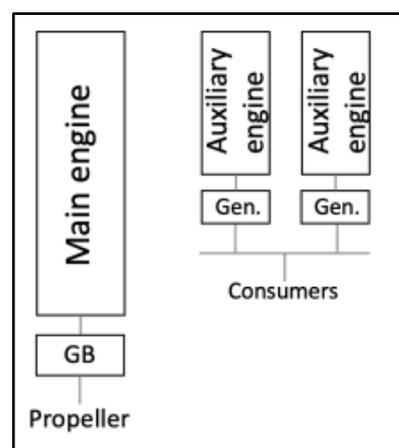
Figura 4.2 – Fuel-electric system

Se si pensa che navi mercantili di grandi dimensioni possono raggiungere i 400 m di lunghezza ci si ritroverebbe a dover progettare un albero con una lunghezza non inferiore a 150 m [18]. Tale complicazione viene meglio illustrata dalla Figura 4.1. La soluzione a tale problema potrebbe essere quella di utilizzare delle tubazioni calde che attraversino la nave per posizionare la turbina in fondo ad essa, in corrispondenza dell'elica; evidentemente questa soluzione risolve un problema introducendone comunque un altro di criticità paragonabile.

Alla luce dei vantaggi e degli svantaggi dei due sistemi, e di queste ultime considerazioni si può selezionare il sistema *Fuel-electric* come ottimale per un accoppiamento con uno SMR. Questa è una considerazione del tutto generale, la quale non esclude che in alcuni casi specifici possa essere più conveniente implementare il sistema *Fuel-direct*.



4.3 – *Fuel-electric system*



4.4 – *Fuel-direct system*

4.1.2 Conversione energetica

Come già illustrato nel capitolo relativo agli impianti navali nucleari, i due sistemi che potenzialmente consentono al reattore di convertire il calore in energia meccanica sono la turbina a vapore e la turbina a gas. Storicamente si è sempre utilizzata la turbina a vapore, ma oggi sappiamo che utilizzando reattori ad alta temperatura può essere conveniente in taluni casi utilizzare il turbogas. Si ricordi inoltre che ai fini propulsivi si è scelto in questa sede un'applicazione *Fuel-electric*, quindi la turbina ha la funzione di alimentare il generatore anziché direttamente l'elica. Nella tabella seguente vengono brevemente descritte le caratteristiche dei due sistemi di produzione di energia elettrica, successivamente se ne descrivono i vantaggi e gli svantaggi in relazione alla fonte termica nucleare come generatore di calore.

Turbina a vapore:

- Uno dei principali vantaggi della sua applicazione è il fatto che la compressione viene operata da una pompa sul liquido in uscita dal condensatore: come noto, dal momento in cui il lavoro di compressione è fortemente dipendente dal volume specifico del fluido evolvente se ne deduce che il lavoro di compressione è molto basso rispetto al lavoro prodotto dalla turbina, all'interno della quale evolve vapore. La conseguenza è un maggior rendimento di ciclo
- Le temperature del refrigerante raggiungibili dagli attuali SMR ad acqua pressurizzata si aggirano intorno ai 300-330 °C; questo significa che il vapore prodotto dai generatori di vapore avrà temperature di poco inferiori e questo ha una diretta conseguenza sul rendimento del ciclo a vapore che ne consegue. L'utilizzo di SMR refrigerati a metalli liquidi consentono invece delle temperature del refrigerante anche di 500-600 °C a pressione atmosferica, il che determinerebbe un effetto positivo sul rendimento del ciclo a vapore sul secondario. Temperature ancora più elevate sarebbero raggiungibili dai reattori a sali fusi (~700-800 °C) permettendo la produzione di un vapore ad alta temperatura con forte beneficio sull'efficienza del ciclo
- Le elevate taglia ed inerzia le rende piuttosto complesse da manovrare in avviamento così come in risposta a variazioni di carico e ciò non le rende la miglior soluzione in termini di adattabilità al carico per propulsione navale; ad ogni modo l'accoppiamento a generatori elettrici anziché all'elica riduce la necessità di lavorare a basso carico da parte delle turbine. La ridotta compattezza implica, oltre ad un incremento nei costi d'installazione anche un maggior spazio occupato da parte dell'impianto secondario il che evidentemente rappresenta un elemento a sfavore nel contesto marittimo in cui lo spazio a disposizione è ridotto. Per avere un'idea indicativa delle dimensioni, in un sistema fuel-electric una turbina a vapore da 80 MW_e (potenza compatibile con le richieste totali di una nave di medio-grandi dimensioni) occupa uno spazio di circa 8x15x8 m (altezza, lunghezza, profondità).

Turbina a gas:

- Come noto nel ciclo Brayton-Joule il fluido elaborato non subisce un cambiamento di fase dunque è necessario un compressore, in cui il lavoro specifico è decisamente superiore a quello della pompa. Tali affermazioni vanno però spostate dal contesto generale per calarle nell'applicazione nucleare. Il rendimento di questo ciclo infatti è fortemente dipendente dalla temperatura in ingresso alla turbina (TIT – Temperature Inlet Turbine). Dunque nelle applicazioni in cui venga fornito calore ad elevate temperature è possibile tenere in considerazione il suo utilizzo: è il caso degli HTR e per quanto riguarda la IV generazione dei VHTR e MSR. Aspetti legati alla parte nucleare dell'impianto influenzano la reale efficacia di questa soluzione, in primis il sistema di scambio termico tra primario e secondario e/o terziario (ove presente)
- Le turbine a gas sono compatte, non richiedono elevati tempi di avviamento e rispondono in maniera più rapida alle variazioni di carico; a tal proposito si fa riferimento a uno studio relativo alla capacità di seguire il carico da parte di

turbine a elio per reattori di IV generazione [19]. Richiedono minore manutenzione e minori costi operativi rispetto alle turbine a vapore

La Figura 4.5 rappresenta in maniera del tutto qualitativa il confronto tra la stanza di turbina a vapore, turbina a gas con elio e turbina a gas con CO₂; per completezza si tenga conto che non è raffigurato il compressore, per cui bisognerebbe raddoppiare la grandezza delle due turbine a gas. Per entrambe le soluzioni proposte, eventuali ottimizzazioni del ciclo quali rigenerazione, recupero di calore o interrefrigerazione verranno discusse in un secondo momento. Le considerazioni fatte finora non consentono di determinare quale sia il ciclo più adatto alla propulsione navale in quanto gioca un ruolo fondamentale la tipologia di SMR utilizzato a monte; in generale si può però ipotizzare che per reattori ad alta temperatura può avere senso l'utilizzo di turbine a gas, mentre per reattori in cui il calore è fornito a bassa temperatura risulta più conveniente l'utilizzo di turbine a vapore. Successivamente verranno proposte le soluzioni ottimali per ogni tipologia di SMR. In particolare, per il ciclo Brayton-Joule si vedrà come si possano scegliere diverse configurazioni impiantistiche ognuna con i propri vantaggi e svantaggi (ciclo diretto senza scambiatore, ciclo indiretto elio-elio, ciclo indiretto elio-aria,...).

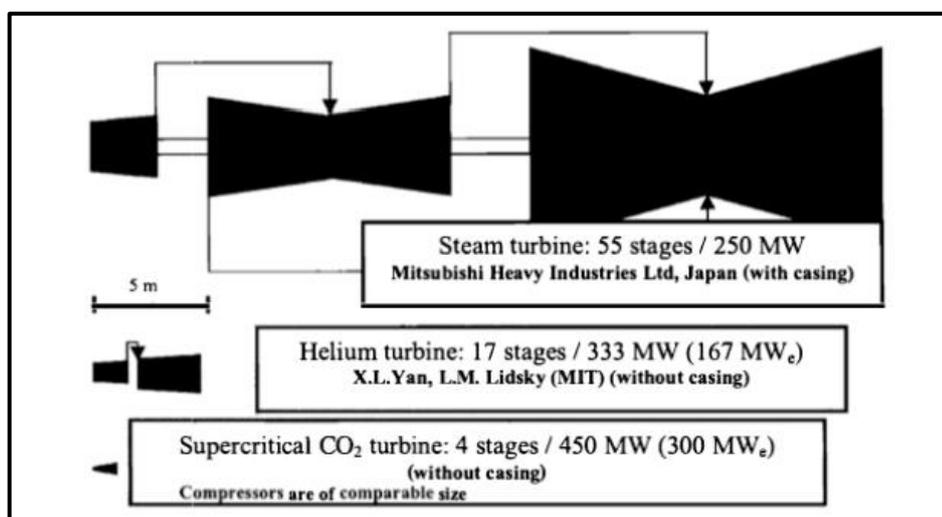


Fig 4.5 – Confronto tra le grandezze di turbine con potenze output simili [17]

4.1.3 Schermatura, protezione e posizionamento

Un aspetto di cui tenere conto nel progetto del reattore compatto all'interno dell'imbarcazione è quello relativo alla schermatura (shielding); infatti il personale operativo, l'intero equipaggio, il carico e/o i passeggeri devono essere adeguatamente protetti dalle radiazioni di tipo gamma, di tipo X e neutroniche (i raggi beta e alfa, per quanto pericolosi, hanno una ridottissima capacità penetrativa). Per valutare la pericolosità delle radiazioni nei confronti della sicurezza umana si utilizza il Sv⁵ ed i suoi sottomultipli. Il

⁵ E' l'unità di misura della dose equivalente di radiazione. Misura il danno biologico provocato dalla radiazione sull'organismo. Il Sievert rappresenta un'energia per unità di massa. 1 Sv = 1 J/kg

progetto della schermatura viene fatto, previa una stima di massima iniziale, tramite codici di calcolo numerico ed esula dalla seguente trattazione, ma viene comunque citato in quanto parte integrante e fondamentale del progetto dell'impianto nucleare. La protezione dell'ambiente esterno, basata sull'approccio *defence in depth* già ben noto dall'esperienza degli impianti nucleari land-based, si serve di strutture quali l'acqua, il calcestruzzo armato, il piombo, l'acciaio, il polietilene. L'interesse che la schermatura ha nei confronti della trattazione è principalmente dovuto alla gestione del peso che essa rappresenta, della posizione che assume sulla pianta della nave e dalla conseguente gestione degli spazi. Le già citate navi NS Savannah e NS Mutsu, contavano su strutture di schermatura che pesavano oltre 2000 tonnellate, il che determinava una zavorra non indifferente a carico dell'imbarcazione, che obbligava a posizionare l'impianto nel baricentro della stessa.

Uno studio giapponese degli anni '90, in seguito all'esperienza fallimentare della nave Mutsu si occupò tra le altre cose di ottimizzare il progetto della schermatura per un reattore marino (MRX – Advanced Marine Reactor), indicando come fosse possibile progettare delle schermature molto meno pesanti e ingombranti (fino al 30% in meno del volume rispetto a NS Mutsu e 50% in meno del volume della NS Savannah) e con livelli di dose equivalente di molto inferiori (1/50 del livello di dose equivalente rispetto alla NS Mutsu) [20]. Per concludere, uno studio del 2022 relativo ai sistemi di schermatura di SMR stima, utilizzando approcci di calcolo semplificati, che è possibile avere livelli di dose equivalente al di sotto del limite consentito semplicemente grazie ai normali elementi dell'impianto (incamiciatura, moderatore, vessel...); ciò fa ben sperare in quanto a compattezza e peso dell'impianto complessivo [21].

Un altro aspetto è costituito dai sistemi di protezione esterna nei confronti del reattore; bisogna considerare infatti che le situazioni incidentali su una nave rappresentano un argomento ben diverso rispetto a quello dei reattori terrestri; l'obiettivo principale è quello di mantenere l'integrità del reattore in qualsiasi situazione catastrofica ed evitare il rilascio di materiale radioattivo nell'ambiente marino e/o in atmosfera. La IMO si occupò di regolare questo aspetto già negli anni '60, con una serie di requisiti necessari per l'impianto nucleare su navi mercantili, come ad esempio la presenza di un involucro di sicurezza che racchiuda il reattore [22]. Questo rappresenta il sistema più logico ed utilizzato anche da tutte le navi a propulsione nucleare in quanto rappresenta un'ottima soluzione anche contro situazioni di incendio e collisione. I peggiori scenari contemplati dall'organo regolatorio sono l'allagamento e l'affondamento della nave; la struttura compartimentata dell'involucro deve essere testata anche per questo tipo di evenienza, rendendo possibile il non rilascio di materiale radioattivo e la possibilità di operazioni di recupero e separazione del vano reattore dalla nave affondata. Ad influenzare questi aspetti vi è ancora una volta il posizionamento dell'impianto all'interno della nave che come regola generale dovrebbe essere inserito nella zona più centrale, proprio ad evitare qualsiasi danneggiamento in caso di collisione; peraltro il posizionamento agli estremi della nave provocherebbe maggiori oscillazioni e vibrazioni, soprattutto in caso di mare mosso, aumentando il rischio di criticità ai danni di elementi dell'impianto. Ancora una volta queste considerazioni del tutto generali possono essere particolarizzate laddove si facciano considerazioni su SMR e navi specifiche. Per fare solo un esempio, è possibile che i livelli di compattezza e leggerezza di alcuni reattori a spettro veloce rendano possibile un posizionamento più periferico, se necessario.

4.1.4 Refueling

L'aspetto della gestione del combustibile è molto variabile a seconda del reattore scelto. Ad ogni modo rappresenta un processo non trascurabile ai fini della sicurezza e dell'efficienza operativa, quindi con risvolti economici oltre che energetici. Proprio come nelle centrali terrestri, nelle applicazioni navali il processo di de-fueling e re-fueling può richiedere svariati giorni ed è operato durante periodi di non funzionamento dell'impianto (nave attraccata). Le criticità di gestione sono in realtà legate all'operazione di de-fueling in quanto si ha necessità di maneggiare combustibile esausto caratterizzato da attività di decadimento radioattivo il quale costringe tra l'altro a tenere conto di una minima aliquota di calore emesso. Il design di buona parte degli attuali SMR consente di avere delle durate operative tra un refueling e l'altro che possono variare dai 2 ai 10 anni (fatta eccezione per alcuni casi particolari che raggiungono anche i 30 anni ed oltre) il che consente di avere potenzialmente un'ottima continuità di esercizio. Se si tiene conto di SMR con la capacità di avere un *online refueling* si riesce ad ottimizzare maggiormente questo aspetto riducendo ad una breve parentesi il periodo di scarico del combustibile esausto dalla nave; ciò implicherebbe la possibilità di avere a disposizione delle zone di stoccaggio del combustibile esausto. Il *reprocessing* non viene accuratamente trattato in questa sede ma viene citato in quanto i MSR avrebbero la capacità di implementare un sistema di on-line reprocessing; ciò rappresenta ad oggi una prospettiva ancora lontana dalla sua reale implementazione ma di fatto aprirebbe le porte ad un sistema autonomo, continuo ed idealmente senza i rischi legati agli aspetti del refueling nei pressi di zone portuali. Evidentemente il sistema di riprocessamento del combustibile avrebbe esso stesso una richiesta energetica non trascurabile.

4.1.5 Propulsione di emergenza

Esattamente come accade negli impianti nucleari land-based è sempre necessaria la presenza di generatori diesel che in qualsiasi situazione di compromesso esercizio dell'impianto nucleare deve poter garantire una certa autonomia a livello propulsivo e di alimentazione degli ausiliari. Come già accennato e come verrà esposto in seguito la presenza di batterie avrà in questo caso un ruolo determinante, in quanto garantiscono l'alimentazione elettrica per un certo periodo di tempo.

4.1.6 Sistemi di sicurezza

Nel capitolo precedente si è messo in luce come gli SMR abbiano all'interno della propria logica di funzionamento dei sistemi di sicurezza passivi. In questa sede non viene trattato nello specifico il principio di funzionamento di questi sistemi, che hanno come compito ultimo quello di rimuovere il calore di decadimento radioattivo in situazioni emergenziali e di mantenere l'impianto in condizioni stabili. Ogni tipologia di reattore avendo caratteristiche differenti utilizza sistemi passivi differenti; a titolo puramente esemplificativo gli HTR grazie alla loro bassa densità di potenza hanno dei transitori termici piuttosto lenti, facilmente gestibili grazie alla grande capacità termica della matrice grafitica del core.

4.2 All-electric ships

Nel primo capitolo sono state introdotte le novità regolatorie imposte dalla IMO per una maggior sostenibilità nel campo del trasporto marittimo; è stato sottolineato come alcuni limiti legati agli indicatori di rendimento energetico (EEDI, EEOI...) hanno portato verso l'implementazione e lo studio di nuovi sistemi finalizzati all'efficientamento dei sistemi energetici. Tra questi sistemi vi può essere ad esempio l'elettrificazione dei sistemi nave fino ad arrivare alle All-electric ships, nelle quali la propulsione avviene tramite motori elettrici e tutti i sistemi della nave sono completamente elettrificati, alimentati dai generatori mossi dal motore primo e/o da motori ausiliari. In questa sezione della trattazione si vogliono approfondire aspetti legati a queste tipologie di navi, alle loro implicazioni in termini di rendimento dei sistemi energetici ed al potenziale accoppiamento con la fonte termica nucleare. Aspetto strettamente legato a quanto appena detto è quello dello stoccaggio di energia elettrica attraverso batterie; lo studio [23], che si focalizza su navi portarinfuse (Bulk carrier) prova come l'utilizzo di batterie possa portare ad una riduzione di emissioni di GHG intorno all'1.8%. Il valore è comunque fluttuante a seconda del tipo di batterie utilizzato e della loro taglia. Un aumento della taglia del dispositivo di stoccaggio infatti sarebbe benefico in termini energetici sulla nave ma un LCA (life cycle assessment) può mettere in luce un complessivo aumento delle emissioni; a ciò si aggiungerebbero non trascurabili problematiche in termini di peso, costo e smaltimento. La logica che consentirebbe di ottimizzare il rendimento del motore è semplice: la batteria immagazzina energia durante periodi di funzionamento a basso carico, mentre distribuisce energia elettrica durante periodi di elevato carico; così facendo viene ottimizzato il punto di funzionamento del motore primo, che di fatto riesce a lavorare maggiormente nell'intorno delle condizioni di design. Questo aspetto che rappresenta un'ottima prospettiva ai fini di ridurre le emissioni di GHG per la propulsione tradizionale, potrebbe risultare secondario per quanto riguarda la propulsione nucleare in quanto rappresenta già essa stessa una soluzione a quasi zero emissioni. In realtà ciò è strettamente legato alla problematica già citata dell'accumulo di Xe^{135} in condizioni di basso carico; risulta ovvio infatti che maggiore è la percentuale di carico del motore e minori saranno i rischi operativi relativi all'accumulo di Xe^{135} all'interno del reattore.

Sulla base di queste considerazioni e di quanto detto a inizio capitolo in relazione al Fuel-electric system, lungo la trattazione si prenderà in considerazione questo tipo di soluzione. Chiaramente non è necessario che una nave mercantile sia completamente elettrificata affinché sia compatibile con i reattori nucleari modulari; vi sono altri modi per ovviare alla problematica dell'accumulo dello xenon (primo tra tutti utilizzare combustibile con percentuali di arricchimento elevate), ma in relazione alla fattibilità a lungo termine, all'efficienza del sistema energetico, al costo, al rischio proliferazione ed all'accettabilità dell'opinione pubblica quella di elettrificare la nave risulta la più promettente.

4.3 Pressurized Water Reactors

Vista la notevole esperienza nei riguardi di questi reattori, gli SMR pressurizzati sembrano essere ad oggi la soluzione più applicabile a breve termine e con meno problematiche a livello tecnologico e di licenze. Essi si adattano piuttosto bene ad ogni tipologia di imbarcazione ed inoltre sul mercato gli SMR ad acqua pressurizzata sono quelli più diffusi. Di seguito si verificherà dal punto di vista energetico come inserire questo tipo di reattore all'interno della nave.

L'impianto ricalca la tipologia impiantistica già nota per i reattori pressurizzati in campo militare; di seguito per indagare la fattibilità di implementazione di PWR in campo mercantile si fa riferimento al SMR KLT-40S al quale si è già accennato. La scelta di prendere questo reattore come modello deriva principalmente dall'esperienza che questo reattore ha già in campo operativo, aspetto che lo rende sicuramente un candidato ottimale per un futuro a breve termine, soprattutto dal punto di vista delle licenze. Come già detto l'ultima versione di questo reattore studiata appositamente per la piattaforma Akademik Lomonosov anche se non ha come suo scopo principale quello propulsivo nasce dal suo modello predecessore KLT-40 che invece era studiato appositamente per propulsione marina. Dunque verranno descritte le sue caratteristiche ed in seguito si proporranno le tipologie di imbarcazione che più si prestano a questo tipo di applicazione.

4.3.1 Caratteristiche tecnologiche

Viene preso come principale modello per questo tipo di SMR il KLT-40S, in quanto l'unico ad oggi funzionante ed in quanto rappresenta l'upgrade di alcuni reattori montati a scopo propulsivo su navi rompighiaccio. Le principali caratteristiche del KLT-40S vengono prese dal report della IAEA che si è occupata di stilare una panoramica riguardante tutti gli aspetti impiantistici del suddetto reattore [11].

Caratteristica particolarmente apprezzata è la possibilità di utilizzare la cogenerazione per produrre il calore necessario alle utenze ed ottimizzare così tutto l'impianto. Si noti come la temperatura alla quale il calore di cogenerazione è fornito possa essere opportunamente modificata utilizzando degli scambiatori di calore posizionati tra il circuito primario e secondario.

Il periodo di refueling, con la modalità del *single-loading*, è di circa 3 anni e le operazioni di scarico e ricambio del combustibile avvengono dopo 14 giorni dallo *shut-down* del reattore, in maniera tale da consentire una semplice gestione del calore residuo di decadimento. Per contenere il problema della proliferazione si è scelto di utilizzare HALEU che comporta l'utilizzo di arricchimento inferiore al 20%; ad ogni modo si tratta di valori comunque superiori alle tradizionali centrali.

Il sistema dispone di 4 loop di circolazione forzata del refrigerante ed un loop a circolazione naturale del refrigerante; la circolazione primaria è garantita dalle *canned pump*, i generatori di vapore sono del tipo a singolo passaggio con tubazioni elicoidali. Il pressurizzatore non fa parte del sistema integrale del reattore e può essere costituito da uno o due recipienti che hanno il compito di mantenere stabile la pressione del primario, assorbendo cambi di volume del refrigerante durante variazioni di carico, in particolare durante l'avviamento. Il flusso di refrigerante come nei tradizionali PWR avviene dal basso verso l'alto del reattore, mentre una sostanziale differenza rispetto al design tradizionale è dato dalla configurazione del flusso tra le pareti dello shroud e l'entrata del RPV (Reactor Pressure Vessel).

Il reattore è collegato a quattro generatori di vapore (PG-28S) tramite quattro gambe calde, corte e compatte. Il generatore di vapore PG-28S è costituito da 15 bobine ad avvolgimento multiplo costituite ognuna da 22 tubi di diametro 2.5 mm; il numero totale di tubi del sistema è 100. Le pompe MCP (Motor Canned Pump) sono centrifughe poste in verticale ed alimentate da un motore asincrono. Il core è costituito da 121 fuel assemblies (FAs), mentre i fuel elements (FEs) all'interno della FA sono disposti a formare un reticolo triangolare di passo 9.95 mm.

Risulta degno di nota citare l'utilizzo di gadolinio come veleno bruciabile sotto forma di barre, utilizzato nelle FAs per compensare il margine di reattività del core che decresce lungo la vita operativa del combustibile. Le caratteristiche del core assicurano durante qualsiasi situazione operativa e di vita dell'impianto dei coefficienti di reattività negativi per la potenza, il combustibile, la temperatura del refrigerante e il volume specifico del refrigerante; questi fattori garantiscono un elevato livello di autoprotezione intrinseca del reattore.

Lo stoccaggio delle FAs e dei rifiuti solidi comprendono due stadi: innanzitutto uno stoccaggio umido (wet storage) che assicura una rimozione ad acqua del decadimento radioattivo non appena il combustibile viene scaricato dal reattore ed in seconda battuta uno stoccaggio secco (dry storage) nel quale il calore di decadimento è ormai gestibile da un semplice sistema di refrigerazione ad aria che risulta affidabile ed a costo ridotto.

Di seguito viene brevemente descritto il lato secondario dell'impianto.

Il vapore prodotto oltre che muovere la turbina a vapore avrà il compito di alimentare ad una certa temperatura un sistema di cogenerazione per la produzione di acqua calda. L'impianto inoltre implementa i seguenti sistemi di condensazione con lo scopo di incrementare i livelli di efficienza del ciclo:

- Utilizzo di un sistema di rigenerazione del calore dell'acqua di alimento al fine di fornire all'entrata dei generatori di vapore acqua a 170 °C
- La potenza elettrica per l'intera imbarcazione viene prelevata direttamente dai generatori stessi (concetto già esposto e realmente implementato sulla piattaforma Akademik Lomonosov)
- Il calore di condensazione ad alta temperatura viene direttamente asportato direttamente all'interno del deareatore

Il layout pensato per il reattore KLT-40S consiste nel posizionare il vano reattore al centro della nave, i gruppi turbina-generatore e gli impianti elettrici sulla prua della nave, mentre gli ausiliari ed i blocchi abitativi si trovano a poppa; questo schema sulla piattaforma è stato studiato per soddisfare i requisiti di sicurezza e per ottimizzare i flussi elettrici ma non è detto che abbia lo stesso successo per tutte altre eventuali applicazioni propulsive. Si tenga conto che è possibile a seconda delle richieste energetiche e della taglia della nave utilizzare due reattori all'interno della stessa nave (come effettivamente accade sulla FNPP Akademik Lomonosov che monta due KLT-40S).

4.3.2 Ciclo Rankine con PWR

Il ciclo a vapore utilizzato con reattori pressurizzati porta con sé alcuni limiti intrinseci che ne abbassano il rendimento. Se si confronta il rendimento di un ciclo Rankine alimentato da PWR rispetto ad un tradizionale ciclo con caldaia a carbone si può notare un minor rendimento del primo; ciò è spiegato dal fatto che nei reattori pressurizzati il vapore viene prodotto a condizioni vicine a quelle di saturazione, il che limita la temperatura a cui viene fornito il calore dal momento in cui è necessario evitare l'ebollizione nel refrigerante primario. L'assenza di vapore surriscaldato rende estremamente complesso l'inseguimento del carico, che risulta fondamentale ai fini propulsivi; un altro aspetto sicuramente non di secondaria importanza è il fatto che per salvaguardare l'integrità della turbina ed assicurare un elevato rendimento della stessa è bene che il titolo sia superiore all'unità durante

l'espansione in quanto le gocce di liquido sono motivo di danneggiamento sull'organo rotante; inoltre come noto un surriscaldamento aumenterebbe il rendimento del ciclo termodinamico in quanto aumenta la temperatura media della fonte termica.

Queste considerazioni iniziali portano dunque a concludere che non si può prescindere dall'utilizzo di uno o più surriscaldatori sul lato secondario. La domanda che ci si pone è come implementare tale soluzione in presenza di PWR. Le soluzioni possibili sono: o si fornisce il calore di surriscaldamento attraverso un'altra fonte nucleare oppure si utilizzano fonti fossili con un surriscaldatore convenzionale. Uno studio condotto nel 2007 [24] suggerì come fosse particolarmente benefica la seconda soluzione con un particolare focus sulla capacità di inseguire efficacemente il carico utilizzando un surriscaldatore a combustibili fossili e il reattore nucleare come fonte termica di base. Lo studio non si riferiva specificatamente ai SMR per fini propulsivi, tuttavia le sue considerazioni ci consentono di dire che tale soluzione è particolarmente adeguata nel caso di propulsione navale in cui chiaramente bisogna far fronte a variazioni di carico sostanziali. Un altro studio [25] prende in considerazione invece l'utilizzo di un ciclo combinato CCGT (Combined Cycle Gas Turbine) in cui al fine di aumentare il rendimento del ciclo viene affiancato l'utilizzo di una turbina a gas. Questa soluzione consente di avere la capacità di seguire il carico in maniera ottimale ed al contempo di aumentare la temperatura del vapore grazie ai gas caldi in uscita dalla GT (Gas Turbine); la logica è la stessa dell'utilizzo della caldaia a recupero (HRSG – Heat Recovery Steam Generator) ma con il solo scopo di operare un surriscaldamento del vapore in uscita dai generatori di vapore. Questo tipo di soluzione per quanto aumenti in maniera significativa il rendimento del ciclo comporterebbe una vera e propria soluzione ibrida nucleare-tradizionale ed introdurrebbe rilevanti complicazioni impiantistiche; ai fini della trattazione non verrà quindi indagata la sua fattibilità tecnologica a fini propulsivi.

Come viene evidenziato dallo studio impiegato per ottimizzare il già citato reattore compatto mPower [26], l'utilizzo di un combustore a gas naturale per surriscaldare il vapore è particolarmente adeguato per SMR. Lo studio dimostra come il rendimento del ciclo aumenti dal 33 al 36 % con l'utilizzo di un combustore a gas di surriscaldamento. Ancora una volta si evidenzia come il grande vantaggio di tale applicazione non è tanto dato dall'aumento del rendimento del ciclo, quanto dalla capacità di regolare al meglio l'output della turbina a vapore grazie alla presenza del vapore surriscaldato, consentendo quindi al reattore di lavorare il più possibile a punto fisso. A titolo di esempio, come rappresentato in Tabella 4.1 e Figura 4.6 si mette in luce che nello studio citato la presenza del bruciatore consente di adeguare la potenza in output tra il 100 ed il 65 % permettendo al reattore di funzionare a punto fisso all'interno di quel range di funzionamento, ovviamente con una riduzione del rendimento del ciclo al diminuire della TIT.

Power output (% of nominal)	HP turbine inlet temperature (°C)	Reheated steam temperature (°C)	Total power generated (MWe)	Total cycle efficiency (%)
100	600	450	638.3	35.82
90	550	350	575.2	34.41
85	500	320	545.9	33.59
80	400	320	511.6	32.54
70	350	200	449.8	31.60
65	271	192	408.1	30.64

Tabella 4.1 - Parametri operativi impianto a vapore al variare del carico

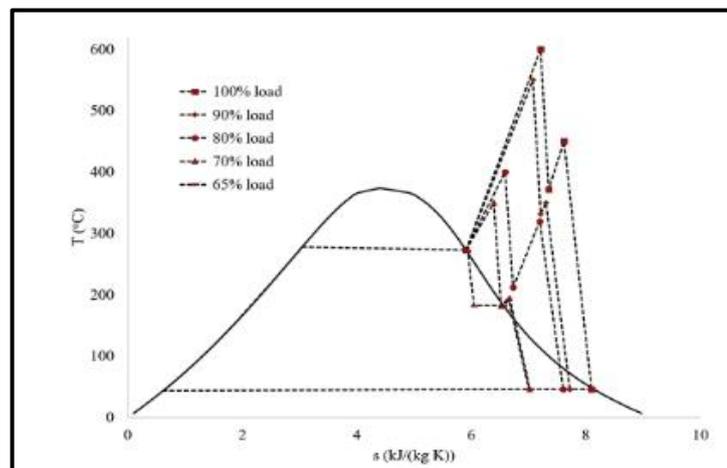


Figura 4.6 – Stati termodinamici del ciclo a vapore al variare del carico

Si possono brevemente descrivere i vantaggi e gli svantaggi di questa soluzione:

Vantaggi:

- Non determina particolari complicazioni impiantistiche; serve solo installare un combustore di taglia ridotta all'esterno del vano reattore
- Aumenta il rendimento di ciclo e ciò determina una riduzione dei costi di esercizio
- Particolarmente adatto agli SMR per via della ridotta taglia delle turbine utilizzate. I ridotti output infatti consentono l'utilizzo di turbine che rimangono all'interno del range di potenza oggi commercialmente disponibili; quest'affermazione potrebbe non essere vera nel caso di grandi impianti nucleari per produzione di

energia elettrica, nei quali bisognerebbe utilizzare più di un gruppo turbina con una conseguente lievitazione dei costi

Svantaggi:

- Viene inserito un sistema dipendente dal combustibile fossile che determina, seppur in misura ridotta, una certa quota di emissioni di GHG
- C'è una dipendenza economica dal prezzo fluttuante del gas naturale

Sulla base delle considerazioni fatte si può prendere in considerazione l'utilizzo di SMR pressurizzati con bruciatori a gas con il principale obiettivo di mantenere il reattore il più possibile a punto fisso, evitando dunque l'accumulo del veleno neutronico Xe^{135} . A questo punto è interessante evidenziare un ulteriore aspetto operativo: non è più necessario spingere l'arricchimento dell'uranio a valori troppo superiori a quelli tradizionalmente utilizzati per le NPP in quanto non è più richiesto il margine di reattività; questo si traduce in minori costi per il processo di arricchimento ed in minori preoccupazioni legate alla proliferazione nonostante ne risentirà la compattezza del reattore. Di seguito viene rappresentato lo schema impiantistico descritto lungo il paragrafo (il reattore indicato è un AP1000 ma come detto lo studio ha contemplato anche l'utilizzo di un SMR pressurizzato); si noti che l'impianto contempla la presenza di elementi non espressamente discussi nel paragrafo, in particolare il surriscaldatore (re-heater) e l'economizzatore.

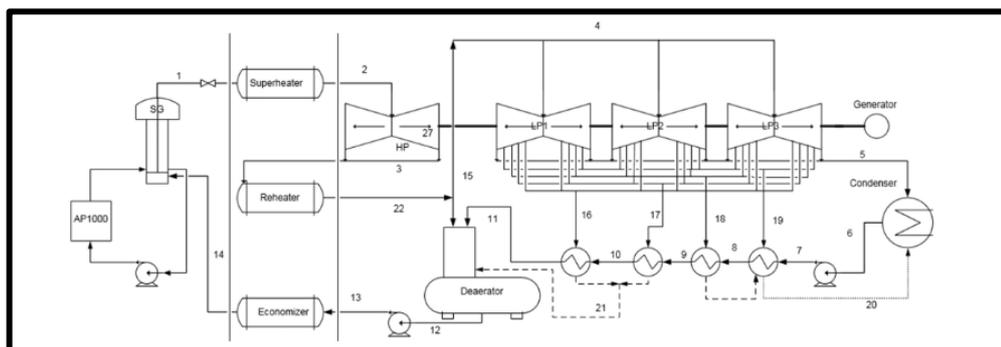


Figura 4.7 – Schema impiantistico con surriscaldatore di vapore

La scelta della taglia del surriscaldatore deve tenere conto della necessità spiegate nel paragrafo senza però snaturare la logica del sistema nucleare che ha come principale obiettivo quello di decarbonizzare la propulsione navale.

4.4 HTR/VHTR

4.4.1 Caratteristiche tecnologiche

Gli High Temperature Reactor possiedono delle caratteristiche che li rendono promettenti per una futura implementazione in campo propulsivo. In questa sezione ci si occupa di comprendere come questo tipo di reattore può essere inserito come fonte termica all'interno della nave. Gli HTR sono reattori refrigerati a gas e moderati a grafite, progettati per avere

una temperatura in outlet particolarmente alta (700-800 °C per gli HTR, per i VHTR di IV generazione si raggiungeranno anche i 1000 °C). Fornire calore a temperatura elevata significa avere elevati rendimenti, un contenuto exergetico più elevato e ciò consente di avere a disposizione calore in grado di soddisfare necessità che hanno bisogno di elevate temperature, non realizzabili altrimenti. In questo senso le principali potenzialità dell'HTR all'interno del contesto navale sono:

1. Cogenerazione: il calore disponibile potrà essere utilizzato per fornire il calore necessario alle utenze attraverso un sistema di cogenerazione
2. Desalinizzazione: il processo di desalinizzazione dell'acqua di mare potrà essere ottimizzato utilizzando il calore stesso del reattore

La maggior parte dei design di SMR ad alta temperatura utilizzano elio come gas refrigerante, molto apprezzato dal momento che è inerte sia dal punto di vista chimico sia dal punto di vista neutronico. Gli HTR sono particolarmente apprezzati grazie al livello di sicurezza intrinseca che li caratterizza: la grafite con un'elevata capacità termica unita alla bassa densità di potenza del reattore fanno sì che la progressione di una situazione incidentale possa essere talmente lenta da essere completamente gestibile in sicurezza. Questo d'altro canto si riflette in un ingombro non indifferente da parte dell'impianto, che non sarà dunque così compatto se comparato con i PWR ad alto arricchimento per applicazione militare o con i reattori a spettro veloce. Per avere un'idea delle dimensioni di un SMR ad alta temperatura si cita il reattore MHR-100 di Afrikantov che con un output elettrico di 87 MW ha dimensioni comparabili con un SMR ad acqua pressurizzata con un output elettrico dieci volte superiore.

Vengono prese in considerazione le due configurazioni di reattore ad oggi presenti sul mercato, vale a dire gli HTR Pebble-Bed e gli HTR Prismatic Block. In campo navale i Pebble-Bed hanno il grande pregio di consentire le operazioni di refueling online ma allo stesso tempo non sono particolarmente indicati per via dell'intrinseca instabilità degli elementi sferici all'interno del core in situazioni di oscillazioni tipiche di quelle di viaggio; per questo motivo gli studi effettuati fino ad oggi sono più indirizzati verso l'utilizzo dei Prismatic Block [17].

Il combustibile, costituito da TRISO⁶ consente di raggiungere un burn-up di un ordine di grandezza superiore rispetto a quello dei reattori ad acqua leggera (si arriva fino a 700'000 MWd/ton di burn up metallurgico); questa particella consente di utilizzare delle miscele alternative di combustibile ma la sue ridotte dimensioni rendono particolarmente complesse operazioni di reprocessing, aspetto che sotto il punto di vista della non-proliferazione risulta invece essere molto apprezzato. L'utilizzo delle coated particles consente di sfruttare il combustibile al meglio grazie alla sua elevata resistenza e contribuisce in maniera significativa a rendere il reattore intrinsecamente sicuro: la quantità di gas radioattivi che fuoriescono dalla protezione della particella è praticamente nulla fino a 1600 °C (temperatura alla quale non ci si avvicina nemmeno lontanamente durante la vita dell'impianto).

⁶ TRI-structural ISOtropic particle fuel: particella con diametro dell'ordine del mm con un kernel di combustibile interno e una struttura di protezione esterna multistrato che consente di raggiungere una resistenza elevatissima al bombardamento neutronico dall'interno, alla corrosione e all'ossidazione.

4.4.2 Caratteristiche dell'impianto

Una scelta di particolare importanza è quella della tipologia di impianto che meglio si adatta alla propulsione navale. Esistono design di impianto con turbina a gas con ciclo diretto, impianti con turbina a gas con ciclo indiretto ed impianti con turbina a vapore che sono necessariamente indiretti; "indiretto" significa che viene interposto uno scambiatore di calore in modo da dividere il primario dal secondario, mentre "diretto" significa che il gas refrigerante è esso stesso il fluido motore che muove la turbina. Nell'opzione con turbina a gas indiretto si potrà eventualmente discutere l'utilizzo di un ciclo aperto in cui il fluido motore utilizzato è aria.

Ciclo diretto turbogas:

Nel ciclo diretto con turbogas l'elio refrigerante proveniente dal reattore espande direttamente in turbina; dunque un primo elemento da tenere in considerazione è il fatto che l'organo rotante va a contatto diretto con il gas proveniente dal reattore. Questo primo aspetto deve essere certamente considerato attraverso opportuni sistemi di protezione dell'impianto anche se i reattori HTR grazie alle innovative microparticelle di combustibile consentono di trattenere le radiazioni per temperature ben al di sopra di quelle di normale esercizio del reattore. Questo tipo di soluzione è sicuramente la più compatta, leggera e semplice a livello impiantistico.

La reale criticità è causata dalle elevate temperature che l'organo rotante deve sopportare in quanto bisogna disporre di materiali in grado di resistere a temperature molto elevate, in particolar modo se si tratta di VHTR. Come noto l'utilizzo del *blade-cooling* (refrigerazione interna delle pale) non è conveniente quando il fluido motore sia, come in questo caso, un gas diverso dall'aria. La motivazione è duplice: innanzitutto non è possibile refrigerare con aria in quanto il fluido motore non è aria e comunque la sua presenza, come quella dell'acqua, sarebbe pericolosa in quanto provoca reazioni con la grafite del core; in secondo luogo l'ipotesi di refrigerare con elio da un circuito chiuso non risulta conveniente in termini di rendimento. Oggigiorno la tecnologia dei materiali consente l'utilizzo di materiali in grado di resistere a temperature fino agli 800/900 °C senza blade-cooling ma non alle temperature raggiunte dai VHTR di IV generazione, che possono raggiungere i 1000 °C.

Ciclo indiretto turbogas:

Il ciclo indiretto elimina di fatto la precedente problematica a scapito di maggiori perdite energetiche a causa dell'interposizione dello scambiatore intermedio. Nel ciclo indiretto si possono considerare differenti tipologie di turbina e di impianto, in quanto vi è maggior libertà progettuale grazie all'accoppiamento indiretto tra lato primario e secondario. Si possono distinguere il ciclo chiuso ed il ciclo aperto. Il ciclo chiuso più semplice raffigurato di seguito è così composto: il generatore di vapore ed il condensatore vengono rimpiazzati da due scambiatori gas-gas, che verranno denominati rispettivamente *heater* e *cooler*.

Il ciclo aperto si serve solo dello scambiatore *heater* in quanto il gas evolvente in turbina viene scaricato direttamente in ambiente, proprio come nella maggior parte delle applicazioni già note in campo aeronautico, di potenza e navale.

Il ciclo chiuso contempla un circuito secondario in cui il fluido motore che alimenta la turbina secondo i design ad oggi disponibili può essere He o CO₂ supercritica. L'efficienza del ciclo dipenderà dalla massima e minima temperatura raggiunte dall'heater e dal cooler. La massima temperatura sarà funzione della temperatura della fonte termica nucleare e delle prestazioni dello scambiatore. La minima temperatura dipenderà invece, oltre che dalle prestazioni dello scambiatore, anche dal fluido utilizzato; si tenga presente infatti che la CO₂

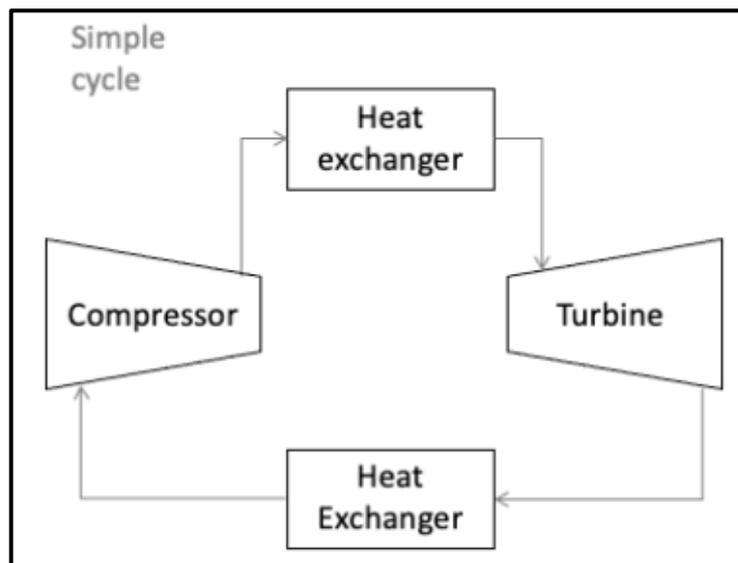


Figura 4.8 – Schema semplificato ciclo indiretto

ha una temperatura critica di circa 31 °C, il che obbliga a mantenersi sempre sopra questo limite. L'elio invece non presenta questo problema poiché la sua temperatura critica è talmente bassa da essere fuori da qualsiasi campo operativo. In entrambi i casi comunque c'è una dipendenza dalla temperatura della sorgente inferiore che è rappresentata da acqua di mare, che potrà fluttuare a seconda della zona geografica e della stagione. Questi aspetti evidenziano una chiara problematica operativa nel caso in cui si scelga l'utilizzo di una turbina a diossido di carbonio; se si considera il peggior scenario proposto dallo studio [27] in cui la massima temperatura raggiunta dalla superficie marina è di 36 °C risulta evidente che lo scambiatore inferiore non riuscirebbe a rilasciare il proprio calore, anzi funzionerebbe al contrario. Lo studio si riferisce alle condizioni più estreme del Golfo Persico, uno dei mari più caldi del mondo; in realtà la temperatura media dei mari si aggira intorno ai 20°C, ma con una forte variabilità a seconda dei contesti geografici e stagionali. Ad ogni modo non si può trascurare questo limite operativo, che suggerirebbe l'elio come miglior soluzione in caso di ciclo chiuso. I vantaggi della CO₂ sarebbero l'elevato rendimento, un'estrema compattezza e leggerezza della turbina, nonché la rapida risposta ai carichi ed è per questo che eventuali sviluppi dei reattori ad alta temperatura in campo propulsivo potrebbero portare all'utilizzo di miscele di gas CO₂-He. Nel caso di ciclo aperto il fluido che espande

in turbina è l'aria e questa caratteristica mette in luce alcuni vantaggi non trascurabili. I vantaggi che ne risultano sono principalmente due: si possono utilizzare organi rotanti più simili a quelli già utilizzati in alcune applicazioni navali (l'unica differenza è l'assenza del combustore degli impianti turbogas tradizionali) e non è più necessario il cooler in quanto l'aria viene scaricata direttamente in ambiente. Nonostante non vi sia necessità dello scambiatore inferiore è pur sempre vero che un ciclo ottimizzato dovrebbe comunque servirsi di un sistema di recupero termico del calore uscente dalla turbina come raffigurato dalla Figura 4.9; ad ogni modo nel suo complesso l'impianto lato secondario risulta semplificato rispetto al ciclo chiuso. Altro aspetto positivo del ciclo aperto rispetto a quello chiuso è la migliore capacità di adattamento al carico, proprio grazie all'assenza dello scambiatore inferiore. Nonostante ciò la regolazione di tale sistema è comunque limitata rispetto ad una turbina con combustore in quanto in questo caso è accoppiata ad uno scambiatore di calore, il quale riceve calore dal reattore. Un approccio alternativo che consentirebbe maggiori margini è rappresentato in Figura 4.10: vengono utilizzate due turbine, una per muovere il compressore ed una accoppiata al carico. In questo modo una *waste gate valve* all'uscita del primo compressore ha la possibilità di utilizzare solo il gas richiesto; questa soluzione già ampiamente utilizzata negli impianti turbogas meriterebbe ulteriori approfondimenti legati all'efficienza del ciclo a carichi ridotti, che però non sono strettamente legati alla trattazione.

Un aspetto negativo è dovuto ai condotti di entrata ed uscita dell'aria, i quali introducono delle perdite non presenti nel ciclo chiuso; questo a parità di altre condizioni rende tale soluzione meno efficiente; se si considera però che il cooler non è presente e che rende più semplice avere basse temperature del fluido in ingresso allora la differenza di efficienza rispetto al ciclo chiuso si riduce, rendendo di fatto le due soluzioni quasi comparabili.

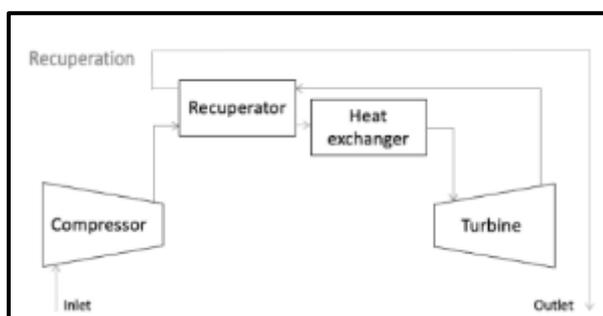


Figura 4.9 – Schema ciclo aperto con recuperatore

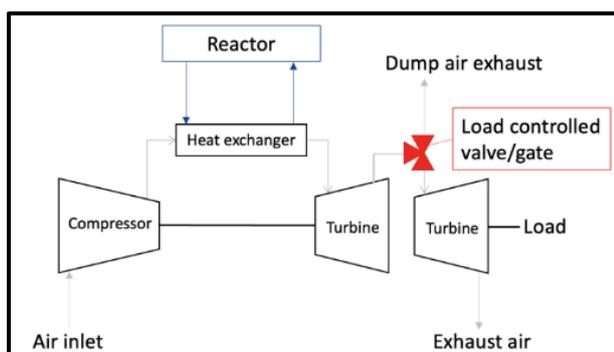


Figura 4.10 – Schema ciclo aperto con waste gate valve

Turbina a vapore:

Per il ciclo indiretto con turbina a vapore la questione relativa alla grandezza e complessità dell'impianto si complica maggiormente come viene spiegato di seguito.

L'utilizzo della turbina a vapore può essere giustificato dalla maggior temperatura alla quale viene fornito il calore dal lato primario. Le temperature elevate raggiunte dal reattore sono però incompatibili (troppo basse) con quelle raggiungibili dall'impianto a vapore che può spingersi fino a circa 500-600 °C; queste temperature sono comunque decisamente superiori rispetto a quelle ottenibili utilizzando un reattore pressurizzato e di conseguenza il rendimento del ciclo Rankine risulta essere superiore per l'HTR. L'utilizzo della turbina a vapore con HTR determina delle dimensioni dell'impianto considerevoli; inoltre se si considera la presenza del condensatore a valle della turbina (elemento di notevoli dimensioni all'interno dell'impianto) e che per consentire più efficienti operazioni di inseguimento del carico è opportuno utilizzare sistemi di surriscaldamento e che per aumentare il rendimento conviene utilizzare uno o più stadi di risurriscaldamento allora la complessità, le dimensioni ed i costi dell'impianto inizierebbero a diventare proibitivi (se comparati ad una soluzione più compatta, flessibile ed economica come la turbina a gas). Un'ultima considerazione che merita di essere commentata è l'estrema pericolosità del vapore nei confronti dell'impianto nucleare ad alta temperatura, in particolare del rischio di esplosioni a contatto con la grafite; questo obbliga ad utilizzare uno scambiatore intermedio (IHX – Intermediate Heat Exchanger), confermando ancora una volta l'eccessiva complessità impiantistica.

La panoramica esposta in relazione agli impianti che si possono implementare con un reattore modulare ad alta temperatura porta a concludere che per fini propulsivi la soluzione più ragionevole a breve termine è rappresentata dalla turbina a gas con ciclo aperto. Tale scelta deriva principalmente dalla maggior semplicità impiantistica e dalla maggior capacità di adattarsi al carico richiesto; questi due requisiti all'interno di una nave sono estremamente importanti, al punto da giustificare una ridotta efficienza. Si tenga conto che nella tecnologia nucleare l'efficienza non è legata a maggiori emissioni come invece avviene nei sistemi tradizionali a combustibile fossile; inoltre i periodi di refueling hanno durate decisamente superiori ai periodi di rifornimento del carburante e dunque è possibile accettare l'utilizzo di sistemi che non ottimizzano al meglio il consumo di combustibile nucleare. Un'altra considerazione da fare è che le navi a propulsione elettrica, le quali ben si adattano alla fonte termica nucleare, avendo a disposizione sistemi di stoccaggio di elettricità potranno avere dei reattori che non lavoreranno in condizioni di off-design particolarmente spinte. L'utilizzo del ciclo Rankine con i reattori ad alta temperatura è comunque una possibilità da tenere in considerazione, soprattutto a medio/lungo termine tenendo presente che sono in fase di studio cicli Rankine con liquidi supercritici a basso punto di ebollizione (ammoniaca ed etanolo), che consentirebbero una riduzione importante delle dimensioni dell'impianto.

La prospettiva delineata dalla IV generazione pone comunque le basi per applicazioni VHTR con utilizzo di turbine a vapore; uno studio del 2022 [28] indaga la reale possibilità di questo tipo di applicazione a lungo termine. Nello studio si mette in luce come questo tipo di soluzione potrebbe stravolgere in maniera significativa i trasporti marittimi, determinando una serie di conseguenze interessanti, una tra tutte l'aumento delle dimensioni delle navi per un trasporto più sostenibile. Ad ogni modo vi sono ancora molte discussioni aperte riguardo

la potenzialità di queste soluzioni, dunque non verrà indagata la sua fattibilità all'interno della tesi.

Le dimensioni dell'impianto come detto risultano svantaggiose rispetto agli SMR competitors: secondo una stima dello stesso studio relativo ai VHTR per propulsione navale un impianto navale con potenza termica di 175 MW avrà delle dimensioni complessive di circa 20x10x15 metri (altezza, base, profondità); l'accettabilità di tali dimensioni è giustificata dall'assenza di cisterne di stoccaggio di combustibile presenti nelle navi a propulsione tradizionale.

4.5 Lead-bismuth fast reactor

Come anticipato gli investimenti sugli SMR a fini propulsivi hanno portato anche a tipologie di reattori veloci refrigerati a piombo bismuto. Di seguito verranno indicate le loro principali caratteristiche, le loro potenzialità e criticità. Va però detto che rispetto ai PWR e HTR presentano degli aspetti innovativi che li renderanno implementabili sicuramente in un futuro più remoto. Le logiche relative alla IV generazione ad ogni modo rappresentano un punto fondamentale del futuro della tecnologia nucleare, dunque è importante sottolinearne le loro potenzialità anche in campo propulsivo.

4.5.1 Caratteristiche tecnologiche

Innanzitutto bisogna sottolineare che questo tipo di reattore è un reattore a spettro veloce, quindi non è presente un moderatore in quanto i neutroni non devono essere rallentati fino allo spettro termico; questo aspetto introduce una serie di vantaggi e di problematiche operative riassunte qui di seguito:

- Bisogna evitare tutti i materiali in grado di moderare, in primo luogo l'acqua
- Il fatto che i neutroni rimangano ad elevate energie comporta il fatto che le sezioni d'urto tendano ad avere dei valori bassi ma molto simili tra di loro al variare della reazione e del materiale; in termini pratici vi è pressoché la stessa probabilità di avere tutte le reazioni con qualsiasi materiale. Una delle conseguenze è che la scelta dei materiali si può fare sulla base di caratteristiche termo-strutturali, trascurando quelle neutroniche con un chiaro vantaggio in termini di resistenza. Un'altra conseguenza è che il numero di fissioni sarà basso rispetto allo spettro termico dunque per mantenere un adeguato tasso di fissione bisogna agire sulla densità neutronica e sul flusso neutronico. Tali caratteristiche fanno sì che i reattori veloci abbiano elevati arricchimenti, elevate densità di potenza, elevata compattezza e quindi è importante utilizzare un sistema efficiente di asportazione del calore (metallo liquido) e scegliere dei materiali che siano resistenti all'infragilimento neutronico indotto dall'elevato flusso neutronico
- I reattori veloci hanno grandi potenzialità in termini di chiusura del ciclo del combustibile, proprio grazie alla capacità di trasmutazione degli attinidi minori e/o alla capacità di utilizzare combustibili alternativi. Tale aspetto non è direttamente legato all'aspetto navale ma è un punto importante legato al futuro di tutta la tecnologia nucleare

Una problematica operativa di questi reattori è la necessità di mantenere sempre il core al di sopra della temperatura di fusione onde evitare la solidificazione del refrigerante metallico (freezing). I reattori refrigerati a piombo-bismuto si servono del bismuto con il fine di abbassare la temperatura di fusione e quindi ridurre il rischio di freezing; l'impiego del bismuto può abbassare la temperatura di fusione anche di 200 °C ma porta con sé una sua parziale trasmutazione in Po^{210} in seguito all'irraggiamento neutronico: il polonio è un materiale con isotopi molto radioattivi, oltre che fortemente erosivo e corrosivo. Per contro bisogna dire che alla pressione atmosferica a cui operano questi reattori, la temperatura di evaporazione è di circa 1700 °C e quindi irraggiungibile. Aspetto positivo è la bassissima reattività chimica di questo tipo di refrigerante. I due reattori presi come modello sono i già citati MicroURANUS (Corea del Sud) da 20 MW_e e Gen4Energy SMR (USA) da 25 MW_e; il primo in virtù del fatto che è stato appositamente progettato a fini propulsivi per navi mercantili, il secondo perché in seguito a indagini scientifiche sembra avere ottime potenzialità su navi cisterna di grandi dimensioni [29]. La sicurezza di questi reattori è garantita intrinsecamente dal piombo-bismuto solido che nel peggior scenario incidentale sarebbe in grado di contenere il materiale radioattivo e di asportare efficientemente il calore verso l'esterno grazie all'elevata conducibilità termica. Entrambi hanno una durata operativa di oltre 40 anni (con un unico refueling dopo circa 30 anni) e si è stimato che una volta creata un'infrastruttura efficiente per la costruzione e distribuzione di tale SMR avrebbero dei costi totali durante tutta la vita operativa di gran lunga superiore a quella dei moderni motori diesel.

In particolare spiccano le ridotte dimensioni del RPV americano (Diametro = 1.5 m; Altezza = 4 m) che determinerebbero un grande risparmio di spazi se comparato con i PWR o ancora di più con gli HTR.

Il sistema secondario può essere quello tradizionale a vapore come avviene nel Gen4Energy SMR ma sono in fase di studio sistemi che utilizzano CO₂ supercritica nel MicroURANUS; quest'ultimo sistema consentirebbe di avere un impianto caratterizzato da estrema compattezza ed efficienza.

Un notevole punto a favore di questo reattore è il fatto che non sussiste più la problematica relativa all'accumulo di Xe¹³⁵; nei reattori veloci infatti come già anticipato si ha pressoché la stessa probabilità di avere ogni tipo di reazione per ogni elemento.

In generale si può dire che i reattori a spettro veloce avranno grandi potenzialità grazie alla loro estrema compattezza ed alla capacità di contribuire in maniera sostanziale alla chiusura del combustibile; anche in termini di sicurezza sono molto promettenti, anche se bisognerà aspettare ancora alcuni anni affinché il loro utilizzo a fini propulsivi venga validato per via delle criticità operative che li rendono tecnologicamente ancora complessi.

4.6 Molten Salt Reactor

I reattori a sali fusi rappresentano la tipologia di reattore più innovativa tra quelle proposte. Fanno parte, come i reattori a spettro veloce, della IV generazione ed hanno all'interno della loro logica di funzionamento dei principi che li rendono particolarmente attrattivi per la propulsione navale. Di seguito si fa riferimento alle caratteristiche del concept design del reattore di TerraPower (di cui non si dispone pubblicamente in realtà una grande quantità di dati), sul quale si stanno effettuando investimenti proprio per fini propulsivi.

Tale reattore è refrigerato a sali di cloro fusi, i quali fluiscono insieme al combustibile all'interno delle tubazioni; ciò rende tale reattore concettualmente diverso da tutti quelli visti finora e molto complesso da far funzionare. Il ciclo è chiuso con possibilità di riprocessamento online, il che significa che in prospettiva questo tipo di reattore sarà il più promettente rispetto alla chiusura del ciclo di combustibile, con possibilità di consumare il plutonio e gli attinidi minori. In questo tipo di sistema la possibilità del riprocessamento online rende possibile il controllo della reattività agendo sui sistemi di ricircolo ed immissione di nuovo combustibile. Questo implica ulteriori stravolgimenti all'impianto rispetto a tutti quelli già descritti e consente inoltre di eliminare le barre per la regolazione della reattività. Dal momento che questa tipologia di MSR è a spettro veloce vale lo stesso discorso sullo Xe^{135} fatto sui reattori refrigerati a piombo-bismuto. Ad ogni modo, anche se dovesse essere implementato un reattore MSR a spettro termico, il fatto di avere il combustibile liquido consentirebbe di liberare dalle tubazioni attraverso opportuni sfiati lo xenon gassoso che eventualmente si dovesse accumulare; a tal proposito lo studio [30] si è occupato di simulare proprio l'accumulo di Xe^{135} , la sua solubilità nella miscela sali-combustibile ed il suo rilascio.

Ulteriori benefici di questo tipo di reattore compatto sono:

- Temperature operative elevate; le temperature del refrigerante nell'intorno dei 600 -700 °C consentono, come nel caso degli HTR, un miglioramento dell'efficienza, nonché la possibilità di impiegare il calore per scopi cogenerativi o per soddisfare processi all'interno della nave che richiedano calore
- L'operatività di questo tipo di reattore sarà intrinsecamente sicura e con necessità minima di azioni da parte di operatori esterni
- Eliminazione del rischio proliferazione in quanto non sono necessarie strutture esterne alla nave di arricchimento o di riprocessamento. Tale punto è forse il più promettente ed innovativo ma richiede ancora un notevole sforzo tecnologico per poter essere implementato, in particolar modo su una nave

Per quanto riguarda la scelta dell'impianto secondario è possibile come nel LBFR scegliere un impianto a vapore o a gas. Le considerazioni generali fatte in precedenza su questi due sistemi sono sempre valide ma è utile evidenziare che il MSR a spettro veloce essendo più compatto dei reattori (V)HTR ed essendo in grado di inseguire il carico in maniera ottimale rispetto agli altri reattori è facilmente adattabile anche alla turbina a vapore; la temperatura a cui il calore viene fornito è sufficientemente elevata da massimizzare il rendimento del ciclo Rankine.

Analogamente al caso del reattore veloce a piombo-bismuto, quello a sali fusi rappresenta una prospettiva che potrebbe rivoluzionare in maniera drastica la mobilità marittima, in quanto le loro logiche rispecchiano appieno quelli che sono i dettami della IV generazione. Il futuro di queste due soluzioni è promettente grazie alla loro sostenibilità e sul lungo periodo possono essere una soluzione propulsiva competitiva oltre che dal punto di vista tecnologico anche da quello economico.

4.7 Tipologie di navi

La scelta del tipo di imbarcazione che si adatta alle varie tipologie di reattore è principalmente dettato da ragioni energetiche e di potenza richiesta. Altre considerazioni possono essere fatte sulla base dei particolari layout impiantistici che caratterizzano ogni tipo di vascello ma in questa sede hanno poca rilevanza. Vi sarebbero infatti delle considerazioni particolari per ogni tipo di imbarcazione e per ogni tipo di reattore a livello di layout impiantistico ottimale. Ad ogni nave bisognerebbe apportare più o meno drastiche modifiche progettuali per poterle adattare ad un sistema propulsivo nucleare. Dunque gli unici punti che vengono ritenuti fondamentali in questa sede sono il soddisfacimento del fabbisogno energetico e l'applicabilità su navi di medie e grandi dimensioni.

Le relativamente grandi dimensioni degli impianti SMR rispetto ai motori diesel infatti impongono la necessità di implementare questo tipo di soluzione su navi di grandi dimensioni, le quali necessariamente avranno elevate richieste di potenza propulsiva (anche di potenza complessiva, anche se quest'ultima non è sempre direttamente legata alla taglia come lo è la potenza propulsiva); in questo modo viene giustificato l'utilizzo di un sistema costoso e relativamente ingombrante come quello nucleare. A tal proposito bisogna però tenere a mente che l'utilizzo del reattore compatto permetterebbe l'eliminazione del cosiddetto bunker all'interno del quale viene stoccato il carburante; dunque per quanto l'insieme impiantistico nucleare sia sicuramente più complesso e ingombrante di un motore diesel, in termini di spazio totale occupato i due sistemi possono essere comparabili (per imbarcazioni di medio-grandi dimensioni). Dunque l'obiettivo principale da qui in avanti è quello di scegliere un impianto efficiente che riesca a soddisfare tutte le richieste energetiche della nave. A seconda della tipologia di nave e di reattore scelto è possibile utilizzare una configurazione ad uno o due reattori.

La scelta è basata sul tipo di reattore a disposizione e sul tipo di nave sul quale si vuole implementare il sistema. La potenza propulsiva delle navi di grossa taglia può andare dai 25 agli 80 MW, la quale rappresenta dal 50 al 95 % della potenza richiesta totale. Da questi dati indicativi è evidente come vi sia una forte variabilità a seconda del caso in esame. Per fare un esempio pratico, la potenza propulsiva delle navi portacontainer si aggira intorno all'80-90 % di quella totale, mentre le navi da crociera possono in alcuni casi arrivare ad avere una potenza propulsiva pari alla metà di quella totale. Questi dati sono da ricercarsi principalmente nell'enorme differenza di passeggeri trasportati, ai quali deve essere garantito il fabbisogno energetico (condizionamento, utenza elettrica in cabina, svaghi...); altre tipologie di navi, come ad esempio le petroliere, potranno oscillare tra i suddetti valori in quanto non hanno passeggeri paganti ma hanno al proprio interno dei sistemi particolarmente energivori per il trattamento dei liquidi trasportati. Si tenga conto che generalmente l'aumento della dimensione di una nave provoca una diminuzione in termini percentuali della potenza degli ausiliari (la potenza propulsiva aumenta quasi linearmente con il peso dell'imbarcazione mentre l'aumento della potenza degli ausiliari è meno marcato). Si ricorda che le richieste termiche della nave, che vengono assolte dai boilers all'interno dei quali si produce vapore non vengono considerate in quanto soddisfatte da sistemi di recupero termico che sfruttano la fonte termica nucleare; eventualmente un sovradimensionamento del reattore può essere considerato laddove vi siano applicazioni con particolarmente elevati fabbisogni termici.

Ulteriori considerazioni che sarà necessario fare sono relative all'andamento della curva di carico della nave; la variazione del carico sarà principalmente dovuta alla variazione della

richiesta propulsiva in quanto gli ausiliari non hanno tipicamente una forte variazione (se non a livello stagionale). La conoscenza della curva di carico è importante per la scelta del reattore da implementare; infatti bisogna evitare di installare un reattore sovradimensionato che lavorerebbe in condizioni di off-design eccessivamente spinte e che provocherebbe le problematiche già discusse nei paragrafi precedenti. Un elemento di particolare interesse è caratterizzato dal SMCR (Specified Maximum Continuous Rating) il quale rappresenta il massimo output in termini di potenza propulsiva che il motore principale è in grado di erogare in maniera continua mantenendosi all'interno dei limiti di sicurezza; questo di fatto significa che un reattore si troverà necessariamente a lavorare molto spesso a percentuali di carico inferiori al 100 %. La conoscenza del SMCR che è variabile a seconda del tipo di nave è un dato particolarmente interessante per poter valutare quale sia l'output che consentirebbe un funzionamento il più possibile a carico costante del reattore; dunque è possibile considerare anche l'utilizzo di un solo reattore il quale funzioni sempre a pieno carico (o quasi), supportato da un motore diesel sottodimensionato che avrà lo scopo di soddisfare picchi di carico. Molte delle considerazioni che verranno fatte in merito alle imbarcazioni e ai reattori sono opportunamente estrapolate dall'indagine di fattibilità di Carlton pubblicata sul Journal of Marine Engineering & Technology [31]. Le navi vengono classificate a seconda del loro dislocamento⁷ e del carico che riescono a trasportare. A seconda dell'impiego a cui l'imbarcazione è deputata il carico può essere espresso in DWT⁸ (navi cargo e navi cisterna), passeggeri (navi passeggeri), TEU⁹ (navi portacontainer). Il dislocamento e il carico sono i due principali parametri che consentono di stimare la potenza propulsiva della nave, mentre la potenza degli ausiliari dipenderà anche dalla tipologia. I dati riportati di seguito hanno l'obiettivo di catalogare le navi a seconda delle loro dimensioni e valutare quale tipologia di reattore (in termini di potenza) vi si addice. I dati riportati si riferiscono chiaramente a navi che presentano un sistema propulsivo tradizionale (diesel se non diversamente specificato), dunque quando si parlerà di potenza propulsiva ci si riferisce alla potenza di spinta erogata dall'elica, mentre quando si parla di potenza degli ausiliari ci si riferisce alla potenza elettrica prodotta dal generatore alimentato da motori diesel ad hoc. Nel nostro caso il reattore (o i reattori) alimentano uno o più generatori che a loro volta avranno il compito di suddividere il flusso elettrico al sistema propulsivo ed agli ausiliari; questo significa che tutta la potenza prodotta in questo caso è elettrica e la potenza propulsiva sarà l'output di una catena di rendimenti rappresentata da: generatore, eventuali trasformatori, motore elettrico, eventuali riduttori di velocità, elica. La conclusione di queste considerazioni è che la taglia del reattore compatto deve essere scelta tenendo conto di queste perdite di potenza dopo la generazione di energia elettrica; partendo da una stima conservativa si può pensare che l'ammontare totale di tali perdite può essere pari al 10 % (si tenga conto che i grandi motori elettrici hanno rendimenti in condizioni di design superiori al 95 % e che i trasformatori arrivano al 99 %).

⁷ Rappresenta la massa d'acqua spostata dalla nave, la quale per il principio di Archimede è uguale alla massa totale della nave in quanto il peso dell'acqua e della nave si equivalgono. Viene tipicamente indicato con la lettera D e misura la massa della nave a vuoto.

⁸ Deadweight tonnage – è la misura di quanto peso la nave può caricare. Rappresentato dalla somma di: carico, combustibile, acqua (non quella degli impianti), equipaggio.

⁹ Twenty-foot equivalent unit – è l'unità di misura della lunghezza standard per i container e come dice il nome stesso equivale a 20 piedi (all'incirca 6 metri)

4.7.1 Navi portacontainer

Tipologia nave	di	Capacità (TEU)	Dislocamento (t)	Potenza propulsiva (MW)	Potenza ausiliari (MWe)	Potenza reattore/i (MWe)
Feeder		1000-3000	12000-32000	4-16	0.3-4	4.7-21
Panamax		3000-5000	43000-57000	13-32	1-2.5	15-38
Post-Panamax		5000-10000	56000-85000	25-69	1-4.5	28-81
New Panamax		10000-14500	98000-130000	42-77	2-7	48-90
ULCV – Ultra Large Container Vessels		14500-24000	110000-135000	58-80	2.2-6	66-95

Tabella 4.2 – Riassunto dati di potenza per tipologia di nave portacontainer [32]

L'utilizzo di due reattori viene quasi sempre preso in considerazione su navi militari e rompighiaccio per le elevate potenze richieste e per garantire maggior ridondanza; tale requisito seppur benefico, diventa opzionale sulle generiche navi mercantili, le quali lavorano in condizioni ordinarie a differenza delle prime due tipologie. Si nota come fino alle navi di tipo Panamax la potenza totale richiesta sia piuttosto bassa, il che richiederebbe l'utilizzo di un SMR di taglia piuttosto ridotta (minore di 40 MWe); esistono i microreattori che potrebbero essere in tal caso implementabili ma ad oggi non sono ancora stati effettuati studi approfonditi riguardanti questo tipo di applicazione in campo navale. Ad essere precisi il progetto NEREUS evidenziato nel capitolo 3 prevedeva un reattore Pebble-Bed con una potenza elettrica di appena 8 MW, quindi destinato eventualmente a navi del tipo Feeder oppure se utilizzato con configurazione a 2 (o più) reattori a navi del tipo Panamax. In generale, come detto risulta conveniente applicare la propulsione nucleare a grandi imbarcazioni anche per via del fatto che un funzionamento a carico parziale del reattore risulterà più complesso da gestire al diminuire della taglia. Alla luce di ciò per quanto riguarda le navi portacontainer si può affermare che le tipologie che meglio si adattano a tale applicazione sono le ULCV, le New Panamax e le Post Panamax. Il fatto che sia meno conveniente non significa però che anche su navi di dimensioni medie non sia una soluzione adottabile e benefica in termini energetici. La Figura 4.11 mette in risalto l'attuale parco navi portacontainer in termini di TEU (in quanto è la misura che meglio è correlabile alla potenza installata) e la Figura 4.12 descrive quelli che erano gli ordini previsti per il 2019; dal trend risulta chiaro come le ULCV e le New Panamax saranno destinate a ricoprire l'80 % della potenza installata di tutte le navi portacontainer e quindi dimostrando come l'utilizzo di propulsione nucleare anche solo su queste due tipologie si rifletterebbe in una forte diminuzione delle emissioni di CO_{2e}.

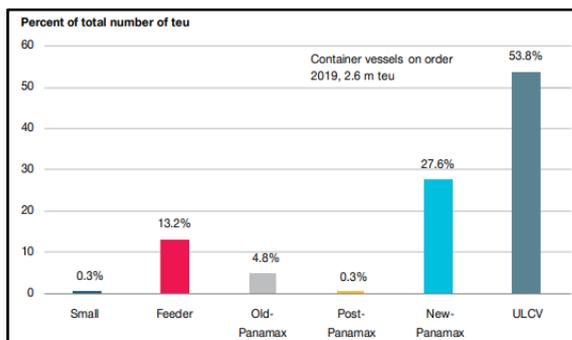


Figura 4.12 – Distribuzione dei TEU per le navi portacontainer in previsione di costruzione

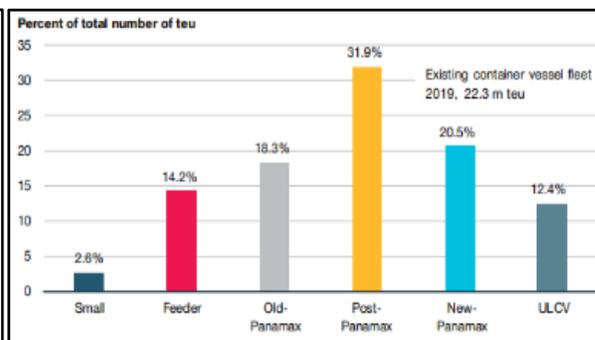


Figura 4.11 – Distribuzione dei TEU per tipologia di nave portacontainer

4.7.2 Navi cisterna (petroliere – Oil Tanker)

Tipologia di nave	DWT (10 ³ t)	Dislocamento (t)	Potenza propulsiva (MW)	Potenza ausiliari (MW _e)	Potenza reattore/i (MW _e)
Handy	15-35	39000-53000	6-11	1.9-5.2	9-17
Aframax	80-120	120000-123000	11-16	1.2-4	13-22
Suezmax	120-200	130000-183000	9.5-22	1.8-10	13-34
VLCC – Very Large Crude Carrier	200-320	319000-355000	22-32	1.7-18	26-53
ULCC – Ultra Large Crude Carrier	>320	365000-500000	27-50	2-18	32-74

Tabella 4.3 - Riassunto di potenza per tipologia di nave cisterna [33]

La relativamente maggiore potenza richiesta degli ausiliari nelle navi cisterna rispetto alle navi portacontainer è dovuta ai numerosi sistemi di pompaggio e di condizionamento presenti per la gestione del liquido trasportato. Si noti anche che i valori di dislocamento di queste imbarcazioni sono notevolmente superiori rispetto a quelli delle navi portacontainer pur avendo delle potenze propulsive inferiori. Ciò è spiegabile dal tipo di carico trasportato, infatti il peso specifico del greggio è inferiore a quello dei beni trasportati nei containers (e dei containers stessi), richiedendo imbarcazioni più grandi.

In generale è possibile fare lo stesso discorso fatto in precedenza per le portacontainer, dunque l'utilizzo di SMRs sarà più conveniente per le ULCC, VLCC e Suezmax.

4.7.3 Navi portarinfuse (Bulk Carrier Ship)

Tipologia di nave	DWT (10 ³ t)	Potenza propulsiva (MW)	Potenza ausiliari (MW _e)	Potenza reattore/i (MW _e)
Small	<15	/	/	
Handy e handymax	15-55	6-14	1.5-5	10-21
Panamax	55-80	8-17	1.5-5	11-24
Capesize	80-200	12-22	3-6	16-30
Large Capesize	200-300	22-30	3.5-7	28-40
VLBC – Very Large Bulk Carrier	>300	25-72	4-9.6	31-90

Tabella 4.4 - Riassunto di potenza per tipologia di nave bulk carrier [34]

Per quanto riguarda le potenze propulsive proposte si tiene conto che queste dipendono principalmente dal DWT e dal dislocamento (in altri termini dalla massa totale) dunque è possibile paragonare le potenze delle Bulk carrier ships con quelle delle Oil tanker ships con pari DWT, dal momento che le dimensioni sono pressoché le stesse, al variare del carico trasportato.

4.7.4 Navi passeggeri

Le navi passeggeri, in particolare le navi da crociera si caratterizzano per l'elevata richiesta in termini di ausiliari. Le potenze propulsive dipendono anche in questo caso dalle dimensioni, le quali sono solitamente correlabili alla capienza in termini di passeggeri. Dunque per piccoli traghetti da poche centinaia di passeggeri si potranno avere potenze complessive di 5-10 MW (in questo caso la potenza necessaria agli ausiliari non è così elevata in quanto il servizio principale erogato ai clienti è il trasporto); se si prendono in considerazione le cosiddette Mega-cruise ships che possono trasportare migliaia di passeggeri, nei casi più estremi si richiedono gruppi di motori con un output propulsivo di 70-90 MW e gruppi di motori ausiliari con una potenza che in taluni casi possono raggiungere la metà di quella complessiva. I generatori diesel delle tradizionali navi da crociera hanno una potenza che si può attestare intorno alle dieci volte in più rispetto alle generiche navi cargo. Per avere un quadro più completo è utile commentare la Tabella 4.5 riportata di seguito.

I dati riportati in Tabella 4.5 sono relativi ad una piccola nave da crociera con una capacità di 1800 passeggeri paganti, operante nel Mar Baltico. La potenza totale dei quattro motori principali ammonta a 23'400 MW, mentre la potenza dei quattro gruppi ausiliari risulta 11000 MW_e; secondo le stime sui rendimenti fatte in precedenza, considerando nel nostro caso una propulsione elettrica, la nave avrebbe un fabbisogno elettrico di 37000 MW_e. Come affermato precedentemente si può notare come quasi la totalità della potenza termica delle caldaie proviene dagli HRSG alimentati dai gas di scarico e dall'olio lubrificante, mentre solo una minima parte proviene dalla combustione di gas metano stoccato a parte. Un altro punto di interesse è che buona parte della potenza elettrica ausiliaria (36 %) è necessaria al funzionamento dei compressori dell'impianto di condizionamento. Tali considerazioni conducono a considerare che tra le navi passeggeri, le grandi navi da crociera siano estremamente adattabili ad una fonte energetica nucleare, per via delle loro enormi richieste energetiche che nel loro complesso possono superare senza problemi i 100 MW_e.

La grossa criticità legata a questo tipo di applicazione proviene però dal fatto che difficilmente potrà essere, almeno nel breve periodo, accettata dal grande pubblico una soluzione di questo tipo su un'imbarcazione che trasporta migliaia di passeggeri.

Unit Name	N	Rated Power ($\dot{W}_{des}/\dot{Q}_{des}$)	Other Info
Main engine	4	5850	4-stroke, Nominal speed: 500 rpm, 6 cyl, Bore: 460 mm, Stroke: 580 mm, bsfc at rated power: 175 g/kWh
Auxiliary engine	4	2760	4-stroke, Nominal speed: 750 rpm, 6 cyl, Bore: 320 mm, Stroke: 400 mm, bsfc at rated power: 184 g/kWh
HRSG (ME)	2	800	Based on 1000 kg/h steam at 7 bar. Only installed on ME2 and ME3
HRSG (AE)	4	640	Based on 800 kg/h steam at 7 bar
Sea water cooler	2	5400	Based on a max water flow of 725 m ³ /h
Electric generator	4	3312 (kVA)	8 poles, 50 Hz
Auxiliary boiler	2	4500	
HVAC-Preheater	1	3500	
HVAC-Reheater	1	1780	
HVAC-Compressors	2	2015	

Tabella 4.5 – Principali componenti dei sistemi energetici di una nave da crociera [54]

4.8 Conclusioni

La Tabella 4.6 seguente riporta un riassunto dei vantaggi e degli svantaggi dei quattro tipi di SMR proposti. Alla luce di quanto esposto è possibile concludere che la tecnologia nucleare presenta notevoli vantaggi rispetto a quella tradizionale per propulsione navale; tali vantaggi risiedono principalmente nell'abbattimento di una grossa quota di GHG.

	PRO	CONTRO
PWR	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Elevata esperienza maturata su questo tipo di reattori ▪ Esperienza già nota in campo propulsivo navale 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Minori livelli di sicurezza intrinseca rispetto ai competitori ▪ Relativamente bassi burnup ▪ Sensibilità ai veleni neutronici (Xe^{135}) ▪ Basse temperature
HTR/VHTR	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Elevati livelli di sicurezza passiva ▪ Elevata resistenza alla proliferazione ▪ Elevati burnup ▪ Buona esperienza maturata ▪ Alte temperature (alti rendimenti e utilizzo di calore) ▪ Possibilità di refueling online (Pebble bed) ▪ Utilizzo di combustibile alternativo (Torio) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sensibile a movimenti e oscillazioni in caso di Pebble bed ▪ Sensibilità a veleni neutronici ▪ Dimensioni elevate ▪ Gestione della grafite a fine vita
LBFR	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sicurezza passiva ▪ Elevata resistenza alla proliferazione ▪ Elevati burnup ▪ Non sensibile ai veleni neutronici ▪ Dimensioni ridotte ▪ Medio-alte temperature (alti rendimenti e utilizzo di calore) ▪ Utilizzo di combustibile alternativo ▪ Ottimale gestione del ciclo del combustibile 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ridotta esperienza tecnologica ▪ Problematiche operative ancora aperte
MSR	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sicurezza passiva ▪ Elevata resistenza alla proliferazione ▪ Elevati burnup ▪ Gestione flessibile del ciclo del combustibile 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ridottissima esperienza tecnologica ▪ Problematiche operative ancora aperte legate all'utilizzo dei sali fusi

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alte temperature (alti rendimenti e utilizzo di calore) ▪ Non sensibile ai veleni neutronici ▪ Utilizzo di combustibili alternativi (Torio) ▪ Elevate capacità di inseguimento del carico 	
--	--	--

Tabella 4.6 – Riassunto dei pro e contro dei quattro reattori considerati

Dalla Tabella 4.6 si possono trarre delle conclusioni legate alle migliori opzioni. È possibile affermare con certezza che la tipologia di SMR che potranno essere impiegati nel breve-medio periodo in campo propulsivo sono i pressurizzati grazie all'elevato TRL¹⁰ rispetto ai competitors. Nonostante ciò i PWR hanno dei limiti intrinseci che invece possono essere sorpassati attraverso l'utilizzo di altri tipi di reattore, in primis la bassa temperatura operativa e l'accumulo di Xe¹³⁵ a carichi ridotti.

Gli HTR sembrano essere in termini di tempi di applicabilità propulsiva i più prossimi dopo i PWR e hanno caratteristiche promettenti ad esempio quella di rendere possibile l'eventuale utilizzo di torio come combustibile, quella di utilizzare turbine a gas (migliori in termini di load following per propulsione) e di gestire il calore ad alta temperatura per soddisfare molteplici compiti. Hanno lo svantaggio principale dell'ingombro e sono come i PWR suscettibili all'accumulo di Xe¹³⁵.

Per quanto riguarda gli ultimi due reattori proposti il loro principale punto di debolezza è il basso TRL dovuto a criticità tecnologiche ancora aperte, ma spiccano in particolare le potenzialità dei MSR in quanto presentano tutti i vantaggi tecnologici dei precedenti ma in più hanno una grandissima capacità di inseguimento del carico, oltre a contribuire in maniera significativa alla chiusura del ciclo di combustibile. Con i MSR si otterrebbe un impianto estremamente compatto, rapido in termini di inseguimento al carico, sicuro, efficiente ed innovativo sotto molteplici aspetti anche non direttamente legati alla propulsione. Le problematiche sopra descritte però lo rendono ancora lontano dalla sua possibile implementazione in campo navale.

È stato evidenziato nel corso del capitolo come il futuro della mobilità navale vedrà uno sviluppo anche della propulsione elettrica, la quale come si è visto presenta ottimi vantaggi in termini di efficienza ed è particolarmente adattabile alla fonte termica nucleare, motivo per cui si è scelto di prendere in considerazione come principale layout propulsivo il cosiddetto fuel-electric, il quale porrà le basi per la diffusione delle All-electric ships.

In generale per indagare la bontà di questi tipi di soluzione è stato necessario considerare molteplici aspetti; le considerazioni fatte nel corso del capitolo infatti si intrecciano tra di loro e spesso hanno forte dipendenza l'una con l'altra. L'aspetto puramente nucleare infatti influenza ed è influenzato dalla tipologia di impianto propulsivo ad esso accoppiato, dalla tipologia di nave (dimensioni, impiego, parametri prestazionali richiesti). A tal proposito si è visto come non vi sia una soluzione ottimale ma un insieme di soluzioni ognuna delle quali con le proprie peculiarità. Si è accennato inoltre al fatto che sia possibile utilizzare una

¹⁰ Technology Readiness Level – è un sistema di misurazione usato per valutare il livello di maturità di una certa tecnologia. La scala di misura va da 1 (ricerca tecnologica di base) fino a 9 (completa operatività).

soluzione ibrida, in cui il reattore fornisca buona parte dell'energia richiesta ed un motore diesel funga da supporto alle variazioni di carico; ciò non consentirebbe di sfruttare appieno l'abbattimento di CO_{2e}, ma soprattutto all'inizio, in caso di utilizzo di PWR, può parzialmente risolvere le problematiche legate al load following ed all'accumulo di Xe¹³⁵.

Una delle problematiche a più riprese sottolineata nel corso della trattazione è stata quella dell'inseguimento delle variazioni di carico tipiche del contesto navale e le possibili soluzioni; in questa ottica si è evidenziato come i PWR risultino i meno adatti a quest'applicazione anche se è possibile aggirare il problema attraverso alcuni accorgimenti tecnologici quali l'utilizzo di propulsione elettrica ed eventuale batteria di piccola taglia, il sottodimensionamento del reattore e l'inserimento di un generatore diesel di supporto, maggiore arricchimento del combustibile, utilizzo di sistemi di surriscaldamento del vapore.

5. Casi studio reattore-nave

5.1 Descrizione del caso studio

In quest'ultimo capitolo si vogliono indagare due applicazioni particolari scelte sulla base delle considerazioni riportate nei precedenti capitoli. L'obiettivo sarà quello di comparare due modelli impiantistici, nei quali l'SMR costituisca la base da cui partire, analizzarne i risultati sotto diversi aspetti per concludere quale possa essere la soluzione ottimale. La tipologia di reattore scelto per effettuare i calcoli è il PWR, in particolare si prende come modello il KLT-40S di concezione russa; le principali motivazioni di tale scelta sono le seguenti:

1. È un SMR già operativo (Akademik Lomonosov) che ha alle spalle due anni di funzionamento, aspetti che lo rendono una scelta solida ed affidabile. Inoltre il TRL (Technology Readiness Level) di tale reattore ha consentito di reperirne più facilmente le sue caratteristiche tecniche
2. Deriva da reattori studiati per la propulsione di navi rompighiaccio, quindi la sua taglia è più facilmente adattabile a navi mercantili di altro tipo
3. È un PWR, quindi rappresenta una soluzione realizzabile a breve termine; in questo modo la trattazione può ambire a creare dei presupposti applicativi per un futuro prossimo

Per poter adattare tale SMR ad un'applicazione puramente propulsiva è necessario però apportare alcune modifiche al modello originario montato sulla piattaforma galleggiante; dal momento in cui come detto il KLT-40S fa parte di una famiglia di reattori impiantisticamente simili e con caratteristiche tecniche paragonabili, nel corso del capitolo verranno utilizzati anche dati relativi non strettamente al KLT-40S ma ad uno o più dei reattori "fratelli". Lo scopo del capitolo non è quello di scegliere il preciso impianto nucleare da utilizzare (che come detto è incluso nella categoria dei PWR), quanto quello di analizzare la fattibilità dal punto di vista energetico dei layout proposti. Di seguito si descrivono per completezza le differenze principali rispetto al progetto originario.

Il KLT-40S rappresenta un'unità cogenerativa, dunque produce oltre che energia elettrica anche una notevole quantità di calore per spillamento di vapore dalla turbina; questa caratteristica che viene sfruttata nel presente studio dev'essere però ridimensionata in quanto le richieste termiche di una nave sono inferiori rispetto a quelle delle zone abitate a cui la piattaforma Lomonosov deve fornire energia. È possibile adottare questa modifica in quanto il progetto originario del reattore consente anche di non utilizzare affatto il sistema di cogenerazione e/o di modularlo a seconda delle richieste termiche.

La tipologia di nave scelta è la portacontainer, in particolare la ULCV (Ultra Large Container Vessel). Queste imbarcazioni di grande taglia come spiegato nel quarto capitolo sono particolarmente adatte ad un eventuale propulsione nucleare; il grande sforzo economico necessario per la tecnologia nucleare viene giustificato maggiormente proprio per imbarcazioni con richieste energetiche alte. La scelta dunque viene effettuata considerando principalmente il fabbisogno energetico, dunque un analogo studio può essere fatto ad esempio su ULCC per le petroliere, su VLBC per le navi portarinfuse o su Mega-

cruise ship per le navi passeggeri; in particolare queste ultime, viste le loro enormi richieste di potenza, sarebbero particolarmente indicate all'applicazione.

Una volta scelta l'imbarcazione ed il reattore da installare, si vogliono comparare le due soluzioni ed evidenziarne punti di forza e di debolezza.

Le due casistiche proposte sono le seguenti:

1. 2 x KLT-40S
2. 1 x reattore KLT-40S + 1 x motore diesel

In ogni caso si sceglie di utilizzare la propulsione elettrica, per le motivazioni descritte nel capitolo precedente.

5.1.2 Dati energetici della nave

Per poter portare avanti uno studio accurato è necessario conoscere le richieste di potenza della nave prescelta, non solo in condizioni di design, ma anche e soprattutto in condizioni di off-design. Il normale funzionamento dell'imbarcazione è infatti caratterizzato da continue fluttuazioni di carico le quali determinano le condizioni di lavoro dell'impianto scelto. Per poter fare delle stime ragionevoli è necessario partire dai dati relativi alle curve di carico di navi portacontainer; è chiaro infatti che oltre ad un dimensionamento di massima del sistema, è di fondamentale importanza conoscere la percentuale di carico durante le varie fasi di funzionamento in un viaggio tipico dell'imbarcazione. Ogni nave, a seconda del tipo di viaggio che intraprende avrà delle curve di carico differenti. Una piccola nave portacontainer adibita a piccole rotte avrà sicuramente dei periodi di funzionamento in off-design più spinti rispetto a navi transoceaniche o comunque adibite a rotte lunghe e durature. Dal momento che, come detto, ogni imbarcazione avrà le sue peculiarità, in questa trattazione si prendono a riferimento i dati relativi alla curva di carico di una nave portacontainer che opera tra la Cina e le coste statunitensi [35]; tale scelta è coerente con il tipico utilizzo di una ULCV che opera su lunghe rotte. Tenendo conto che dalla fonte prescelta si prenderanno solo le percentuali di carico, che verranno poi proporzionate ai dati di potenza del caso studio in esame. Di seguito si riportano e commentano i dati del caso studio.

Dati design nave	
Potenza propulsiva – P_p	80 MW
Potenza ausiliari – P_{aux}	15.8 MW _e
Richiesta termica – Q_{dem}	6.01 MW _t

Tabella 5.1 – Richieste di potenza della nave

Le richieste di potenza della nave in condizioni di design sono volutamente in linea con quelle di grandi ULCV, le cui informazioni sono riportate nel capitolo precedente. La potenza degli ausiliari indicata nella fonte prescelta è di 7.3 MW_e; la richiesta degli ausiliari aumenta con la taglia dell'imbarcazione ma la dipendenza non è certamente lineare con il peso della nave (come invece accade per la potenza propulsiva). Ad ogni modo si sceglie di sovradimensionare leggermente la richiesta degli ausiliari per due ragioni: la prima è dovuta

alla grande stazza dell'imbarcazione e la seconda è data dalla presenza dei reattori nucleari che hanno maggiori necessità ausiliarie rispetto alla propulsione diesel. Per l'ottenimento della richiesta termica si sono utilizzati i seguenti dati:

p_b = pressione del vapore prodotto/spillato = 11 bar [35]

T_b = temperatura vapore spillato = 184 °C

h_v = entalpia specifica vapore prodotto/spillato = 2781 kJ/kg

\dot{m}_v = portata di vapore prodotto/spillato = 2.16 kg/s

La temperatura e l'entalpia del vapore sono calcolate rapidamente attraverso l'utilizzo di miniREFPROP, inserendo in input la pressione e il titolo del vapore pari a 1.

Per quanto riguarda la portata di vapore necessario, in prima approssimazione si considera proporzionale alla taglia dell'imbarcazione, quindi, partendo dai dati riportati in [35], si esegue una semplice proporzione per ottenere il dato sopra riportato; si ottiene infatti:

$$Richiesta\ termica = Q_{dem} = h_v \cdot m_v \cdot 10^{-3} = 6.01\ MWt$$

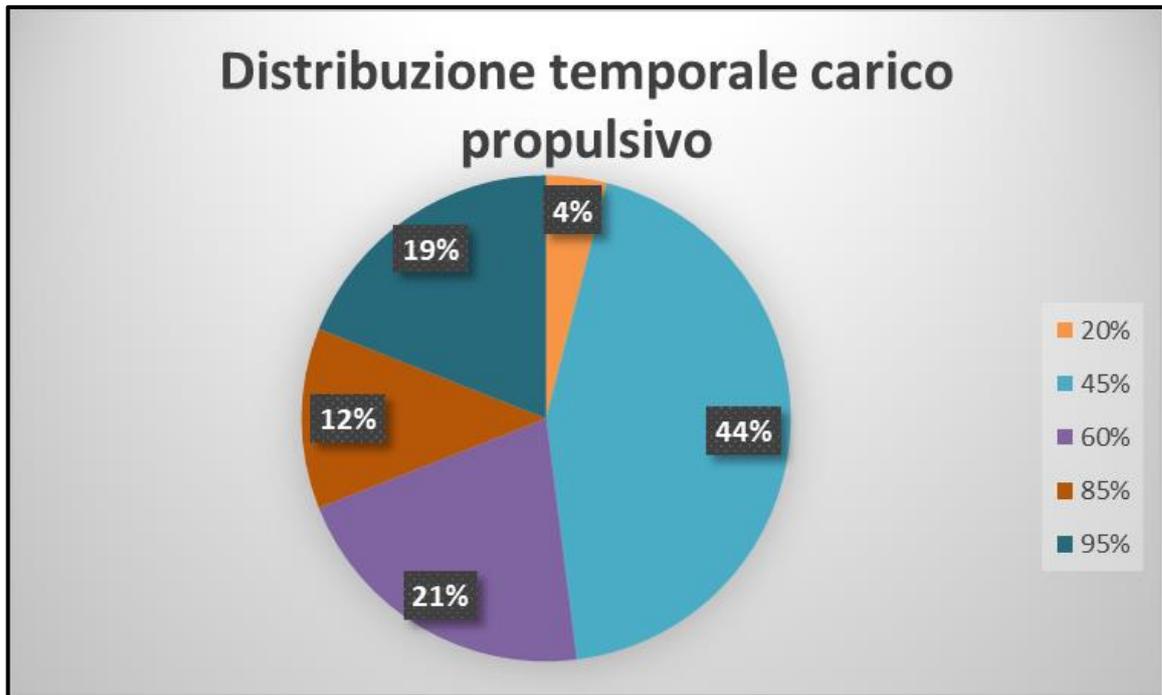


Figura 5.1 – Distribuzione temporale del carico propulsivo richiesto dalla nave

Percentuale di carico	Frazione di tempo	Carico propulsivo ¹¹	Carico ausiliari	Carico totale
%	%	MWe	MWe	MWe
20%	4	16.69	9.48	26.17
45%	44	37.56	11.46	49.01
60%	21	50.08	12.64	62.72
85%	12	70.94	14.615	85.56
95%	19	79.29	15.405	94.69

Tabella 5.2 – Potenze richieste dalla nave in diverse condizioni di carico

Il grafico rappresentato in Fig. 5.1 e la Tabella 5.2 consentono di apprezzare che per buona parte del suo funzionamento la nave ha una richiesta piuttosto ridotta rispetto alla potenza teoricamente disponibile. In particolare per circa la metà del tempo il carico propulsivo è inferiore alla metà del massimo erogabile. Solo per il 19% del tempo di funzionamento il sistema propulsivo lavora in condizioni di design nominale (o quasi). Questa prima considerazione induce a considerare con attenzione delle soluzioni che consentano al reattore di lavorare in condizioni di off-design poco spinte anche quando le percentuali di carico richieste siano basse.

In seguito si è voluto trovare una curva di carico che fosse correlata con la velocità del convoglio in mare; piccole variazioni di velocità del convoglio sono legate a grandi variazioni di potenza. La legge che viene utilizzata, viene ottenuta da uno studio che si occupa di selezionare i motori adatti per grandi navi portacontainer [36] è la seguente:

$$P = cost \cdot v^{\beta}$$

Considerando che sperimentalmente per grandi navi risulta $\beta \cong 3.4$ si ottengono i risultati riportati nelle seguente Tabella 5.3.

¹¹ Con carico propulsivo in questo caso si intende la potenza elettrica richiesta dal motore elettrico. In questo modo è possibile sommare il carico propulsivo con quello degli ausiliari per ottenere la richiesta elettrica totale del sistema

Velocità	Carico	Potenza propulsiva
[nodi]	[%]	[MWe]
11	0.07	5.84
12	0.11	9.18
13	0.13	10.85
14	0.16	13.35
15	0.21	17.53
16	0.26	21.70
17	0.32	26.71
18	0.38	31.71
19	0.46	38.39
20	0.54	45.07
21	0.63	52.58
22	0.73	60.92
23	0.87	72.61

Tabella 5.3 – Tabella Velocità-Potenza

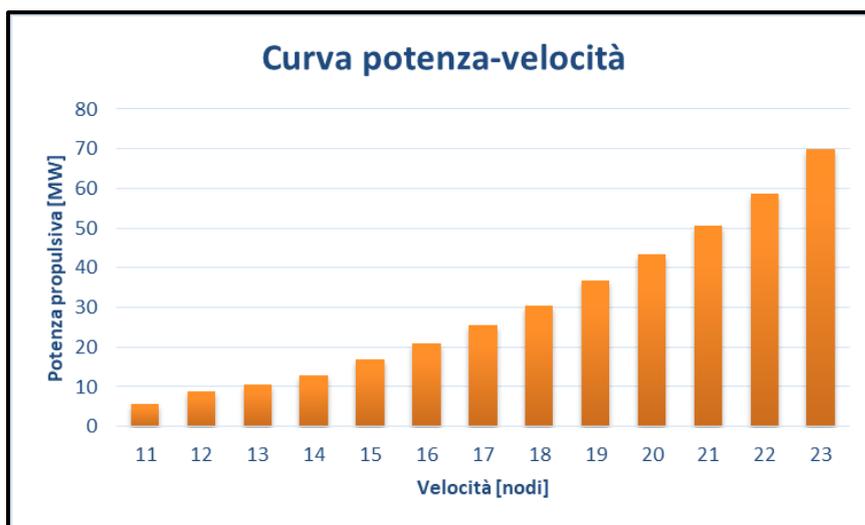


Figura 5.2 – Istogramma Velocità-Potenza

Anche il carico degli ausiliari subisce delle fluttuazioni durante il normale funzionamento, anche se meno intense rispetto alle fluttuazioni del carico propulsivo. Ma dal momento in cui si sta trattando la propulsione elettrica è possibile unire le curve di carico all'interno di un'unica curva in cui si considera il carico elettrico totale della nave.

Per poter procedere è necessario delineare al meglio il modello scelto e le ipotesi semplificative che si prendono in considerazione. Bisogna identificare i confini del sistema, i flussi di scambio energetico e le modalità con le quali questi scambi avvengono. Di seguito

viene riportato lo schema semplificato che consente di individuare i principali sistemi energetici del caso prescelto ed i relativi flussi.

5.2.3 Dati design del reattore

Il modello scelto per il reattore presenta i dati tecnici riportati in Tabella 5.4 [11].

Dati design reattore	
Potenza termica – P_t	150 MW _t
Potenza elettrica – P_e	52 MW _e
Rendimento – η_{reattore}	0.348
N° Generatori di vapore	4
Burnup medio	45.4 MWd/kg

Tabella 5.4 – Dati tecnici reattore

Si ribadisce il fatto che è possibile usufruire di una quota termica cogenerativa, la quale chiaramente ridurrà la potenza elettrica disponibile; se ne terrà opportunamente conto laddove venga utilizzata questa soluzione. Ulteriori caratteristiche del SMR prescelto non vengono riportate in quanto non strettamente necessarie all'obiettivo del capitolo.

5.2 Caso 1: doppio SMR

5.2.1 Funzionamento a pieno carico

In questo primo caso vengono utilizzati due SMR KLT-40S come fonte di potenza; il ciclo considerato prevederà un risurriscaldamento a pressione intermedia. Si sceglie questo tipo di soluzione per poter consentire un ottimale titolo di fine espansione, che in caso contrario risulterebbe eccessivamente sotto l'unità, determinando criticità per il funzionamento della turbina di bassa pressione.

L'accoppiamento dei due reattori al sistema propulsivo avviene tramite l'utilizzo di due turbine a vapore e due rispettivi generatori; tale soluzione consente di avere maggior ridondanza di funzionamento, molto importante nel contesto di propulsione navale. Non viene indagato l'utilizzo di un eventuale surriscaldatore a gas, anche se come detto nel capitolo precedente potrebbe apportare dei benefici in termini di inseguimento del carico.

La Figura 5.3 riporta i principali dati di output energetico del ciclo a vapore disponibili a partire dalle caratteristiche del reattore. Conoscendo l'output elettrico disponibile e la potenza termica disponibile si è voluto risalire ad una particolare configurazione del funzionamento del ciclo Rankine. I punti del ciclo ottenuti devono avere il principale scopo di illustrare le condizioni di funzionamento nominale possibili nella propulsione navale.

Si tenga conto che l'output elettrico disponibile non sarà quello di design del reattore (52 MW_e) bensì sarà ridotto per via dello spillamento di vapore cogenerativo. Per ottenere il reale lavoro utile di turbina si utilizza la seguente Tabella 5.5 [37].

Il coefficiente β permette di valutare, sulla base della pressione di spillamento e della taglia della turbina, la perdita di lavoro utile in turbina. Nel caso in esame, avendo considerato una turbina da 52 MW_e con un rendimento isentropico $\eta_{ie} = 0.87$ e una pressione di spillamento di 11 bar si ottiene $\beta = 0.227$. Dunque la potenza persa in turbina risulta essere:

$$P_{persa} = \beta \cdot Q_{dem} = 0.227 \cdot 6.01 = 1.363 \text{ MWe}$$

Taglia turbina	2-5 MWe	5-10 MWe	10-25 MWe	25-50 MWe	> 50 MWe
Rendimento isentropico (tipico)	65%	70%	75%	80%	84%
Pressione estrazione (bar a)	β	β	β	β	β
21,7	0,200	0,213	0,227	0,244	0,256
14,8	0,185	0,200	0,213	0,227	0,238
11,4	0,175	0,189	0,204	0,217	0,227
7,9	0,164	0,175	0,189	0,200	0,213
3,8	0,139	0,149	0,159	0,169	0,179
2,4	0,123	0,133	0,143	0,152	0,159

Tabella 5.5 – Tabella dei coefficienti di perdita di lavoro dovuto a spillamento di vapore

In condizioni di design dunque la potenza elettrica disponibile sarà:

$$P_e = P_{max} - P_{persa} = 50.637 \text{ MWe}$$

Di seguito si riportano i principali calcoli eseguiti relativi al ciclo a vapore in condizioni di design:

$$P_{termica} = 150 \text{ MWt}$$

$$T_{inGV} = \text{temperatura entrata generatori di vapore} = 316 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{fw} = \text{temperatura acqua di alimento} = 110 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P_{vs} = \text{pressione lato secondario} = 38 \text{ bar}$$

$$P_i = \text{pressione intermedia risurriscaldamento} = 8 \text{ bar}$$

$$T_v = \text{temperatura vapore prodotto} = 295 \text{ }^\circ\text{C}$$

I seguenti dati conducono al ciclo a vapore riportato in Tabella 5.6 e Figura 5.3 (gli stati termodinamici e il relativo diagramma T-S si sono ottenuti tramite il software miniREFPROP [38]).

	Temperatura	Pressione	Entalpia	Entropia	Stato/Titolo
	T [°C]	p [bar]	h [KJ/kg]	s [kJ/kg*K]	-/x
1	110,00	38	464,08	1,4158	sottoraffreddato
3	247,33	38	1072,80	2,7691	0
4	247,33	38	2801,70	6,0908	1
5	295,00	38	2954,60	6,3725	surriscaldato
5'	170,41	8	2640,10	6,3725	0,94
5s	170,41	8	2681	6,4648	0,96
6	295,00	8	3046,30	7,216	surriscaldato
6'	36,00	0,059479	2221,30	7,216	0,86
6s	36,00	0,059479	2328,55	7,5628	0,9

Tabella 5.6 – Stati termodinamici del ciclo in condizioni di design

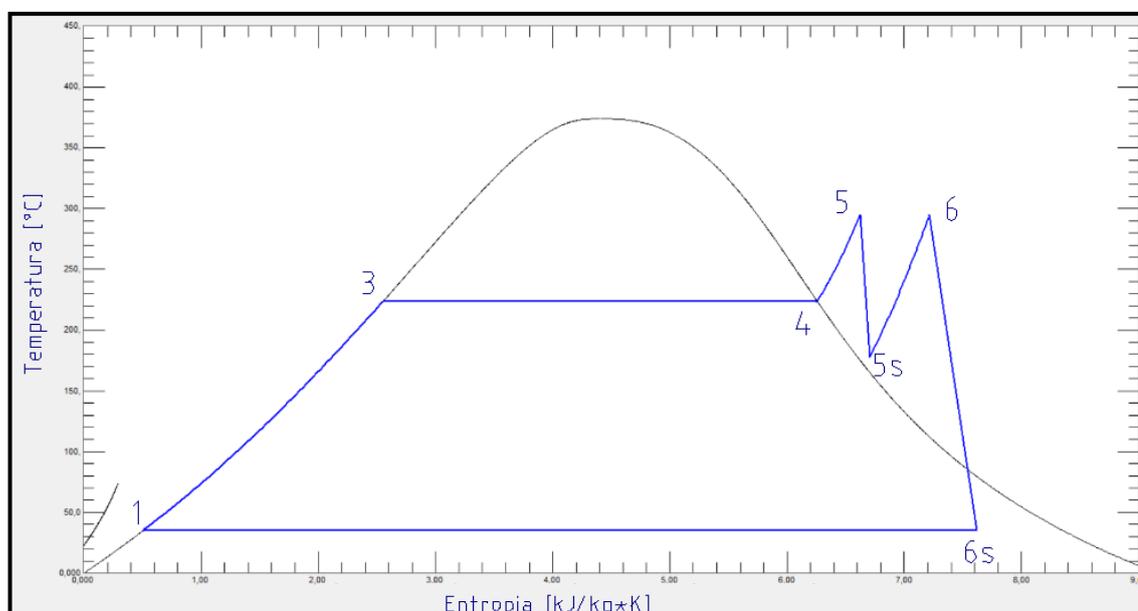


Figura 5.3 – Diagramma T-S del ciclo a vapore in condizioni di design

Nella Figura 5.3 non è riportata la compressione del liquido ad opera della pompa in quanto i punti 1, 2 e 2s sono quasi indistinguibili e trascurabili ai fini della trattazione; inoltre le trasformazioni di espansione 5-5s e 6-6s sono approssimate come delle rette.

Ipotizzando che:

$$\eta_{is} = \text{rendimento isentropico turbina} = 0.87$$

Il rendimento isentropico di turbina non viene preso da una fonte specifica, ma viene scelto in linea con l'attuale stato dell'arte delle turbine a vapore.

$$H = (h_5 - h_{2s}) + (h_6 - h_{5s}) = 2855.84 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \text{Calore apportato al ciclo}$$

$$\dot{m}_v = \frac{P_t}{H} \cdot 1000 = 52.52 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = \text{portata di vapore}$$

$$h_{5s} = h_5 - \eta_{is} \cdot (h_5 - h_{5'}) = 2788.73 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \text{entalpia fine prima espansione}$$

$$h_{6s} = h_6 - \eta_{is} \cdot (h_6 - h_{6'}) = 2339.36 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \text{entalpia fine seconda espansione}$$

$$L_u = (h_5 - h_{5s}) + (h_6 - h_{6s}) = 991.37 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \text{lavoro utile}$$

$$P_{\text{utile}} = L_u \cdot \dot{m}_v = 52.203 \text{ MW} = \text{potenza utile da ciclo Rankine}$$

$$\eta_{\text{rankine}} = \frac{L_u}{H} = 0.348$$

Il rendimento ottenuto è già comprensivo del lavoro perso per via dello spillamento di vapore (valutato per mezzo del coefficiente β da Tabella 5.5). È importante notare che difficilmente si potrà aspirare a rendimenti molto più elevati con gli SMR pressurizzati per via del limite imposto dalla temperatura massima del reattore, che nel caso in esame è intorno ai 315 °C; ciò comporta un limite massimo del vapore prodotto a 295 °C e quindi una limitazione al rendimento del ciclo Rankine.

A questo punto è necessario considerare la catena di rendimenti che riducono la potenza disponibile. La seguente Tabella 5.7 riporta i rendimenti dei componenti dell'impianto, a partire dal generatore elettrico fino al motore elettrico. I rendimenti considerati rappresentano lo stato dell'arte raggiungibile ad oggi dai dispositivi. Si considera come valore ultimo la potenza elettrica erogata al motore elettrico.

Componente	Rendimento
Generatore	$\eta_{\text{gen}} = 0.97$
Trasformatore	$\eta_t = 0.99$
Convertitore di frequenza	$\eta_{\text{fc}} = 0.99$
Motore elettrico	$\eta_m = 0.96$

Tabella 5.7 – Rendimenti a valle della turbina a vapore

La seguente Figura 5.4 rappresenta uno schema semplificato dell'impianto, che consente di visualizzare i flussi energetici del sistema; la potenza elettrica disponibile allo switchboard viene suddivisa in due parti. Una parte alimenterà gli ausiliari mentre l'altra alimenterà i motori elettrici. Tenendo in considerazione entrambe le linee d'asse ed i rendimenti dei dispositivi incontrati si perviene ai risultati sotto riportati; si tenga conto che quando ci si riferisce alla potenza propulsiva si intende la potenza all'albero motore.

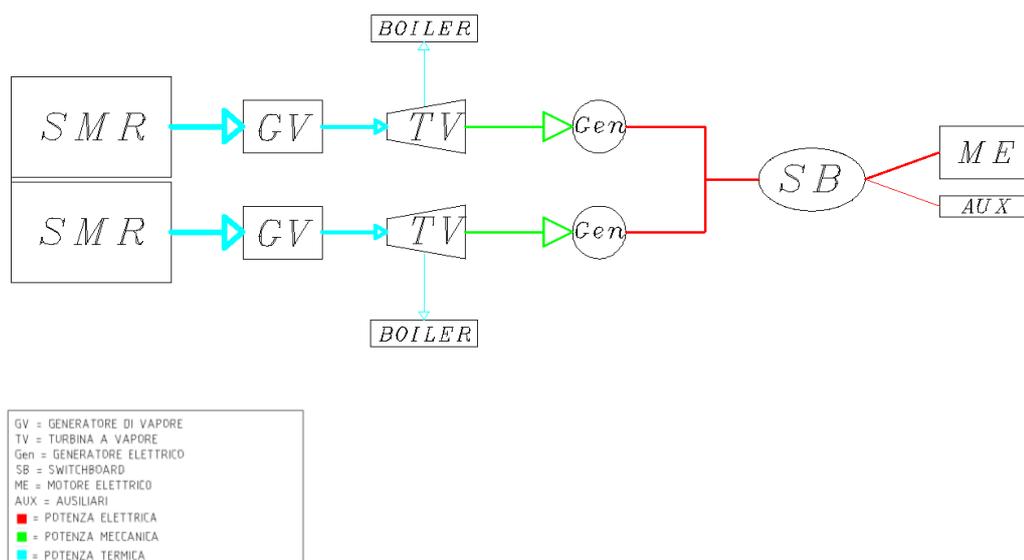


Figura 5.4 – Layout impianto propulsivo caso 1

$$P_e = P_u \cdot \eta_g = 50.636 \text{ MWe} = \text{potenza elettrica erogata da un SMR}$$

$$P_{\text{switchboard}} = 2 \cdot P_u \cdot \eta_{\text{gen}} \cdot \eta_t \cdot \eta_{fc} = 99.26 \text{ MWe}$$

$$P_m = P_{\text{switchboard}} - P_{\text{aux}} = 83.46 \text{ MWe} = \text{potenza ai motori elettrici}$$

$$P_p = P_m \cdot \eta_m = 80.1 \text{ MW}$$

La potenza propulsiva erogabile dal sistema composto dai due SMRs è dunque di 80.1 MW, parallelamente ad una potenza elettrica richiesta dagli ausiliari di 15.8 MWe. Ancora una volta si ribadisce che la potenza degli ausiliari sarà piuttosto elevata per via della presenza dei reattori ma meno fluttuante rispetto alle richieste propulsive.

5.2.2 Funzionamento a carico parziale

A questo punto si vuole descrivere il comportamento del sistema energetico composto dai due reattori più l'apparato propulsivo in condizioni di off-design. Per fare ciò si utilizza il grafico a torta di Figura 5.1, in cui si evidenziano cinque differenti condizioni di carico propulsivo. I cinque punti di funzionamento vengono analizzati al fine di fare una comparazione tra essi, oltre che con il funzionamento in condizioni di design. Per quanto riguarda il carico degli ausiliari si considera che solo in parte siano legati al carico propulsivo. Per semplicità si assume che la metà della potenza degli ausiliari sia direttamente legata a quella propulsiva, mentre l'altra metà sia costante.

Il livello di arricchimento del combustibile nucleare ha una funzione importante nel decretare la capacità di scendere sotto certe soglie di carico parziale. Combustibile con elevato arricchimento (come è il KLT-40S) consentirebbe di fatto di far funzionare il reattore a delle percentuali di carico particolarmente ridotte rispetto ai classici reattori con arricchimenti del 3-5%. Ad ogni modo l'obiettivo della trattazione non è quello di cimentarsi in calcoli neutronici o considerazioni sul core, bensì quello di comprendere le dinamiche di funzionamento che si possono instaurare focalizzandosi sulla comparazione con il secondo caso studio. Per tale motivo non si tiene conto di questo fattore all'interno della trattazione. Fatte queste assunzioni si analizzano le cinque situazioni di off-design e si commentano in maniera del tutto qualitativa le possibili conseguenze. La Tabella. 5.8 riassume i risultati ottenuti.

	95%	85%	60%	45%	20%
P_m	79.29	70.94	50.08	37.56	16.69
P_p	76.11	68.10	48.07	36.05	16.02
P_{switchboard}	94.69	85.55	62.72	49.01	26.17
P_{aux}	15.41	14.62	12.64	11.46	9.48
P_{utile}	49.80	45.00	32.98	25.78	13.76

Tabella 5.8 Valori di potenza a diversi carichi

La Tabella 5.8, illustrando i dati di potenza in condizioni di carico parziale, mette in luce che vi sono punti di funzionamento in cui l'SMR non è ottimizzato. Le soluzioni adottabili sono due:

1. Si può continuare ad erogare un output pari a quello di design (150 MW_t) con una penalizzazione in termini di rendimento di ciclo termodinamico. In questo caso il reattore non incontrerà problematiche legate ad accumulo di Xe¹³⁵ ma tutto il calore in eccesso che viene prodotto deve necessariamente essere smaltito. È richiesto in questo caso un sistema che consenta di cedere al mare tutto il calore in eccesso. Questo sistema si può adottare ma solo fino a certe percentuali di carico onde evitare rendimenti troppo bassi, nonché un eccessivo riversamento di energia termica nei mari
2. Si possono utilizzare i sistemi di regolazione del reattore che consentono di controllare la reattività all'interno del core. Questa soluzione è sicuramente più sostenibile, anche se tecnologicamente più complessa e costosa. Per evitare di incorrere a problematiche legato ad avvelenamento neutronico è possibile aumentare l'arricchimento del combustibile come effettivamente accade nel caso del KLT-40S

La presente tesi non si propone di fare dei calcoli neutronici che consentano di valutare la reattività del core e di calcolare fino a quale livello di off-design ci si possa spingere; quello che si vuole però cercare di fare è proporre una soluzione alla problematica.

Visti i limiti di entrambe le soluzioni è opportuno utilizzare entrambe le soluzioni in modo da ottenere una condizione di ottimo. Si ipotizzi ad esempio che non si voglia far lavorare l'SMR al di sotto del 60% della potenza massima erogabile, allora si potrà utilizzare il secondo approccio (reattore che regola la potenza in base al carico richiesto) fino a tale livello di potenza termica, per poi utilizzare il primo approccio (scarico del calore in eccesso). Avendo ipotizzato questo tipo di soluzione si riportano in Tabella 5.9 ed in Figura 5.5 i risultati che si otterrebbero.

	95%	85%	60%	45%	20%
P_{utile} [MW]	49.80	45.00	32.98	25.78	13.76
P_{termica} [MW_t]	143.11	129.30	94.78	90	90
% Carico reattore	0.954	0.862	0.632	0.6	0.6
η_{rankine}	0.348	0.348	0.348	0.286	0.153
Calore extra scaricato [MW_t]	0	0	0	~16	~50
η_{rankine}'	0.332	0.300	0.220	0.171	0.092
Calore extra scaricato [MW_t]	~7	~21	~55	~76	~110

Tabella 5.9 – Riepilogo risultati ottenuti alle varie condizioni di carico

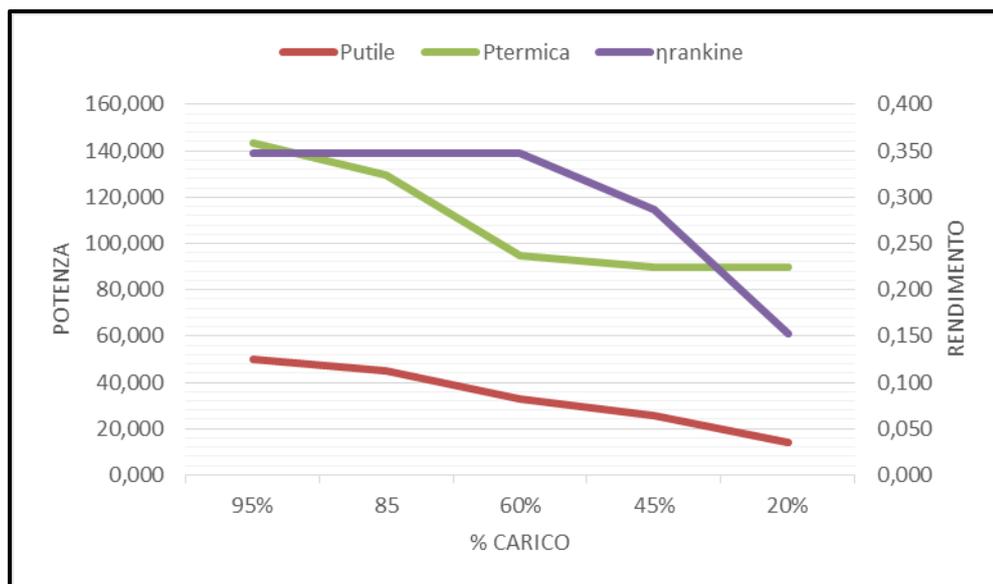


Figura 5.5 – Andamento di potenza utile, potenza termica e rendimento del ciclo Rankine nelle diverse condizioni di carico

Si è posto come ipotesi semplificativa che il rendimento del ciclo Rankine rimanga uguale a quello nominale ($\eta_{\text{rankine}} = 0,348$) anche in condizioni di carico parziale, almeno fino a quando non venga scaricato calore extra.

Appena il reattore raggiunge il limite minimo del 60% di output termico rispetto al massimo erogabile, si mantiene costante la potenza termica, che è pari a 90 MWt. In questo modo si accettano una diminuzione del rendimento del ciclo e un aumento di calore scaricato in mare, a favore di una più semplice gestione dell'accumulo di Xenon. Le ultime due righe indicano i rendimenti di ciclo (η_{rankine}) ed i valori di calore aggiuntivo scaricato in mare nel caso in cui si fosse mantenuto l'output termico di design del reattore. Risulta evidente come con la soluzione adottata si garantiscono rendimenti accettabili per buona parte del funzionamento, nonché ridotte quantità di calore aggiuntivo ceduto in ambiente.

Per poter comprendere al meglio il beneficio di avere un reattore che riesca a funzionare a carico parziale in modo ottimale si confronta il caso in cui il reattore scarica tutto il calore in mare (funzionamento continuo a pieno carico) con il caso invece analizzato nella Tabella 5.9. Di seguito i risultati ottenuti:

1. Reattore con funzionamento continuo a pieno carico:

$$E_t = \frac{8760}{1000} \cdot (7 \cdot 0,19 + 21 \cdot 0,12 + 55 \cdot 0,21 + 76 \cdot 0,44 + 110 \cdot 0,04) = 466 \frac{GWh}{\text{anno}}$$

2. Reattore con funzionamento a carico parziale fino al 60%:

$$E_t = \frac{8760}{1000} \cdot (16 \cdot 0,44 + 50 \cdot 0,04) = 79 \frac{GWh}{\text{anno}}$$

Dai risultati ottenuti è evidente il beneficio di utilizzare un SMR che abbia la capacità di lavorare a bassi carichi senza rischio di accumulo eccessivo di Xe^{135} .

5.3 Caso 2: SMR + motore diesel

In questo secondo caso studio si sceglie di affiancare un classico motore diesel al reattore compatto. La configurazione impiantistica non subisce modifiche a valle del generatore elettrico. La grande differenza alla quale si assisterà sarà principalmente dovuta alle emissioni di CO_2 .

I motivi che spingono ad adottare questo tipo di soluzione sono principalmente dovuti ad una maggiore flessibilità del sistema e ad una più efficiente gestione delle condizioni a carico parziale. L'idea sarà infatti quella di mantenere il più possibile il reattore in condizioni di design e utilizzare il motore diesel per la gestione dei carichi grazie alla sua ben nota capacità di inseguire il carico in maniera rapida ed efficiente. La Figura 5.6 mostra il layout semplificato d'impianto.

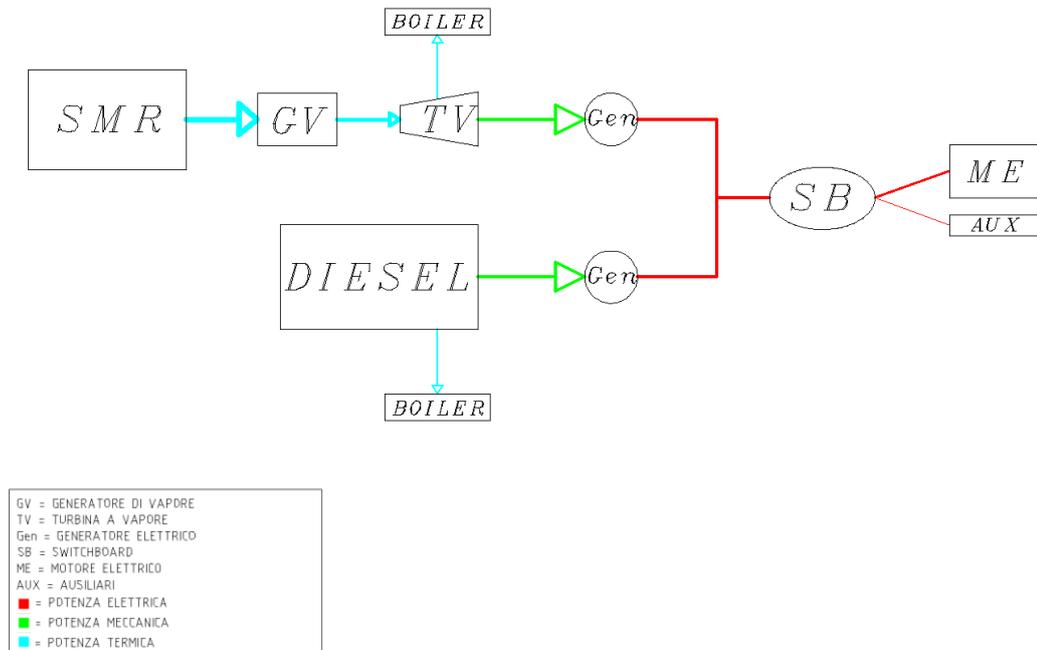


Figura 5.6 – Layout impianto propulsivo caso 2

5.3.1 Funzionamento a pieno carico

Il funzionamento del reattore a pieno carico è stato descritto nel paragrafo 5.2.1 dunque non verranno ripetuti tutti i calcoli termodinamici già riportati. La differenza rispetto al caso precedente è che non verranno raddoppiati i dati ottenuti. Per poter rimpiazzare l'SMR mancante è necessario un generatore diesel in grado di erogare la stessa potenza. Per essere precisi in questo secondo caso la potenza totale richiesta è inferiore, per due motivazioni:

1. Il funzionamento di un reattore nucleare richiede maggior potenza degli ausiliari per poter funzionare e in questo caso si ha un reattore anziché due
2. Parte del calore richiesto dai boilers è adesso fornito dai sistemi di recupero termico del motore diesel (waste heat recovery), anziché totalmente spillato dalla turbina a vapore

In seguito a queste due considerazioni si può, per semplificare la trattazione, trascurare lo spillamento di vapore e supporre che tutto il calore necessario alla nave provenga dagli scambiatori di recupero termico.

Le potenza elettrica erogata dal reattore in questo secondo caso sarà dunque:

$$P_e = 52 \text{ MWe} = \text{potenza elettrica SMR}$$

Dai dati ottenuti precedentemente si ottiene così la taglia del motore diesel necessario al caso in esame:

$$P_{diesel} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{switchboard}}{\eta_t \cdot \eta_{fc}} = 50.64 \text{ MWe} = \text{potenza elettrica diesel}$$

5.3.2 Funzionamento a carico parziale

Questo paragrafo è importante per poter operare un confronto con la soluzione a due reattori. Innanzitutto è necessario descrivere come funziona il motore diesel nelle cinque condizioni di carico che sono già state prese in considerazione nel caso studio.

Si presenta qui di seguito una breve spiegazione relativa alle varie condizioni di carico:

- **95%** - il reattore funziona a pieno carico erogando 49.63 MW_e al motore elettrico. Il motore diesel soddisfa la restante parte del fabbisogno generando 45.06 MW_e, ossia l'89 % della sua potenza massima
- **85%** - il reattore funziona a pieno carico. Il motore diesel genera 35.93 MW_e, ossia il 71 % della sua potenza massima
- **60%** - il reattore funziona a pieno carico. Il motore diesel genera 13.09 MW_e, ossia il 26 % della sua potenza massima

- **45%** - le richieste della nave sono inferiori alla capacità del reattore. Il motore diesel non eroga potenza. L'SMR genera 49.01 MW_e, ossia il 99 % delle condizioni di design
- **20%** - il motore diesel non eroga potenza. Il reattore deve erogare 26.17 MW_e, ossia il 52 % delle condizioni di design. Per evitare le problematiche esposte nel capitolo precedente si mantiene l'output termico pari al 60% del totale, scaricando una piccola quota di calore in mare

Le Tabelle 5.10 e 5.11 riassumono il funzionamento del reattore e del motore diesel nelle cinque situazioni di carico.

SMR	95%	85%	60%	45%	20%
P_{utile} [MW]	52.20	52.20	52.20	51.55	27.53
P_{termica} [MW_t]	150	150	150	148.14	90
P_{el} [MW_e]	49.63	49.63	49.63	49.01	26.17
% Carico reattore	1	1	1	0.988	0.6
η_{rankine}	0.348	0.348	0.348	0.348	0.306
Calore extra scaricato [MW_t]	0	0	0	0	~11

Tabella 5.10 – Dati di potenza del reattore

Coerentemente al caso precedente si considera come limite minimo un output termico erogato dal reattore pari al 60% del livello di design, che corrisponde a 90 MW_t; tale limite viene raggiunto soltanto nell'ultimo punto di funzionamento dei cinque esposti (20 % del carico propulsivo). Il rendimento del ciclo Rankine in questo caso non è penalizzato così tanto come invece lo era nel caso precedente in quanto per l'SMR il lavoro utile non è così basso come invece lo era nel caso di due reattori. La capacità di far lavorare l'SMR in condizioni più vicine a quelle ottimali anche a bassi carichi è da attribuire alla presenza del motore diesel, al quale viene demandato quasi tutto l'onere dell'inseguimento del carico. Evidentemente risulta fondamentale poter valutare le prestazioni dell'unità diesel nei punti di funzionamento a carico parziale. Per poter valutare il consumo specifico di combustibile e quindi l'efficienza del motore nei vari punti di funzionamento si prendono come fonte i dati forniti da Wärtsila [39]; la casa costruttrice mette in evidenza il consumo di olio combustibile (SFOC – Specific Fuel Oil Consumption) al variare del carico del motore. Per rendere la stima il più veritiera possibile si prendono in considerazione i dati di un motore della serie Wärtsila 46, che rappresenta i motori di taglia più elevata proposti dall'azienda. Di seguito si rappresentano in Figura 5.7 i dati raccolti dalla fonte i quali vengono poi integrati con il presente caso studio per ottenere la Tabella 5.11. Per l'ottenimento dei risultati si ipotizza un classico motore che si serva di HFO, le cui caratteristiche sono state esposte nel primo capitolo.

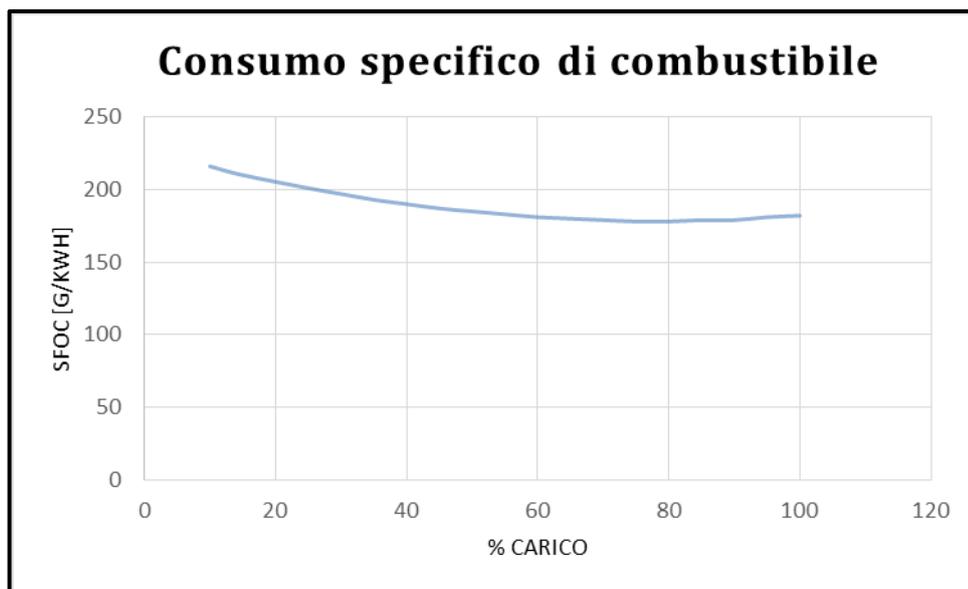


Figura 5.7 - Andamento del SFOC con il carico della nave

DIESEL	95%	85%	60%	45%	20%
PeI [MW_e]	45.06	35.93	13.09	0	0
% Carico motore	0.890	0.709	0.258	0	0
SFOC [g/kWh]	179	179	201	0	0

Tabella 5.11 – Dati di potenza motore diesel

Per concludere il paragrafo si vuole stimare l'emissione di CO_{2e} dovuta alla presenza del motore diesel, comparandolo con le emissioni di un equivalente sistema a propulsione tradizionale (solo diesel). Per farlo si rendono necessari i seguenti calcoli:

- C = massa di combustibile oraria consumata
- $f = 3,2 \frac{tCO_{2e}}{tHFO}$ = fattore di emissione CO_{2e} del HFO [40]
- $SFOC_n$ = consumo specifico di olio combustibile ai differenti carichi
- $H = 8760$ = ore dell'anno
- P_n = Output elettrici del motore diesel
- F_n = frazione di tempo rispetto al totale

- 95% del carico:

$$e_{95\%} = SFOC_{95\%} \cdot f = 179 \frac{gHFO}{kWh} \cdot 3.2 \frac{tCO_{2e}}{tHFO} \cdot \frac{1}{10^6} = 0.573 \frac{tCO_{2e}}{MWh}$$
- 85% del carico:

$$e_{85\%} = SFOC_{85\%} \cdot f = 179 \frac{gHFO}{kWh} \cdot 3.2 \frac{tCO_{2e}}{tHFO} \cdot \frac{1}{10^6} = 0.573 \frac{tCO_{2e}}{MWh}$$
- 60% del carico:

$$e_{60\%} = SFOC_{60\%} \cdot f = 201 \frac{gHFO}{kWh} \cdot 3.2 \frac{tCO_{2e}}{tHFO} \cdot \frac{1}{10^6} = 0.643 \frac{tCO_{2e}}{MWh}$$

Le emissioni nelle condizioni 45% e 20% del carico totale sono evidentemente nulle in quanto il motore diesel non eroga potenza.

Il calcolo sotto riportato invece è relativo alle emissioni su base temporale anziché su base energetica:

$$C = H \cdot (F_{95\%} \cdot SFOC_{95\%} \cdot P_{95\%} + F_{85\%} \cdot SFOC_{85\%} \cdot P_{85\%} + F_{60\%} \cdot SFOC_{60\%} \cdot P_{60\%}) = 2,857 \frac{tHFO}{h}$$

$$E = C \cdot f = 9.14 \frac{tCO_{2e}}{ora} = \text{emissioni orarie di } CO_{2e}$$

Ipotizzando che nell'arco di un anno la nave sia operativa per 260 giorni, allora risulta quanto segue:

$$F_d = \frac{260 \text{ gg}}{365 \text{ gg}} = 0.71 = \text{fattore di disponibilità}$$

$$E_{anno} = E \cdot F_d \cdot 8760 = 56847 \frac{tCO_{2e}}{anno}$$

A questo punto è utile un confronto con le emissioni di CO_{2e} del sistema ibrido rispetto ad un sistema tradizionale, mosso da un sistema diesel di pari potenza.

Si considera dunque un sistema propulsivo composto da due motori diesel con output elettrici analoghi ai due SMR del caso 1 ($P_e = 50,6 \text{ MW}_e$). Si illustrano in Tabella 5.12 i cinque punti di funzionamento al variare del carico, con conseguente calcolo del consumo specifico di combustibile; come ci si aspetta, in questo caso i due motori avranno funzionamento a carichi parziali meno spinti in quanto seguono le richieste della nave senza doversi fare carico dello SMR, questo si riflette in consumi specifici di combustibile inferiori rispetto al motore diesel del caso 2:

2 x DIESEL	95%	85%	60%	45%	20%
P_{el} [MW_e]	47.11	42.15	29.75	22.32	9.92
% Carico motore	0.95	0.85	0.6	0,45	0,2
SFOC [g/kWh]	181	179	181	187	205

Tabella 5.12 – Dati di potenza e SFOC per un sistema a propulsione diesel

I dati riportati in Tab. 5.12 sono rappresentativi di un solo motore diesel, che lavora in sinergia con il suo gemello di pari potenza. Come è possibile vedere dal grafico in Fig. 5.7 lo SFOC ha un andamento con punto di minimo intorno all'80% del carico, il che giustifica i dati riportati nelle tabelle 5.11 e 5.12; si noti che i valori degli SFOC in Tab. 5.12 sono diversi rispetto al caso SMR+Diesel (mediamente sono più bassi). Tale comportamento è giustificato dal fatto che il punto di funzionamento dei motori in questo caso va di pari passo con il carico della nave, mentre nel caso 2 l'off-design dell'unico motore era più spinto. Nonostante gli SFOC mediamente siano inferiori bisognerà raddoppiare i consumi e quindi le emissioni di CO_{2e} saranno decisamente più alte rispetto al caso 2. I calcoli seguenti si occupano di quantificare tali emissioni, che vengono poi riepilogati in Tab. 5.13.

- 95% del carico:

$$e_{95\%} = SFOC_{95\%} \cdot f = 2 \cdot 181 \frac{gHFO}{kWh} \cdot 3.2 \frac{tCO_{2e}}{tHFO} \cdot \frac{1}{10^6} = 1.158 \frac{tCO_{2e}}{MWh}$$

- 85% del carico:

$$e_{85\%} = SFOC_{85\%} \cdot f = 2 \cdot 179 \frac{gHFO}{kWh} \cdot 3.2 \frac{tCO_{2e}}{tHFO} \cdot \frac{1}{10^6} = 1.146 \frac{tCO_{2e}}{MWh}$$

- 60% del carico:

$$e_{60\%} = SFOC_{60\%} \cdot f = 2 \cdot 181 \frac{gHFO}{kWh} \cdot 3.2 \frac{tCO_{2e}}{tHFO} \cdot \frac{1}{10^6} = 1.158 \frac{tCO_{2e}}{MWh}$$

- 45% del carico:

$$e_{45\%} = SFOC_{45\%} \cdot f = 2 \cdot 187 \frac{gHFO}{kWh} \cdot 3.2 \frac{tCO_{2e}}{tHFO} \cdot \frac{1}{10^6} = 1.196 \frac{tCO_{2e}}{MWh}$$

- 20% del carico:

$$e_{20\%} = SFOC_{20\%} \cdot f = 2 \cdot 205 \frac{gHFO}{kWh} \cdot 3.2 \frac{tCO_{2e}}{tHFO} \cdot \frac{1}{10^6} = 1.312 \frac{tCO_{2e}}{MWh}$$

Ripetendo il calcolo precedente per ottenere le emissioni su base temporale (ma raddoppiando i valori per la presenza di due motori diesel) si ottiene:

$$C = 2 \cdot H \cdot (F_{95\%} \cdot SFOC_{95\%} \cdot P_{95\%} + F_{85\%} \cdot SFOC_{85\%} \cdot P_{85\%} + F_{60\%} \cdot SFOC_{60\%} \cdot P_{60\%} + F_{45\%} \cdot SFOC_{45\%} \cdot P_{45\%} + F_{20\%} \cdot SFOC_{20\%} \cdot P_{20\%}) = 11.148 \frac{tHFO}{h}$$

$$E = C \cdot f = 35.67 \frac{tCO_{2e}}{ora} = \text{emissioni orarie di } CO_{2e}$$

Assumendo lo stesso fattore di disponibilità del caso precedente si ottiene:

$$E_{anno} = E \cdot F_d \cdot 8760 = 222608 \frac{tCO_{2e}}{anno}$$

La Tab. 5.13 e la Fig. 5.8 Illustrano i risultati ottenuti per i due sistemi propulsivi a confronto tra loro:

	Emissioni CO _{2e}	95%	85%	60%	45%	20%	Media ponderata
Caso 2 (SMR+Diesel)	e [tCO _{2e} /MWh]	0.573	0.573	0.643	0	0	0.313
Diesel+Diesel	e [tCO _{2e} /MWh]	1.158	1.146	1.158	1.196	1.312	1.179

Tabella 5.13 – Confronto emissioni di CO_{2e} caso 2 e caso a propulsione tradizionale

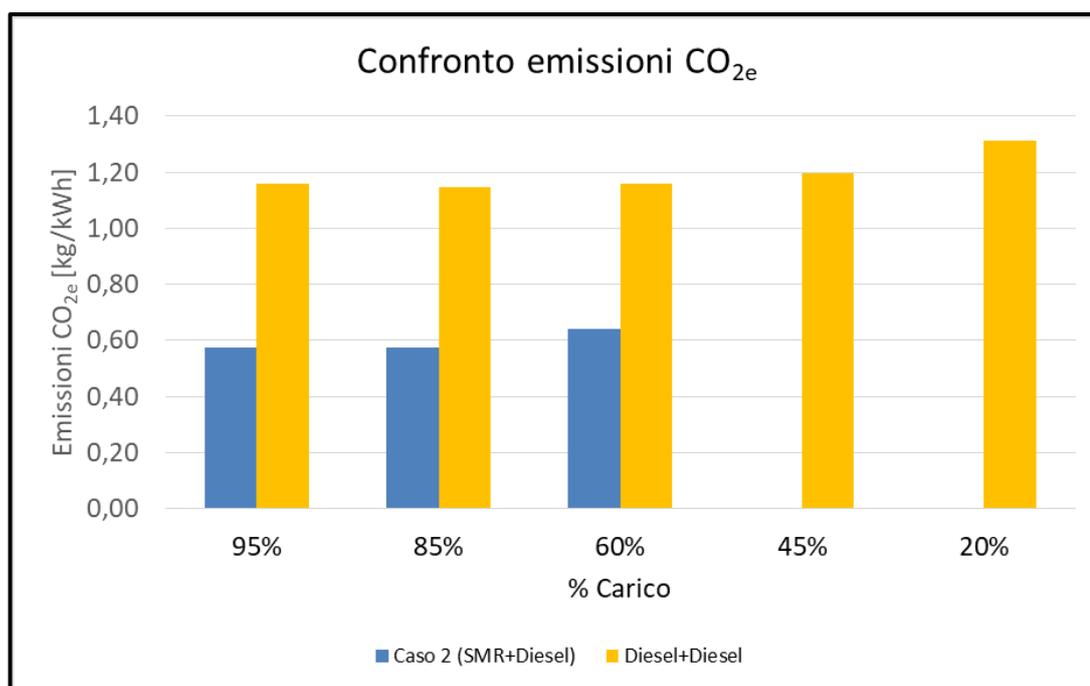


Figura 5.8 – Confronto emissioni di CO_{2e} caso 2 e caso a propulsione tradizionale

La media calcolata nell'ultima colonna della tabella viene ponderata sulle frazioni di tempo relative ad ogni condizione di carico; dal dato della media ponderata e dall'istogramma di Fig. 5.8 risulta evidente che nel caso studio 2 le emissioni di CO_{2e} siano di molto inferiori ad un sistema equivalente mosso da soli motori diesel. I risultati portano a stimare per il sistema ibrido una riduzione delle emissioni di quasi 4 volte rispetto ad un sistema convenzionale.

5.4 Confronto dei due casi e scenario delle emissioni

Dalle analisi effettuate si possono trarre alcune conclusioni che vengono elencate di seguito:

- Prendendo come riferimento a emissioni zero il caso 1 (si considera solo la fase operativa, senza considerare un LCA), è evidente che il caso 2 determini delle emissioni non trascurabili di CO_{2e}, seppur quantificabile in circa quattro volte in meno rispetto agli standard dei convogli navali di quella stazza
- Il caso 2 risulta favorevole per l'ottimizzazione del punto di funzionamento del SMR e della turbina a vapore. Ciò si riflette in una miglior gestione del combustibile nucleare e quindi meno frequenti operazioni di refueling. D'altro canto la presenza del motore diesel elimina il vantaggio dell'assenza di combustibile tradizionale, obbligando comunque a periodiche operazioni di rifornimento

- Il caso 2 ha una maggior capacità di risposta ai carichi grazie alla presenza del motore a combustione interna
- Il caso 2 può risultare meno competitivo a livello economico, in quanto all'elevato costo d'investimento del SMR si aggiunge il costo del combustibile tradizionale. Quando la filiera produttiva degli SMRs renderà questi reattori competitivi a livello economico, il caso 1 risulterà economicamente vantaggioso rispetto al caso 2 in quanto eliminerebbe del tutto il costo del combustibile tradizionale
- Non bisogna dimenticare le emissioni di inquinanti provenienti dal motore a combustione interna, in particolar modo degli SO_x, come spiegato nel primo capitolo. In questo senso, seppur nel caso 2 vi sia una netta riduzione, il caso 1 è la soluzione ottimale, in quanto ne determina un completo abbattimento

Di seguito si riportano due figure (Figura 5.9 e 5.10) che consentono di apprezzare a livello visivo la netta differenza in termini di carico erogato dal SMR nei due casi, evidenziando come nel caso 1 il funzionamento sia meno ottimizzato che nel caso 2.

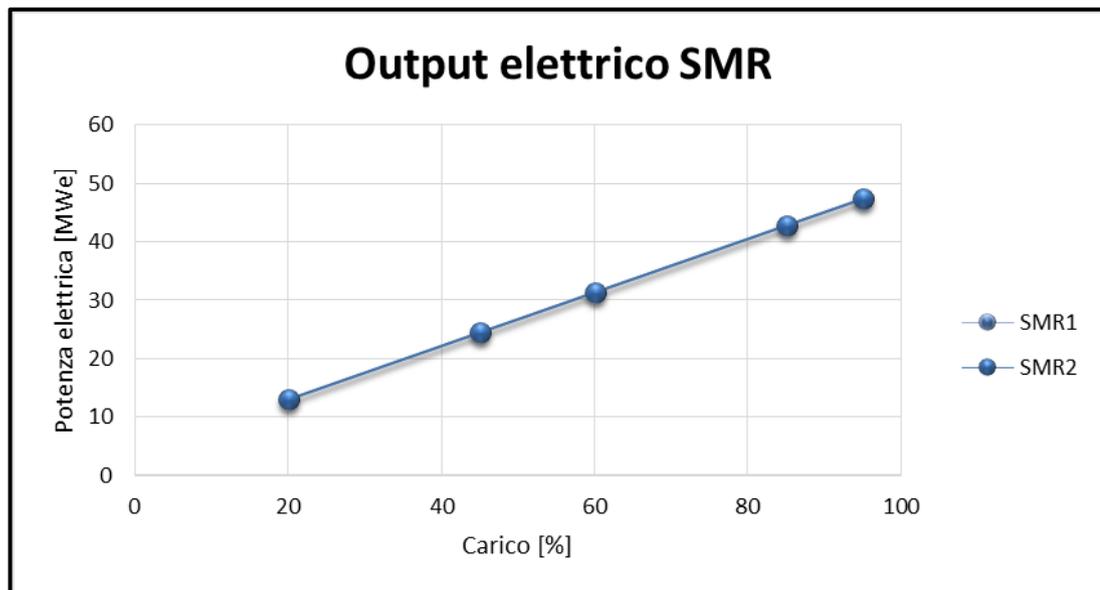


Figura 5.9 – Andamento potenza erogata dagli SMR nel caso 1

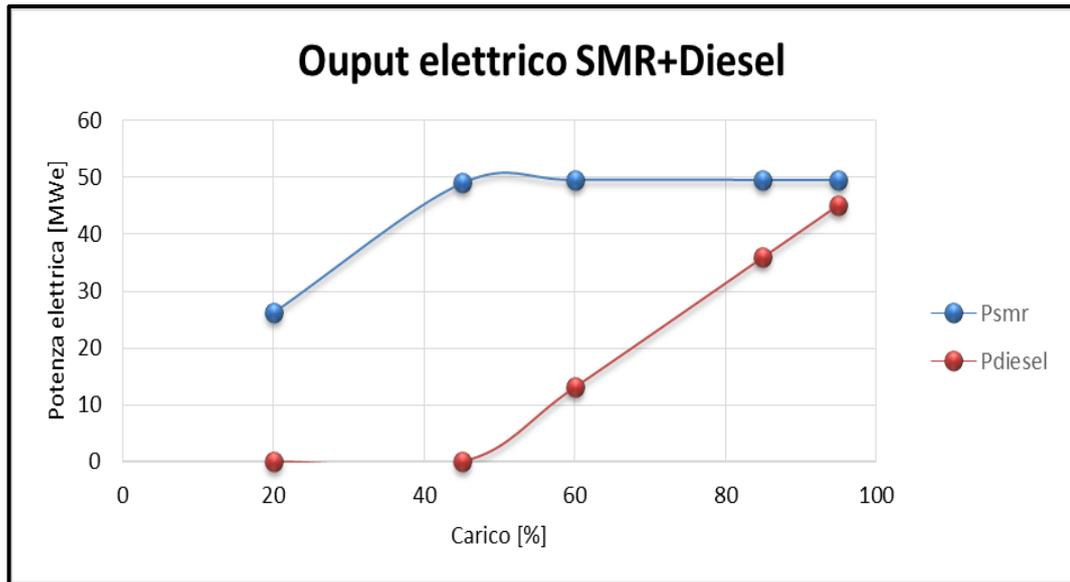


Figura 5.9 – Andamento potenza erogata da SMR e motore Diesel nel caso 2

APPENDICE

Propulsione Navale Ibrida Nucleare-Fotovoltaica

Quest'appendice ha lo scopo di affrontare in via preliminare una tematica che al giorno d'oggi ancora non ha riscontrato forte interesse a livello tecnologico, ossia la fattibilità della propulsione ibrida nucleare-fotovoltaica; ci si limiterà quindi ad alcune considerazioni di carattere generale riguardanti l'eventuale implementazione di un sistema fotovoltaico nel complesso propulsivo della nave. Le affermazioni riportate sono supportate da dei semplici calcoli di dimensionamento di massima; lo scopo dunque è porre le basi per una discussione su questo tipo di soluzione che possa in qualche modo costituire la base per futuri sviluppi più approfonditi. L'idea è quella di inserire un impianto fotovoltaico con dispositivo di stoccaggio elettrico, a supporto dello SMR. Questo sistema consentirebbe idealmente di far funzionare il reattore nell'intorno delle condizioni di design e di demandare all'impianto fotovoltaico il soddisfacimento delle fluttuazioni di carico. In particolare, quando le condizioni di carico sono basse lo SMR può lavorare a pieno carico, mentre la batteria alimentata dai moduli fotovoltaici si ricarica; quando invece le condizioni di carico sono più onerose la batteria cede energia elettrica al sistema propulsivo, supportando il reattore. Nel caso in cui sia necessario un immediato utilizzo di potenza elettrica allora non ci sarà stoccaggio in batteria bensì un flusso diretto ai motori elettrici.

Alcuni dei problemi pratici che bisogna affrontare e che rendono piuttosto complesso questo sistema sono i seguenti:

1. È necessaria un'adeguata superficie captante dei moduli affinché le richieste di potenza possano essere soddisfatte
2. È necessaria una taglia adeguata della batteria elettrica al fine di poter far fronte alle fluttuazioni di carico
3. C'è una diretta dipendenza dall'irradianza, che rappresenta la potenza solare disponibile

Queste tre problematiche vengono di seguito affrontate, considerandone le possibili soluzioni pratiche sinergiche.

A.1. Superficie captante dei moduli

Per rendere l'idea della complessità di questo punto si prenda a titolo d'esempio un impianto fotovoltaico con un rendimento medio del 20%¹².

Il rendimento del modulo è così definito:

¹² Il rendimento di un modulo fotovoltaico a silicio monocristallino viene definito sulle condizioni di riferimento (STC – Standard Test Conditions), ossia Irradianza = 1000 W/m², Air mass = 1.5, Temperatura di cella = 25 °C. Evidentemente l'irradianza di 1000 W/m² è una condizione che si verifica per poche ore durante l'anno.

$$\eta = \frac{P_d}{G_s \cdot A}$$

Dove:

- P_d = potenza disponibile [W]
- G_s = Irradianza di picco [W/m^2]
- A = superficie netta [m^2]

Ipotizzando di voler implementare un impianto fotovoltaico in grado di erogare 50 MW, in linea con le richieste del caso in esame nella trattazione, allora sarebbe richiesta una superficie totale di:

$$A = \frac{P_d}{G_s \cdot \eta} = \frac{50 \cdot 10^6}{1000 \cdot 0.2} = 250000 \text{ m}^2$$

Tale area equivale ad un quadrato con un lato di 500 m ed è quindi incompatibile con gli spazi a disposizione su una ULCV (le massime dimensioni ad oggi raggiungibili dalle ULCV sono 400 m di lunghezza e 61 m di larghezza).

Questo rapido calcolo si porta dietro una seconda complicazione; è piuttosto difficile ricavare una superficie utile per l'impianto fotovoltaico su una nave portacontainer in quanto in questo tipo di nave i contenitori vengono impilati sulla nave che funge da "piattaforma". Si richiederebbero dunque soluzioni innovative ad oggi solo in fase di studio preliminare. È il caso del concept design del NYK Super Eco-Ship [41] (rappresentata in Fig. A.1) il cui progetto presenta una copertura fotovoltaica nonché parte delle due facce laterali anch'esse ricoperte da moduli fotovoltaici. Tale prototipo monterebbe anche un sistema di vele regolabili che hanno il compito, sfruttando le correnti ventose, di efficientare il sistema di propulsione. In questo senso le soluzioni innovative che stanno prendendo campo nell'ambito delle attività di R&S sono svariate: ad esempio, le navi della NTS (Nuclear Transport Solutions)¹³ hanno iniziato una collaborazione preliminare con SGS (Smart Green Shipping) che prevede l'utilizzo di vele le quali, stando alle dichiarazioni, potrebbero portare ad una riduzione delle emissioni di GHG fino al 20% [42]. Un mix di queste alternative tecnologiche potrebbe in futuro dare un contributo importante alla propulsione nucleare ai fini della riduzione delle emissioni.

Tecnologie di questo tipo andrebbero a stravolgere anche la logistica dei container e tutti i dispositivi portuali per la movimentazione dei contenitori. Ad ogni modo facendo un rapido dimensionamento di massima non si supererebbero comunque i 40000 m^2 di superficie e quindi la potenza massima disponibile sarebbe 8 MWe.

Questo limite legato alla potenza massima dev'essere necessariamente risolto con l'introduzione di un motore diesel, seppur di taglia ridotta. Le navi con carico interno invece si adatterebbero meglio a questo tipo di applicazione, in quanto avrebbero tutta la superficie superiore disponibile per un impianto fotovoltaico.

¹³ La NTS è una compagnia specializzata nel trasporto via mare e su rotaie di materiali nucleari radioattivi, contribuendo ad una delle fasi fondamentali del decommissioning.



Figura A.1 – Render dell'innovativa nave portacontainer NYK Super Eco-Ship

A.2. Dispositivo di stoccaggio elettrico

La batteria elettrica ha il compito di immagazzinare energia nei momenti in cui vi siano condizioni di basso carico ed elevata produzione di energia. Una batteria di taglia elevata consentirebbe di sottodimensionare l'impianto fotovoltaico, in quanto per far fronte a situazioni di elevato carico si potrà sfruttare l'elevata capacità di stoccaggio della batteria, ricaricata durante periodi di sovrapproduzione. Ad oggi la più grande batteria marina esistente è installata sul traghetto a propulsione elettrica Stena Jutlandica [43] ed ha una capacità di 50 MWh. Ipotizzando di ricaricare questa batteria durante una delle situazioni a basso carico descritte nel Cap. 5 ed ipotizzando di avere una superficie fotovoltaica di 40000 m² si ottiene il seguente risultato:

$$C = \text{Capacità batteria} = 50 \text{ MWh}$$

$$P_f = A \cdot G_s \cdot \eta = 40000 \cdot 1000 \cdot 0.2 = 8 \text{ MWe} = \text{potenza fotovoltaica}$$

$$t = \frac{C \text{ MWh}}{P_f \text{ MW}} = 6 \text{ h } 15 \text{ min} = \text{tempo di ricarica}$$

Ciò significa che l'impianto fotovoltaico lavorando a piena potenza ricaricherebbe in poco più di 6 ore la batteria. Si ipotizzi ora di avere un carico totale del 95 %, senza disponibilità di sole e con la batteria carica al 100 %. Il sistema così descritto porta alla seguente situazione:

- Carico richiesto = 95 %
- $P_{\text{richiesta}} = 94.7 \text{ MWe}$
- $P_{\text{reattore}} = 50.4 \text{ MWe}$

$$P_{\text{batteria}} = P_{\text{richiesta}} - P_{\text{reattore}} = 44.3 \text{ MWe}$$

$$t = \frac{C}{P_{batteria}} = 1 \text{ h } 10 \text{ min} = \text{autonomia batteria a pieno carico}$$

Quindi nel caso estremo in cui non vi sia sole disponibile ed il carico richiesto sia pari al 95 % (~94 MW_e) il sistema avrebbe un'autonomia di appena un'ora. È possibile introdurre misure di risparmio energetico, in primo luogo la riduzione della velocità della nave, la quale consentirebbe di guadagnare tempo in vista di condizioni meteo più favorevoli; ma queste considerazioni di massima confermano comunque la necessità di un motore diesel di supporto, che intervenga in situazioni di necessità.

Altro discorso da non sottovalutare (che non verrà approfondito in questa sede) è legato all'impatto ambientale della batteria; è chiaro che quanto più elevata è la taglia della batteria, tanto maggiore sarà il beneficio per il sistema propulsivo, ma non si può prescindere da un LCA per la valutazione delle emissioni di CO_{2e} e per valutare l'impatto dello smaltimento.

A.3. Soleggiamento

Il soleggiamento gioca un ruolo fondamentale in relazione all'energia disponibile alle superfici fotovoltaiche. Il soleggiamento è definito come l'energia incidente per unità di area [Wh/m²]; può essere riferito a differenti superfici di differente inclinazione ed a diversi orizzonti temporali (soleggiamento orario, giornaliero, mensile, ...). Evidentemente il valore del soleggiamento sulla superficie terrestre sarà variabile in base alle coordinate geografiche (latitudine, longitudine) ed alle condizioni meteorologiche. A titolo puramente esemplificativo si riportano in Fig. A.2 le mappe di soleggiamento giornaliero globale sulla superficie orizzontale in Italia [44].

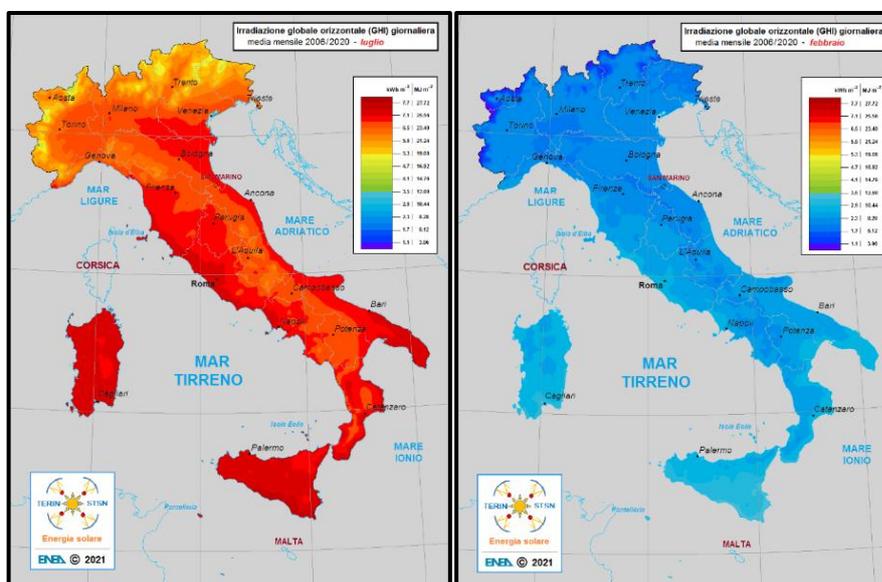


Figura A.2 – Carte della radiazione solare media mensile nei mesi di Luglio e Febbraio

Le mappe rappresentate indicano un'evidente differenza tra il mese di Febbraio ed il mese di Luglio, nonché differenze meno marcate al variare della latitudine. In particolare si

commentano i due valori estremi riscontrabili: 7.7 kWh/m²day e 1.1 kWh/m²day che rappresentano la media di luglio nel sud della Sicilia e la media di Gennaio in alcune zone del Nord Italia.

Si considera come in precedenza una superficie dei moduli di 40000 m² e si calcola qui di seguito l'energia incidente su una superficie orizzontale pari a quella ipotetica installata sulla nave. Nei due casi si ottiene:

$$E_{d1} = \frac{G_{d1} \cdot A}{1000} = 7.7 \cdot 40000 = 308000 \frac{MWh}{day}$$

$$E_{d2} = \frac{G_{d2} \cdot A}{1000} = 1.1 \cdot 40000 = 44000 \frac{MWh}{day}$$

Tali disponibilità energetiche teoriche devono essere opportunamente ridotte per effetto delle perdite dei moduli:

$$E_{f1} = E_{d1} \cdot 0.2 = 61600 \frac{MWh}{day}$$

$$E_{f2} = E_{d2} \cdot 0.2 = 8800 \frac{MWh}{day}$$

Considerando per semplicità le stesse percentuali di carico utilizzate nel Cap. 5, si perviene alla seguente richiesta energetica media giornaliera a carico dell'impianto fotovoltaico:

$$E_r = 24h \cdot (F_{95\%} \cdot P_{95\%} + F_{85\%} \cdot P_{85\%} + F_{60\%} \cdot P_{60\%}) \cong 375 \frac{MWh}{day}$$

Tale risultato conferma la necessità di introdurre, oltre ad una batteria, anche un motore diesel di supporto, in quanto in entrambi i casi non sarebbe possibile raggiungere la quota energetica giornaliera richiesta, non solo in termini di inseguimento del carico ma anche in termini assoluti. Evidentemente questi dati, riportati a titolo d'esempio, sono validi solo per un contesto geografico di navigazione. Tali considerazioni portano comunque ad ipotizzare che, anche in termini più generali, l'utilizzo dell'impianto fotovoltaico ha bisogno dell'affiancamento di un impianto propulsivo che possa coprire buona parte della potenza richiesta.

A.4 Conclusione

L'utilizzo di un impianto fotovoltaico affiancato ad uno SMR per propulsione navale può risultare vantaggioso a seconda dei contesti. Imbarcazioni con la copertura adeguata sono sicuramente avvantaggiate (ad esempio le navi portarinfuse per la loro struttura piana

risultano particolarmente adatte); sono ovviamente da considerarsi più adatte le navi che operano su rotte nei pressi dell'equatore o comunque a basse latitudini nord e sud; l'utilizzo di batterie di grande taglia permetterebbe di sfruttare al meglio questo tipo di tecnologia ma è necessario verificarne gli effettivi benefici in termini di sostenibilità tramite un LCA. È possibile affermare che il principale scopo di un impianto fotovoltaico sulla nave sarà quello di supportare l'impianto principale, ma che difficilmente potrà soddisfare grandi percentuali del fabbisogno energetico.

CONCLUSIONI

Le tematiche ed i calcoli effettuati nella tesi proposta conducono ad una serie di conclusioni che vengono esposte di seguito.

La necessità di decarbonizzare il settore dei trasporti marittimi rende gli SMR un'ottima alternativa per il raggiungimento di tale obiettivo nel prossimo futuro. Gli SMR riscuotono grande interesse grazie alle innovative logiche in termini di sicurezza, flessibilità e competitività che possono renderli dei validi sostituti in numerosi campi tecnologici, tra cui quello della propulsione navale. Il target che maggiormente si adatta a tale tipologia di applicazione è quello di grandi navi mercantili, dotate di elevati fabbisogni di potenza e possibilmente che operino su grandi rotte, caratterizzate da maggiori periodi di funzionamento in condizioni nominali. I reattori modulari ad acqua pressurizzata sono al giorno d'oggi i primi candidati a tale scopo per via dell'enorme esperienza maturata.

In merito ai due casi studio proposti si può affermare quanto segue:

- L'utilizzo di un sistema propulsivo alimentato da due SMRs determina l'enorme vantaggio di emissioni quasi nulle anche se non ottimizzerebbe il funzionamento del reattore, soprattutto in condizioni spinte di carico parziale
- La scelta di una soluzione ibrida SMR + motore Diesel può risultare vantaggiosa in termini di inseguimento del carico e flessibilità; ciò consentirebbe di ottimizzare il funzionamento dello SMR e determinerebbe comunque una notevole riduzione di emissioni di GHG, oltre che di SO_x rispetto alle soluzioni tradizionali di pari potenza installata

Tra le soluzioni realizzabili in un futuro meno prossimo vi sono gli HTR, i LBFR ed i MSR; tali soluzioni permetterebbero di eliminare del tutto o almeno in parte alcune problematiche operative dei PWR (in primo luogo la bassa temperatura di erogazione del calore ed il maggior rischio di accumulo di Xe¹³⁵) e consentirebbero inoltre di utilizzare le turbine a gas, compatte e flessibili. In particolare il MSR può essere designato come la soluzione più innovativa anche se, probabilmente, con una potenziale implementazione commerciale più lontana nel tempo.

Anche l'affiancamento di un impianto fotovoltaico può supportare l'impianto nucleare durante fluttuazioni di carico anche se sono state messe in luce alcune criticità riguardo questo tipo di soluzioni in ambito marittimo.

L'utilizzo degli SMR può stravolgere il settore dei trasporti via mare dando una forte spinta nel processo di decarbonizzazione. Il ventaglio di soluzioni è ampio e frastagliato: questa possibilità, se sfruttata in maniera intelligente, rappresenterà una solida alternativa ai combustibili fossili per la propulsione navale negli anni a venire.

Bibliografia

- [1] IMO, “Fourth IMO GHG Study 2020 Full Report,” 2020.
- [2] L. T. J. M. V. M. M. K. E. F. Martin O.P. Ramacher, “The impact of ship emissions on air quality and human health in the Gothenburg area – Part II: Scenarios for 2040,” *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020.
- [3] E. T. Marina Zanne, “Air pollution from maritime transport - the problem of today, the challenge of tomorrow,” *ResearchGate*, 2011.
- [4] Ricerche industriali ed energetiche, “Opzioni e prospettive per il trasporto marittimo, aereo e stradale al 2030 e al 2050,” 2020.
- [5] H. Tu, “Options and evaluations on propulsion systems of LNG carriers,” *ResearchGate*, 2019.
- [6] International Atomic Energy Agency, “What are Small Modular Reactors,” 2021.
- [7] Clean Energy Ministerial , “Nuclear innovation: Clean energy future - Actions to enable flexible nuclear energy,” 2021.
- [8] NEA, “Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities,” 2021.
- [9] NEA, “The NEA Small Modular Reactor Dashboard,” 2023.
- [10] CorePower, “Core Power,” 2023. [Online]. Available: <https://corepower.energy/maritime-applications/electric-ships>.
- [11] IAEA, “KLT-40S Overview,” 2013.
- [12] The Lyncean Group of San Diego, “China's CGN ACPR50S Floating Nuclear Power Plant,” 2021.
- [13] Royal Academy of Engineering, “Future Ships Powering Options,” 2013.
- [14] M. O. T. H. T. Ishida, “ADVANCED MARINE REACTOR MRX AND ITS APPLICATION FOR ELECTRICITY AND HEAT CO-GENERATION,” 2000.
- [15] THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERING, “THE NEREUS INSTALLATION - THE NUCLEAR PART (HTR),” 1999.
- [16] International Atomic Energy Agency - IAEA, “Advances in Small Modular Reactor Technology Developments,” 2022.
- [17] K. Houtkoop, “Nuclear reactors for marine propulsion and power generation systems,” 2022.
- [18] J. Jacobs, “Nuclear Short Sea Shipping,” 2014.
- [19] P. T. A. Gad-Briggs, “Analyses of the Load Following Capabilities of Brayton Helium Gas Turbine Cycles for Generation IV Nuclear Power Plants,” 2017.
- [20] K. S. Akio Yamaji, “Shielding Design to Obtain Compact Marine Reactor,” *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1994.
- [21] M. R. Palmieri, “Neutron Shielding for Small Modular Reactors,” *Worcester Polytechnic Institute*, 2020.

- [22] IMO, “Code of Safety for Nuclear Merchant Ships - Resolution A.491(XII),” 1981.
- [23] D. A. H. S. R. T. Eleftherios Dedes, “Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping,” 2011.
- [24] J. C. Charles Forsberg, “A Nuclear-Fossil Combined-Cycle Power Plant for Base-Load and Peak Electricity,” 2007.
- [25] F. M. A. A. B. A. M.A.Darwish, “Combining the nuclear power plant steam cycle with gas turbines,” 2010.
- [26] E. S. Andhika Feri Wibisono, “Thermodynamic performance of PWR power conversion cycle combined with fossil-fuel superheater,” 2016.
- [27] Y. H. J. Byung Koo Kim, “HIGH COOLING WATER TEMPERATURE EFFECTS ON DESIGN AND OPERATIONAL SAFETY OF NPPS IN THE GULF REGION,” *Nuclear Engineering and Technology*, 2013.
- [28] J. G. L. B. P. Z. Marta Drosinska-Komor, “ON THE USE OF SELECTED 4TH GENERATION NUCLEAR REACTORS,” *Sciendo*, 2022.
- [29] LLOYD'S Register Group, Gen4Energy, Enterprises shipping and trading, “CONCEPT DESIGN FOR A SUEZMAX TANKER POWERED BY A 70MW SMALL MODULAR REACTOR,” 2014.
- [30] O. C. Z. T. Terry Price, “Xenon in molten salt reactors: The effects of solubility, circulating particulate, ionization, and the sensitivity of the circulating void fraction,” *Nuclear Engineering and Technology*.
- [31] S. J. Carlton, “The nuclear propulsion of merchant ships: Aspects of engineering, science and technology,” *Journal of Marine Engineering & Technology*, 2014.
- [32] I. E. German de Melo, “Resizing study of main and auxiliary engines of the container vessels and their contribution to the reduction of fuel consumption and GHG,” 2015 .
- [33] I. E. Germán de Melo, “RESIZING STUDY OF MAIN AND AUXILIARY ENGINES OF THE TANKER VESSELS AND THEIR CONTRIBUTION TO THE REDUCTION OF FUEL CONSUMPTION AND GHG,” *Maritime Environment and Electronics & Human Interface*.
- [34] A. E. S. S. K. Fatih Okumuş, “MODELLING SHIPS MAIN AND AUXILIARY ENGINE POWERS WITH REGRESSION-BASED MACHINE LEARNING ALGORITHMS,” *Sciendo*.
- [35] L. B. A. R. A Aijjou, “Analysis of container ship energy systems,” 2020.
- [36] Winterthur Gas & Diesel , “Engine selection for very large container vessels,” 2018.
- [37] M. Rivarolo, “La cogenerazione ad alto rendimento”.
- [38] “refpropop-mini.software.informer.com,” [Online]. Available: <https://refpropop-mini.software.informer.com/>.
- [39] J. K. B. Jalkanen, “Extension of an assessment model of ship traffic exhaust emissions for particulate matter and carbon monoxide,” *ResearchGate*, 2011.
- [40] “www.ssb.no,” [Online].

- [41] “www.change-climate.com,” [Online]. Available: http://www.change-climate.com/Transport_Land_Sea_Sustainable/ElizabethSwann/Cargo-Electric-Zero-Carbon-Climate-Changers-Ships-Sustainable-Container-Transport-Ocean.htm.
- [42] “World Nuclear News,” [Online]. Available: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Project-examines-retrofitting-sails-to-nuclear-tra>.
- [43] I. G. Macola, “www.ship-technology.com,” [Online]. Available: <https://www.ship-technology.com/features/electric-ships-the-world-top-five-projects-by-battery-capacity/>.
- [44] ENEA, “www.solaritaly.enea.it,” [Online]. Available: <http://www.solaritaly.enea.it/CalcComune/Calcola.php>.
- [45] M. Z. Hiroyasu Kifune, “Overview of electric ship propulsion and fuel consumption,” *ResearchGate*, 2019.
- [46] T. R. Riley Schnurr, “Marine Transportation and Energy Use,” *Science Direct*, 2019.
- [47] “www.world-nuclear-news.org,” [Online]. Available: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Korean-collaboration-to-research-marine-SMR>.
- [48] “www.TerraPower.com,” [Online]. Available: <https://www.terrapower.com/our-work/molten-chloride-fast-reactor-technology/>.
- [49] “Ulstein.com,” [Online]. Available: <https://ulstein.com/news/ulstein-thor-zero-emission-concept>.
- [50] Atomenergomash JSC Nuclear and Power Engineering, “SOLUTION FOR THE SHIPBUILDING INDUSTRY,” 2020.
- [51] Wikipedia, “Nuclear marine propulsion,” 2022.
- [52] “Marine nuclear propulsion”.
- [53] M. U. Figari, “Impianti navali - Impianti ausiliari,” 2020.
- [54] A. N. T. A. Baldi, “Energy and Exergy Analysis of a cruise ship,” *energies*, 2015.