

Sommario

L'impatto sull'ambiente legato al settore crocieristico è in continua ascesa negli ultimi anni, seguendo il trend dell'intero comparto. Navi sempre più grandi e simili a piccole città galleggianti operano ripetutamente in aree limitate, aumentando localmente le emissioni di inquinanti e la produzione dei rifiuti. L'attuale approccio di raccolta differenziata, incenerimento o scarico a mare dei rifiuti trattati non è sufficiente a garantire la sostenibilità richiesta ormai in ogni settore. Lo studio qui proposto espone un sistema integrato di gestione dell'intera filiera dei rifiuti, prevedendo in prima battuta la riduzione della produzione di quelli eliminabili per poi analizzare i possibili metodi di sfruttamento e recupero energetico per quelli restanti. Una volta verificata la fattibilità tecnica, i risultati ottenuti evidenziano i risparmi di combustibile conseguibili e la riduzione delle emissioni di CO_2 , oltre ad una prima stima dei costi di implementazione in grado di favorire le future scelte di investimento.

Abstract

The impact on the environment due to the cruise sector has been continuously increasing in recent years, following the trend of the entire sector. Increasingly large and small-town-like floating ships operate repeatedly in confined areas and locally increase pollutant emissions and waste generation. The current approach, which consists of separate collection and incineration or dumping at sea of treated waste is not sufficient to guarantee the sustainability required now in every sector. This study exposes an integrated management system of the entire waste chain: first of all, it provides the reduction of waste that can be avoided, like paper and glass, and then analyzes the possible methods of exploitation and energy recovery for the remaining ones. Once the technical feasibility has been verified, the results obtained highlight the achievable fuel savings and the reduction in emissions of CO_2 , as well as an initial estimate of the implementation costs in order to favor future investment choices.

Indice

1	Introduzione	8
1.1	Norme, regolamenti e linee guida	11
1.1.1	Annex V - Prevention of Pollution by Garbage from Ships	12
1.1.2	Annex VI - Prevention of Air Pollution from Ships . . .	14
1.1.3	Guide to ship sanitation	14
2	Analisi dello stato di fatto	16
2.1	Rifiuti prodotti	16
2.2	Impianto di incenerimento	17
2.3	Altri impianti termici a bordo	18
2.3.1	Impianti frigoriferi	21
3	Approccio proposto	23
3.1	Nuova gestione	23
3.2	Riduzione dei rifiuti prodotti	24
3.2.1	Vetro	24
3.2.2	Carta	25
3.3	Sfruttamento energetico dei rifiuti prodotti	26
3.3.1	Gassificazione	26
3.3.2	Sfruttamento dei fumi uscenti dall'inceneritore	28
4	Conclusione	39
	Appendices	42
A	Listati dei codici	43
A.1	Acqua-Ammoniaca.py	43
A.2	Acqua-Ammoniaca-H_liquid.py	46
A.3	Acqua-Ammoniaca-H_vapor.py	47
A.4	Acqua-Ammoniaca-II_STUDIO.py	49

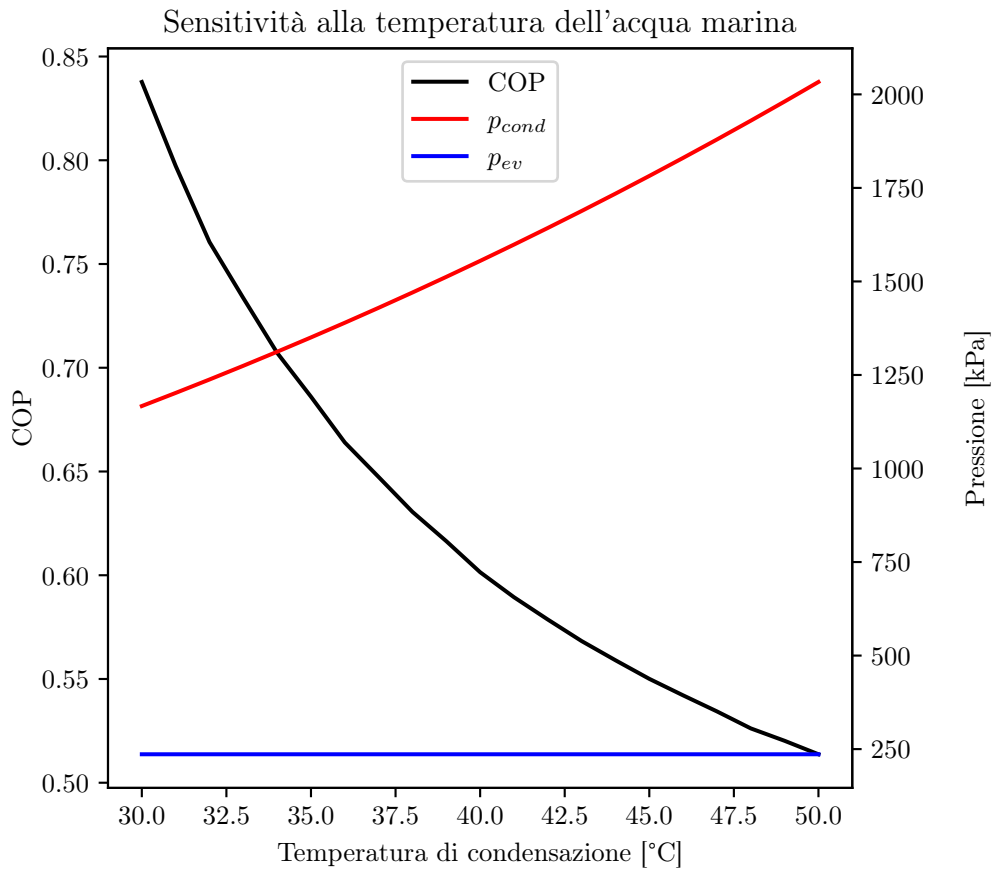
<i>INDICE</i>	4
A.5 Acqua-Ammoniacca-ricerca valori.py	52
A.6 Acqua-Ammoniacca-ricerca calori_FREEZE.py	59
A.7 Punto_7.py	66
B Description of the Absorption Refrigeration Cycle (ARC)	68
B.1 System structure	68
B.2 Assumptions and design parameters	70
B.3 Thermodynamic model	72
B.4 Design process, stage by stage	73
Bibliografia	79

Elenco delle figure

1.1	Passeggeri totali del settore crocieristico all'anno [1]	8
1.2	Articoli accademici indicizzati - stringa di ricerca="waste management", database=Scopus	10
1.3	Articoli accademici indicizzati - stringa di ricerca="waste management" AND ship, database=Scopus	11
2.1	Trattamento rifiuti	17
2.2	Potenza degli impianti di refrigerazione, incenerimento e climatizzazione di bordo	20
3.1	Schema della nuova gestione dei rifiuti [15]	24
3.2	Schema di un impianto ad assorbimento	29
3.3	Ciclo ad assorbimento	29
3.4	Potenza dell'inceneritore e degli impianti di refrigerazione in funzione della stazza.	30
3.5	Potenza dell'inceneritore e degli impianti di refrigerazione in funzione delle persone imbarcabili.	31
3.6	Schema dell'impianto di refrigerazione per il magazzino frigorifero	32
3.7	Diagramma (p,H) dell'ammoniaca [36]	34
3.8	Diagramma entalpia-concentrazione della soluzione acqua-ammoniaca	35
3.9	Valori di entalpia delle soluzioni nell'assorbitore	36
3.10	Valori di entalpia delle soluzioni nel generatore e nello scambiatore di recupero	37
4.1	Risparmio di carburante e riduzione delle emissioni di CO_2	40
4.2	Risparmio economico derivante dalle soluzioni proposte	41
B.1	Schematic representation of the ARC system.	69

Elenco delle tabelle

1.1	Rifiuti prodotti a bordo durante una crociera di una settimana [6]	9
1.2	Emendamenti all'allegato V MARPOL	13
2.1	Rifiuti prodotti a bordo	16
2.2	Potenza del singolo inceneritore installato a bordo	18
2.3	Potenza degli impianti refrigeranti installati a bordo	21
2.4	Potenze e coefficienti di performance degli impianti frigoriferi	22
3.1	Rifiuti cartacei prodotti e risparmiati sulla nave caso studio	26
3.2	Entalpia e concentrazioni nell'assorbitore	37
3.3	Principali potenze scambiate dall'impianto ad assorbimento	38
3.4	Risparmi ottenibili con l'impianto ad assorbimento	38



Capitolo 1

Introduzione

Il settore crocieristico negli ultimi anni è in costante ascesa e sviluppo, come evidenziato dalla figura 1.1, nella quale viene riportato anche il momentaneo crollo dovuto alla pandemia *COVID19*. Questo ha avuto delle ovvie ripercussioni anche sulla progettazione delle nuove navi: la concorrenza ha indotto alla progettazione di imbarcazioni sempre più grandi ed in grado di trasportare un numero sempre maggiore di persone.

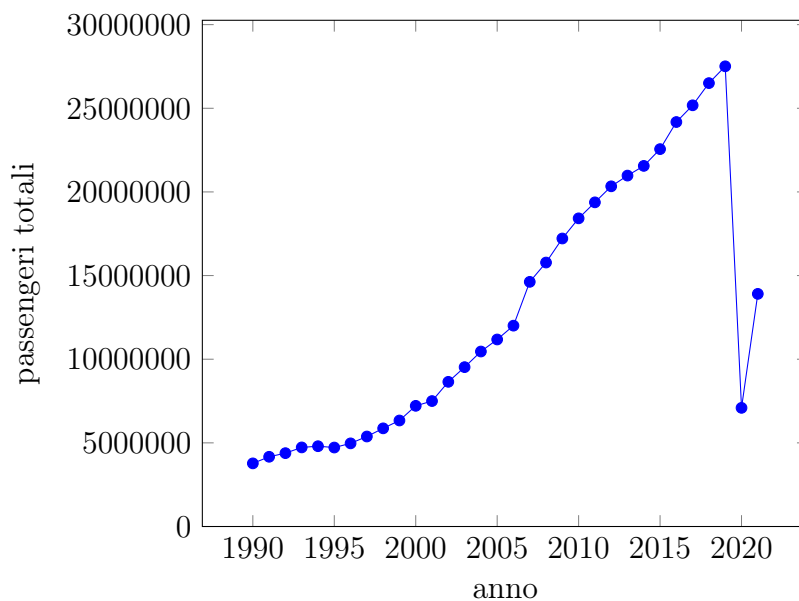


Figura 1.1: Passeggeri totali del settore crocieristico all'anno [1]

Conseguentemente anche l'impatto ambientale delle attività crocieristiche è al centro di una crescente attenzione negli ultimi anni, soprattutto per

Rifiuto	Produzione
Liquami	795 m^3
Acque grigie	3785 m^3
Acque oleose	95 m^3
Solidi	8 tonn

Tabella 1.1: Rifiuti prodotti a bordo durante una crociera di una settimana [6]

quanto riguarda la produzione di rifiuti i cui effetti investe i porti visitati e le rotte percorse [2, 3, 4]. Le navi da crociera, infatti, hanno visto aumentare nel tempo le loro dimensioni e conseguentemente anche il numero di passeggeri che sono in grado di ospitare a bordo, raggiungendo una media compresa fra 1000 e 5000 persone per crociera. I rifiuti prodotti devono essere smaltiti e questo processo insiste su un'area limitata, corrispondente ai porti visitati ed ai tratti di mare solcati. Inoltre, le crociere si ripetono ciclicamente nelle stesse zone, aumentando la pressione su aree limitate, senza considerare le conseguenze di eventi accidentali imprevisi, che possono avere ricadute anche molto impattanti [5].

Le tipologie di rifiuti prodotte a bordo ricalcano quelle generate degli agglomerati urbani della terraferma e possono raggiungere valori considerevoli. Ad esempio, Copeland [6] stima le produzioni settimanali di rifiuti a bordo di una nave con 3000 passeggeri come riportato in tabella 1.1.

Inoltre, tenendo in considerazione l'attuale trend del settore, soprattutto per quanto riguarda la Cina, è immaginabile un aggravamento della situazione ed un aumento dell'impatto complessivo [7], anche se la recente pandemia legata al COVID19 potrebbe portare ad una revisione di tali stime, almeno sul breve periodo. L'introduzione di politiche verdi, riguardanti la gestione dei rifiuti anche nel settore navale e soprattutto crocieristico è quindi diventato un argomento di grande rilevanza [8, 9, 10] che ha portato allo studio di adeguate linee guida e procedure atte a limitare l'impatto sull'ambiente oltre alla ricerca delle tecnologie utilizzabili per il miglioramento del trattamento e dello smaltimento dei rifiuti a bordo.

La crescita dell'attenzione verso la gestione dei rifiuti è dimostrata anche dall'incremento delle pubblicazioni su questo argomento, come evidenziato dal diagramma di figura 1.2. La spinta iniziale legata agli spetti ambientali ed ecologici è stata presto accompagnata dall'interesse economico legato alla possibilità di recupero energetico da una parte e al riciclo delle materie prime o dei manufatti dall'altra. Il volume delle ricerche però diminuisce drasticamente se rivolto al campo navale: basta aggiungere il termine "ship" alla ricerca precedente per ottenere valori inferiori di due ordini di grandezza

(figura 1.3).

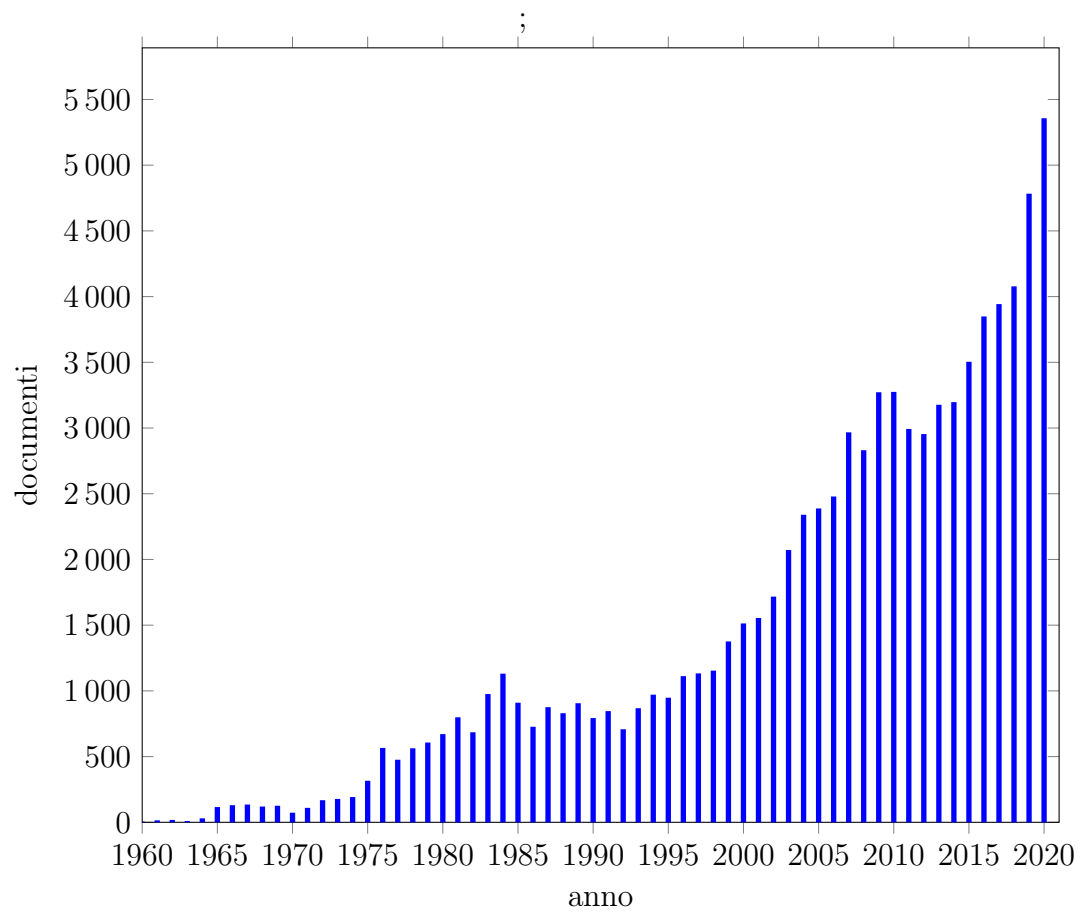


Figura 1.2: Articoli accademici indicizzati - stringa di ricerca="waste management", database=Scopus

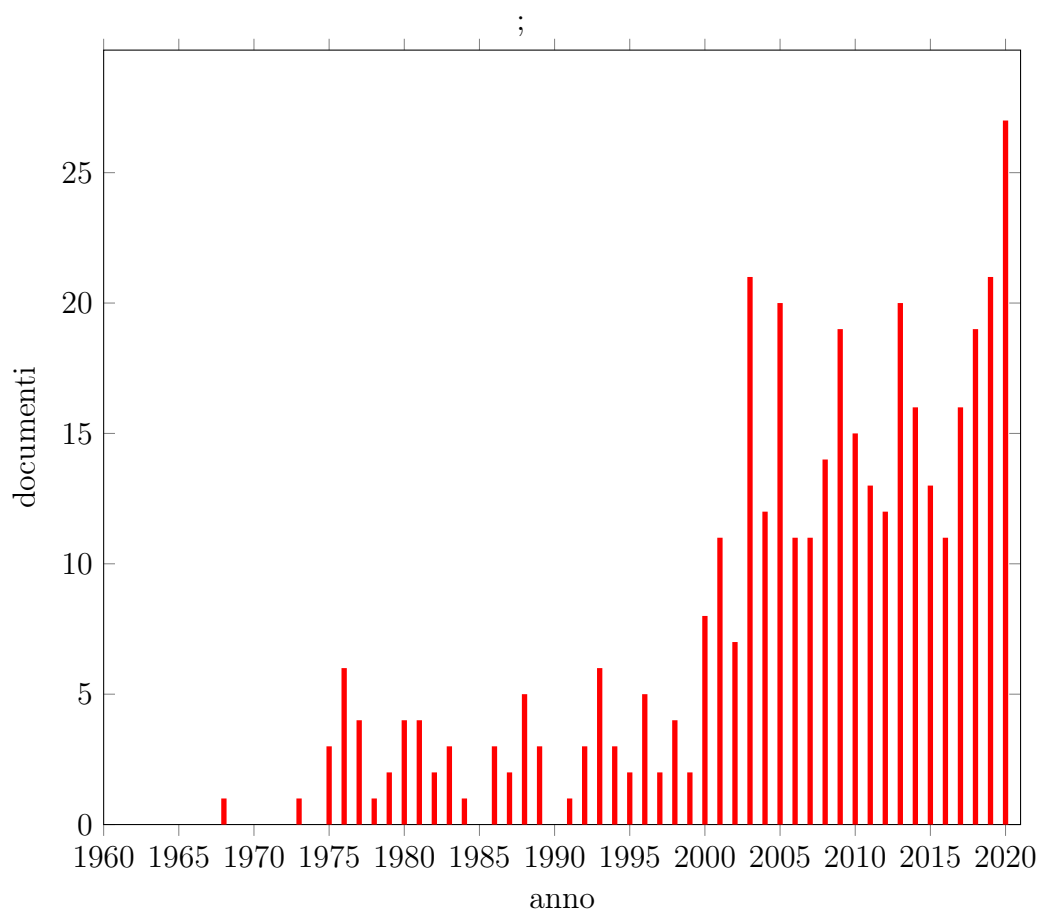


Figura 1.3: Articoli accademici indicizzati - stringa di ricerca="waste management" AND ship, database=Scopus

1.1 Norme, regolamenti e linee guida

La principale fonte normativa riguardante la prevenzione dell'inquinamento dell'ambiente marino è rappresentata dalla "Convenzione Internazionale per la Prevenzione dell'Inquinamento delle Navi (MARPOL)" [11]. Essa è costituita da diversi documenti: la Convenzione del 1973, il Protocollo del 1978 ed il Protocollo del 1997, oltre che da diversi emendamenti che hanno modificato ed integrato il dettato iniziale. La Convenzione è stata adottata per la prima volta il 2 novembre 1973 da parte dell'Organizzazione Marittima Internazionale (IMO), mentre il Protocollo del 1978 è entrato in forza a seguito di alcuni incidenti occorsi su diverse cisterne. I due documenti entrarono in

forza il 2 ottobre 1983, mentre nel 1997 è stato emanato un protocollo che ha emendato la Convenzione ed aggiunto il nuovo sesto Allegato (Annex VI).

La convenzione infatti è composta da diversi allegati, ciascuno riguardante uno specifico aspetto:

Annex I Regolamenti per la prevenzione dell'inquinamento da Olio

Annex II Regolamenti per il controllo dell'inquinamento da Sostanze liquide nocive trasportate alla rinfusa

Annex III Prevenzione dell'inquinamento da sostanze nocive trasportate confezionate

Annex IV Prevenzione dell'inquinamento da acque reflue dalle navi

Annex V Prevenzione dell'inquinamento da rifiuti dalle navi

Annex VI Prevenzione dell'inquinamento dell'aria dalle navi

1.1.1 Annex V - Prevention of Pollution by Garbage from Ships

L'allegato V entra in vigore il 31 dicembre 1988 e si concentra sulla prevenzione dell'inquinamento causato dai rifiuti generati dalle navi, riconoscendone la pericolosità per la vita marina al pari delle sostanze chimiche ed oleose. La plastica viene riconosciuta come la fonte più pericolosa a seguito della possibilità di essere scambiata per cibo da parte di pesci e mammiferi marini. Lo scopo dell'allegato è quello di prevenire il più possibile la quantità di rifiuti che vengono scaricati in mare e per questo, a meno di particolari eccezioni, si applica a tutte le imbarcazioni, mercantili e non, così come alle piattaforme fisse e movibili. L'accettazione dell'allegato avviene su base volontaria ed attualmente conta più di 150 nazioni sottoscrittrici. La tabella 1.2 mostra gli emendamenti che sono stati emanati negli anni e hanno riguardato questo allegato.

L'approccio della norma, innovativo per l'epoca di pubblicazione come stabilito nell'introduzione, rovescia quello che era lo standard fino ad allora, ovvero la presunzione che ogni tipo di rifiuto potesse essere scaricato in mare. Con questo regolamento in generale viene proibito lo scarico a mare di qualsiasi rifiuto, eccezion fatta per alcune tipologie, specificate e regolamentate in punti precisi del documento. In particolare, sotto certe condizioni, è consentito lo scarico a mare di rifiuti alimentari, detergenti ed additivi, residui di carico e carcasse di animali.

No.	Documento	Adozione	Accettazione	Entrata in vigore
1	MEPC.36(28)	17/10/1989	17/08/1990	18/02/1991
2	MEPC.42(30)	16/11/1990	16/09/1991	17/03/1992
3	MEPC.48(31)	04/07/1991	04/10/1992	04/04/1993
4	Resolution 3 ³	02/11/1994	03/09/1995	03/03/1996
5	MEPC.65(37)	14/09/1995	01/01/1997	01/07/1997
6	MEPC.89(45)	05/10/2000	01/09/2001	01/01/2002
7	MEPC.116(51)	01/04/2004	01/02/2005	01/08/2005
8	MEPC.201(62)	15/07/2011	01/07/2012	01/01/2013
9	MEPC.216(63)	02/03/2012	01/02/2013	01/08/2013
10	MEPC.246(66)	04/04/2014	01/07/2015	01/01/2016
11	MEPC.265(68)	15/05/2015	01/07/2016	01/01/2017
12	MEPC.277(70)	28/10/2016	01/09/2017	01/03/2018

Tabella 1.2: Emendamenti all'allegato V MARPOL

Per facilitare l'implementazione di quanto prescritto dall'allegato, il Comitato per la protezione dell'ambiente marino (MEPC) ha redatto delle linee guida da seguire da parte degli organismi coinvolti (operatori portuali e navi), l'ultima edizione delle quali è contenuta nella Risoluzione MEPC.295(71).

L'attuazione delle prescrizioni previste è legata fortemente anche alle infrastrutture presenti nei porti destinatari, i quali a loro volta devono ottemperare con adeguati servizi in grado di ricevere i rifiuti non più scaricati a mare e che possono aver subito un pre-trattamento a bordo.

L'allegato individua inoltre delle aree speciali in base a particolari condizioni oceanografiche ed ecologiche, all'interno delle quali saranno obbligatori particolari metodi di prevenzione dell'inquinamento da rifiuti. Queste sono:

1. l'area del mare Mediterraneo
2. l'area del mar Baltico
3. l'area del mar Nero
4. l'area del mar Rosso
5. l'area del Golfo Persico
6. l'area del mare del Nord
7. l'area allargata dei Caraibi
8. l'area dell'Antartico

Una prescrizione fondamentale dell'allegato riguarda le imbarcazioni e le piattaforme con una stazza lorda superiore a 100 GT o in grado di trasportare 15 o più persone: esse dovranno dotarsi di piano di gestione dei rifiuti di bordo, dove saranno descritte le tutte le procedure riguardanti la raccolta, il trattamento, lo stoccaggio e l'eliminazione dei rifiuti. Anche per la stesura di questo documento, che individuerà un responsabile e sarà scritto nella lingua dell'equipaggio, il MEPC ha previsto delle linee guida ([12]) per garantire l'uniformità dei contenuti.

1.1.2 Annex VI - Prevention of Air Pollution from Ships

L'allegato VI è il più recente ed entra in vigore il 19 maggio 2005, regolamentando la prevenzione dell'inquinamento atmosferico causato dalle navi. L'obiettivo è quello di ridurre le emissioni degli ossidi di zolfo (SO_x) e d'azoto (NO_x), delle sostanze in grado di aumentare il buco dell'ozono (ODS) e dei composti organici volatili (VOC) generati dal processo di incenerimento. Una revisione significativa dell'allegato è entrata in vigore nel luglio 2010, stabilendo limiti più restrittivi alle emissioni consentite. Nel luglio 2011 inoltre viene introdotto come obbligatorio un nuovo indice progettuale per l'efficienza energetica (Energy Efficiency Design Index, EEDI) unitamente al piano di gestione per l'efficienza energetica della nave (Ship Energy Efficiency Management Plan, SEEMP) [13]. Dopo i primi due anni di sperimentazione, vengono fissati dei valori di riferimento per l'emissione complessiva di CO_2 in funzione della tipologia di imbarcazione con l'obiettivo di ridurlo ogni 5 anni, così da stimolare continuamente la ricerca tecnologica nel settore.

1.1.3 Guide to ship sanitation

Un altro documento fondamentale per la gestione ed il trattamento dei rifiuti a bordo nelle navi è rappresentato dalla guida dell'Organizzazione Mondiale della Sanità [14]. Partendo dal presupposto che si deve assicurare innanzitutto il mantenimento delle condizioni igienico/sanitarie necessarie per garantire la sicurezza di passeggeri ed equipaggio, la guida si divide in diversi capitoli, ciascuno dedicato ad un aspetto del controllo della salubrità a bordo:

- acqua,
- cibo,
- ambienti ricreativi con acqua,
- acqua di zavorra,

- gestione e smaltimento dei rifiuti,
- controllo dei vettori e dei serbatoi di malattie,
- controllo degli agenti infettivi nell'ambiente.

Ogni capitolo è diviso in due parti: la prima descrive le criticità legate all'oggetto della sezione mentre la seconda fornisce delle linee guida da seguire da seguire per la gestione di quello specifico aspetto. Per quanto concerne il cibo ed i conseguenti rifiuti alimentari, vengono individuate le diverse fasi dell'approvvigionamento e dei trasporti unitamente ad i relativi rischi sanitari. Nella seconda parte, le linee guida fissano le procedure necessarie a garantire che i beni alimentari siano trattati e conservati opportunamente, basandosi sui principi dell'Hazard Analysis and Critical Control Points (HACCP). Il capitolo dedicato alla gestione ed allo smaltimento dei rifiuti, dopo aver evidenziato le fonti di rischio ad essi correlate, individua nelle linee guida le principali forme di prevenzione da adottare per le diverse tipologie.

- gestione delle acque reflue e grigie
- gestione dei rifiuti solidi
- gestione dei rifiuti farmaceutici e medicali

Capitolo 2

Analisi dello stato di fatto

2.1 Rifiuti prodotti

Una moderna nave da crociera produce un quantitativo enorme di rifiuti legati all'attività ricettiva. Scarti alimentari, carta e cartone, plastica, alluminio e vetro rappresentano le principali tipologie. La tabella 2.1 mostra la produzione per persona per giorno di navigazione di tali rifiuti [15].

Tipo di rifiuto	Produzione pro capite giornaliera kg/pers giorno	Massa volumica kg/m^3
Plastica	0,22	1100
Carta e cartone	0,98	970
Alimentari	2	985
Vetro	0,68	2500
Alluminio	0,02	2700
Totale	3,9	

Tabella 2.1: Rifiuti prodotti a bordo

I rifiuti prodotti subiscono a bordo trattamenti diversi a seconda della loro tipologia e del piano di gestione; in esso sono previste inoltre le modalità di smaltimento finale, che può avvenire in navigazione o una volta raggiunto il cosiddetto *home port*, dove la nave svuota i depositi e provvede ad imbarcare le nuove scorte.

La figura 2.1 mostra schematicamente l'attuale sistema di gestione ed i differenti trattamenti previsti per le diverse tipologie di rifiuto in funzione dello smaltimento finale.

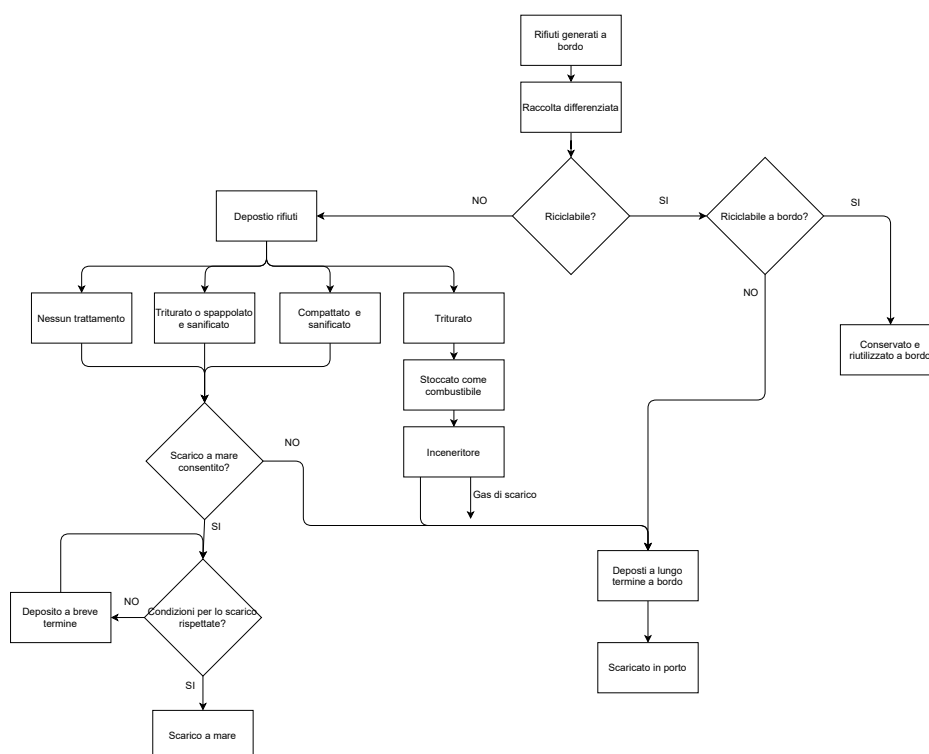


Figura 2.1: Trattamento rifiuti

La prima distinzione principale è legata alla possibilità di riciclare o meno il rifiuto. Nel caso sia possibile riciclarlo direttamente a bordo esso viene conservato e riutilizzato. Se invece il riutilizzo è previsto, ma non a bordo esso viene conservato in depositi a lungo termine per poi essere adeguatamente scaricato nel porto dedicato. I rifiuti che invece non sono destinati al riciclo vengano trattati in maniera differente in funzione del loro smaltimento definitivo. I possibili trattamenti comprendono la triturazione, il compattamento, la sanificazione ed infine l'incenerimento, lo scarico a mare o la consegna in porto. In ogni caso sono previsti dei depositi intermedi che permettono la gestione dei diversi trattamenti: alcuni di essi infatti, come l'incenerimento e lo scarico a mare ad esempio, possono avvenire solo a determinate condizioni.

2.2 Impianto di incenerimento

Attualmente le navi da crociera sono equipaggiate con un impianto di incenerimento, generalmente composto da due inceneritori della medesima potenzialità. Nella gestione ordinaria solo uno dei due è operativo, mentre l'altro viene mantenuto per garantire la ridondanza del sistema e la presenza di

eventuali pezzi di ricambio. La tabella 2.2 riporta la potenza del singolo inceneritore installato a bordo, oltre alla stazza (GRT) ed al numero massimo di persone previste (colonna LSA - Life-saving appliances, legata agli equipaggiamenti di sicurezza da portare a bordo) per un insieme di navi di recente costruzione.

Nave	GRT	LSA	Potenza inceneritore [kw]
1	116000	4800	1600
2	89500	3200	1400
3	128500	6000	2000
4	32000	800	600
5	112000	4890	1600
6	66200	2100	800
7	141000	5600	1800
8	47800	1487	1150
9	99500	4173	1400
10	133500	6448	2100
11	54000	1360	2100
12	40350	1120	500
13	154000	6592	2000
14	110000	4400	2000

Tabella 2.2: Potenza del singolo inceneritore installato a bordo

Come evidenziato nella sezione 1.1, non tutti i rifiuti generati a bordo sono idonei allo smaltimento tramite incenerimento, ma l'elevato contenuto organico presente (anche superiore all'85%) ne rende facilmente trattabile in questa maniera una buona quota parte, a seguito di un'adeguata raccolta differenziata. Attualmente tale prassi è finalizzata unicamente all'eliminazione del rifiuto, così da evitarne lo stoccaggio a lungo termine e le conseguenti implicazioni di carattere igienico-sanitario [2, 16].

2.3 Altri impianti termici a bordo

Gli impianti che operano sull'energia termica a bordo e non dedicati ad aspetti tecnici sono principalmente quelli dedicati alla climatizzazione (HVAC) e alla refrigerazione dei magazzini alimentari. Le scorte deperibili vengono conservate in magazzini operanti a due livelli di temperature differenti: uno al di sopra dello zero, la cella frigorifera (CHILL) e l'altro al di sotto dello zero, per la conservazione in condizioni di congelamento (FREEZE).

Per valutare il possibile sfruttamento dell'energia recuperabile dall'inceneritore come fonte per gli altri impianti sopracitati si sono innanzitutto confrontati i livelli di potenza installati su navi attualmente esistenti. La figura 2.2 mostra le potenze installate a bordo di 14 imbarcazioni per gli impianti studiati. È evidente come ci sia una differenza di un ordine di grandezza fra l'impianto HVAC e gli altri, per cui non sarebbe possibile sfruttare l'energia dei fumi per alimentare tale servizio.

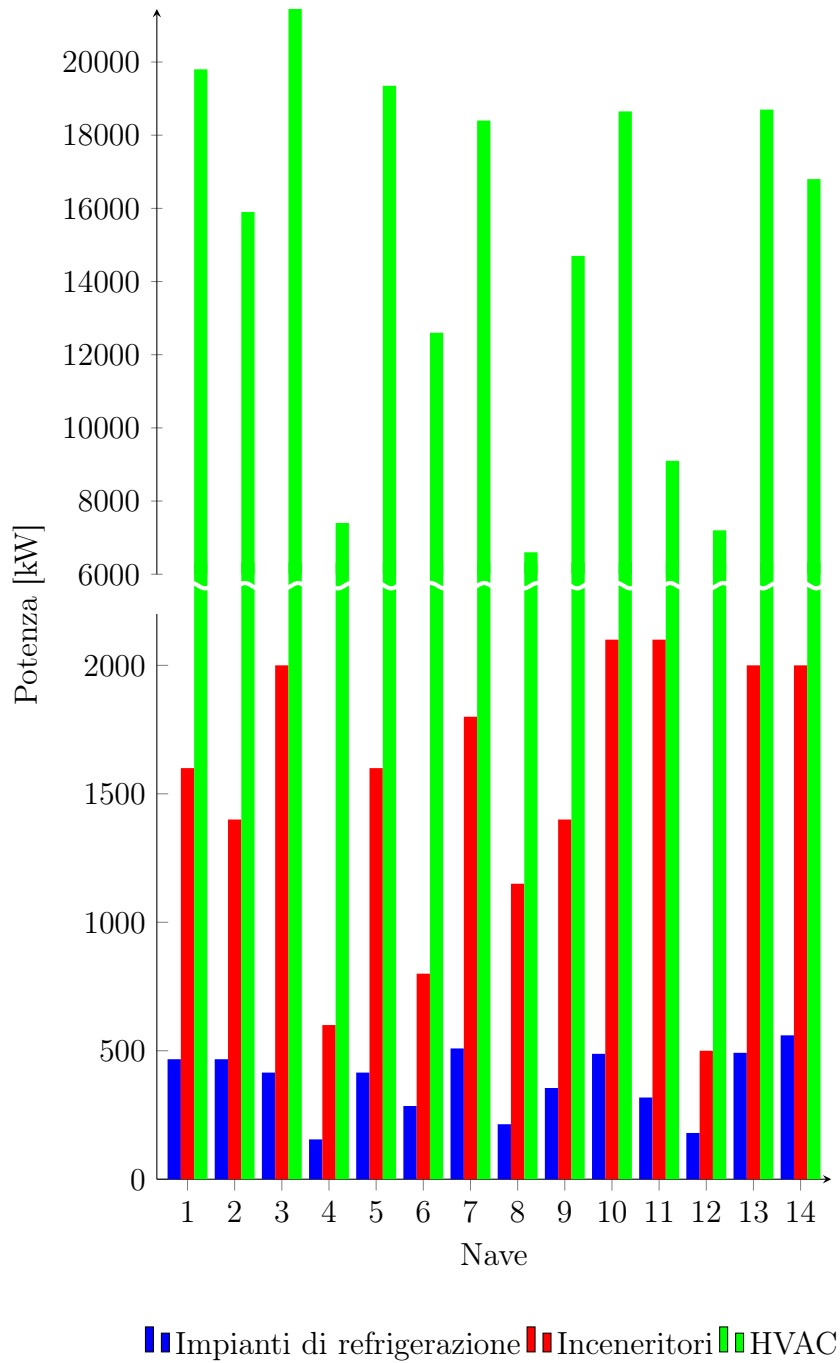


Figura 2.2: Potenza degli impianti di refrigerazione, incenerimento e climatizzazione di bordo

2.3.1 Impianti frigoriferi

Gli impianti frigoriferi di bordo devono mantenere il più possibile costante la temperatura all'interno dei depositi refrigerati, dedicati alla conservazione dei cibi deperibili. Sono presenti due impianti operanti a temperature differenti: il primo regola la temperatura del deposito frigorifero al di sopra di 0 °C (CHILL), mentre il secondo si occupa del deposito dedicato alla conservazione di cibi congelati a temperature inferiori allo zero (FREEZE). Attualmente si sfruttano i cicli a compressione di vapore, alimentati dall'energia elettrica prodotta a partire dai motori principali. La tabella 2.3 riporta alcuni valori delle potenze installata a bordo per gli impianti CHILL e FREEZE.

Nave	GRT	LSA	Potenza [kW]		
			CHILL	FREEZE	TOTALE
1	116000	4800	363	104	467
2	89500	3200	363	104	467
3	128500	6000	290	125	415
4	32000	800	106	49	155
5	112000	4890	290	125	415
6	66200	2100	215	70	285
7	141000	5600	414	95	509
8	47800	1487	168	46	214
9	99500	4173	265	90	355
10	133500	6448	210	68	278
11	54000	1360	245	73	318
12	40350	1120	145	35	180
13	154000	6592	382	110	492
14	110000	4400	430	130	560

Tabella 2.3: Potenza degli impianti refrigeranti installati a bordo

Confrontando i valori delle potenze frigorifere con quelli delle potenze assorbite dai relativi compressori, la tabella 2.4 mostra i valori dei coefficienti di performance delle configurazioni attuali.

Nave	CHILL			FREEZE		
	Potenza frigorifera	Potenza elettrica	COP	Potenza frigorifera	Potenza elettrica	COP
1	363	169	2,15	104	98	1,06
2	363	169	2,15	104	98	1,06
3	290	121	2,40	125	95	1,32
4	106	58	1,83	49	42	1,17
5	290	122	2,38	125	101	1,24
6	215	95	2,26	70	73	0,96
7	414	196	2,11	95	106	0,90
8	168	63	2,67	46	30	1,53
9	265	120	2,21	90	75	1,20
10	210	106	1,98	68	60	1,13
11	245	110	2,23	73	66	1,11
12	145	67	2,16	35	31	1,13
13	382	171	2,24	110	104	1,06
14	430	180	2,39	130	130	1,00

Tabella 2.4: Potenze e coefficienti di performance degli impianti frigoriferi

Capitolo 3

Approccio proposto

In questo capitolo saranno illustrate le soluzioni individuate dalla ricerca. La loro applicazione, almeno in parte, trova spazio su qualsiasi nave da crociera contemporanea e per esemplificare l'impatto delle nuove implementazioni verrà utilizzata una nave modello, caratterizzata da una stazza di 141000 GRT e capace di trasportare 5400 persone.

3.1 Nuova gestione

Il nuovo sistema integrato di gestione dei rifiuti prevede diverse strategie la fine di ridurre da un lato la produzione e di sfruttare il contenuto energetico dei rimanenti dall'altra, come evidenziato in figura 3.1.

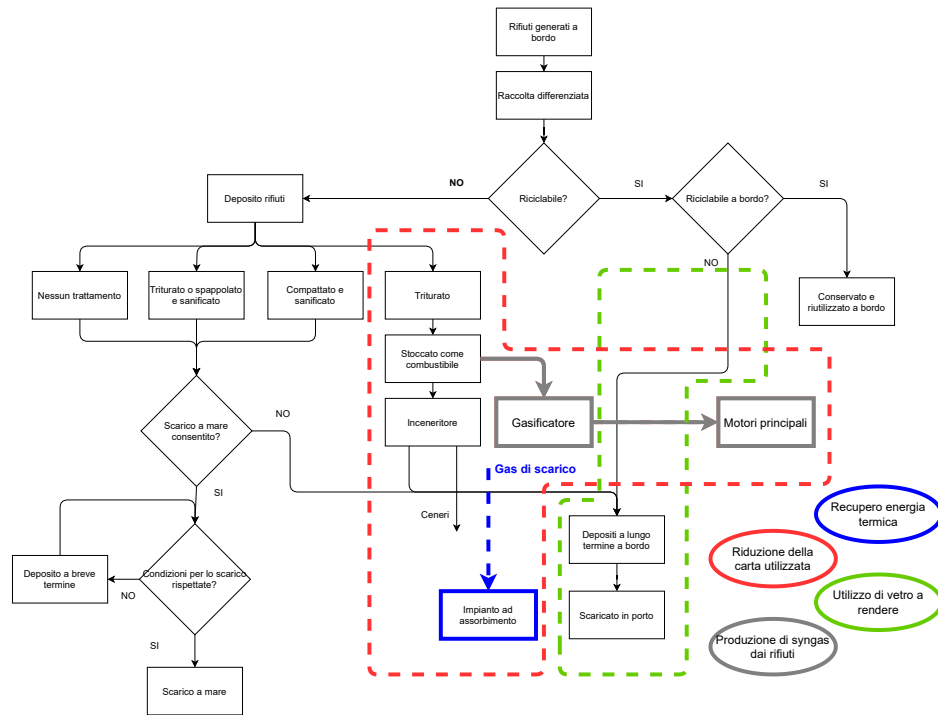


Figura 3.1: Schema della nuova gestione dei rifiuti [15]

3.2 Riduzione dei rifiuti prodotti

3.2.1 Vetro

Una massa significativa di rifiuti è rappresentata del vetro, principalmente proveniente da bottiglie. Attualmente esso viene raccolto, triturato e poi stivato per essere scaricato in porto e poi indirizzato al processo di riciclaggio come frammenti. Sostituendo questo approccio con l'utilizzo di bottiglie con vuoto a rendere è possibile diminuire l'impatto complessivo legato a questo genere di rifiuti. Le differenze principali rispetto all'approccio attuale riguardano la diversa gestione degli spazi e il minore utilizzo della trituratrice dedicata alla frantumazione delle bottiglie. Una ridotta percentuale di vetro sarà comunque ridotta in frammenti a causa di rotture accidentali. La maggior parte delle bottiglie invece dovrà essere raccolta e riposta occupando la stessa quantità di spazio prevista per lo stoccaggio della risorsa prima della sua utilizzazione. Questo approccio non comporterà quindi nessun aggravio sugli spazi necessari. Dal punto di vista energetico invece, il risparmio conseguibile è stimabile valutando la riduzione di energia assorbita per la frantumazione. Una frantumatrice tipica installata a bordo è in grado di

trattare circa 1000 kg all'ora di vetro assorbendo $5,5 kW_e$ di potenza elettrica e lavora una media di 4,5 ore al giorno. Considerando una percentuale di rotture accidentali pari al 20%, l'utilizzo del vuoto a rendere permette di evitare il ricorso a questo macchinario per il restante 80%. Se ne riduce pertanto l'utilizzo a circa 0,9 ore con un corrispondente risparmio del consumo di energia elettrica. Considerando il consumo specifico di carburante pari a $208,8 g/kWh_e$, il risparmio può essere stimato pari a 4,1 kg per ogni giorno di navigazione. Un'analisi rigorosa del risparmio economico ottenibile è di difficile esecuzione, ma alcune considerazioni possono portare ad una stima dei risultati ottenibili. Il costo di vendita dei rottami di vetro varia a seconda del colore fra 0,2 €/kg e 0,3 €/kg [17] (insiemi omogenei dello stesso colore vengono pagati di più) e quindi è possibile utilizzare un valore medio di 0,25 €/kg. Il costo per la produzione di bottiglie a partire dal vetro frantumato è pari a 0,05 €/kg [18]. Il valore riconosciuto come cauzione all'atto della restituzione delle bottiglie integre dipende dalla nazione e dalla capacità, variando fra 0,03 €/bottiglia e 0,20 €/bottiglia [19]. Quindi ipotizzando un peso medio delle bottiglie pari a 0,5 kg ed una cauzione di 0,1 €/bottiglia si ottiene un valore specifico pari a 0,2 €/kg. Questo significa che il costo legato alla sanificazione ed alla rietichettatura delle bottiglie dovrà essere inferiore a tale cifra, per ottenere un vantaggio economico. L'approccio proposto per la gestione del vetro permette un risparmio dello spazio dedicato alla conservazione dei frammenti di vetro, che per la nave scelta come caso di studio, equivale a $9,5 m^3$; infatti le bottiglie non frantumate possono essere ricollocate occupando gli stessi spazi di prima che venissero utilizzate.

3.2.2 Carta

La seconda categoria di rifiuti generata in abbondanza a bordo delle navi da crociera e che può essere ridotta con il nuovo approccio è rappresentata dai prodotti con un elevato contenuto di cellulosa, ovvero carta e cartone. La carta a bordo è utilizzata in tre differenti settori:

- depliant informativo pubblicitari
- usi igienico/sanitari
- documenti "interni" per l'equipaggio

Per quanto riguarda i dépliant pubblicitario/informativi la loro diffusione a bordo rappresenta uno spreco notevole, anche in considerazione della loro "durata": essi infatti vengono prodotti in notevole quantità quotidianamente per poi essere eliminati in giornata ed il loro consumo stimato corrisponde

a 15 g/giorno per passeggero. In linea con l'evoluzione tecnologica, la loro sostituzione con modalità digitali può portare una notevole riduzione sulla quantità di carta utilizzata. L'installazione di totem in grado di fornire le informazioni ai passeggeri, abbinati alla divulgazione delle notizie tramite applicazioni installate sui telefoni cellulari può sostituire in gran parte il materiale cartaceo, con una riduzione compresa fra il 25% ed il 100% [20]. Per quanto riguarda la carta destinata ad uso igienico/sanitari, essa è composta dalla carta igienica e dagli asciugamani di carta distribuiti nelle toilette. Il passaggio a distributori in grado di fornire carta pretagliata al posto degli abituali rotoli, può portare una importante riduzione del consumo, che può essere stimata attorno al 25% del totale. L'ultima tipologia indagata riguarda i documenti e le comunicazioni interne utilizzate dall'equipaggio: anche in questo caso è ipotizzabile che l'adozione di nuove linee guida finalizzate al controllo della carta utilizzata possa portare ad una riduzione del 50% [20]. I risultati ottenibili applicando gli approcci sopra esposti alla nave utilizzata come caso di studio sono evidenziati in tabella 3.1.

Rifiuto	Produzione attuale kg/giorno	Percentuale risparmiata	Carta risparmiata kg/giorno
Materiale pubblicitario	83	50%	41,5
Carta igienica e asciugamani	179	25%	45
Comunicazioni interne	102	50%	51
Totale	364		137,5

Tabella 3.1: Rifiuti cartacei prodotti e risparmiati sulla nave caso studio

3.3 Sfruttamento energetico dei rifiuti prodotti

Lo sfruttamento energetico del potenziale contenuto nei rifiuti è un passaggio essenziale per una gestione più sostenibile. Gli impianti installati a bordo sono alimentati dall'energia elettrica prodotta trasformando quella meccanica generata dai motori principali. Questo vale anche per gli impianti termici, che per la parte dedicata al raffrescamento sfruttano i cicli inversi operando con sistemi a compressione di vapore.

3.3.1 Gassificazione

I rifiuti prodotti a bordo caratterizzati dalla cellulosa presente nella loro composizione, possono essere sfruttati per la produzione di syngas in appositi gassificatori ottenendo il loro smaltimento e generando un combustibile

che può essere riutilizzato a bordo, anche in considerazione della tecnologia degli attuali motori ad uso navale, in grado di funzionare sia se alimentati da combustibili liquidi che da combustibili gassosi (Dual Fuel Engines) [21, 22, 23]. La produzione e lo stoccaggio di una sostanza pericolosa come il syngas a bordo delle navi può causare dei problemi relativi alla sicurezza degli impianti ed al rischio di esplosione, come indagato in diverse ricerche focalizzate sul syngas generato a partire da biomasse [24, 25, 26]. In questi studi viene evidenziato come l'adozione di opportune misure preventive sia in grado di controllare il rischio legato a questo tipo di impianti prevenendo i rischi di incendio ed esplosione. Certamente il settore crocieristico e navale in genere necessita di ancora maggiore attenzione a riguardo, ma le premesse consentono di ipotizzare come percorribile la strada qui individuata. Anche i residui alimentari, con il loro elevato contenuto organico, potrebbero essere sfruttati all'interno del reattore, ma vista la prassi attuale di smaltimento, che ne prevede la triturazione e lo scarico a mare (sempre sotto le previste condizioni) si è preferito non prevederne lo sfruttamento a tal fine. Come esposto in precedenza, nel caso della nave presa ad esempio, ogni giorno si rendono disponibili 4120 kg/giorno di rifiuti cartacei, che corrispondono ad una possibile portata all'interno dell'impianto di gassificazione di 172 kg/h, considerando un funzionamento continuato dello stesso, 24 ore su 24. Per stimare la potenzialità della soluzione proposta, non esistendo impianti di questo tipo, ovvero focalizzati sul solo utilizzo di rifiuti di carta e cartone, si sono ricercate attività simili, in funzione della composizione chimica dei prodotti utilizzati. Ad esempio, i residui della produzione del mais hanno una composizione ed un potere calorifico inferiore molto simile a quello di carta, cartone e rifiuti legnosi [27, 28, 29]. Susastriawan, Saptoadi e Purnomo [30] hanno studiato le potenzialità ottenibili sfruttando questo genere di scarto all'interno di reattori di forma cilindrica (altezza pari a 0,85 m e diametro di 0,3 m). Lo studio riporta la produzione di $20,12 \text{ Nm}^3/\text{h}$ di syngas con un'alimentazione di 9,4 kg/h di rifiuti. Nel caso in esame, lo spazio disponibile per l'installazione dell'impianto di gassificazione è stato valutato pari a quello occupato da uno dei due inceneritori di bordo, prevedendo il mantenimento del gemello, anche in funzione di una più graduale transizione verso i nuovi sistemi di gestione dei rifiuti. Pertanto il reattore, che rappresenta il volume principale dell'impianto potrà occupare uno spazio pari ad un parallelepipedo di lati lunghi 6 m, 2 m e 5 m. In tale spazio possono trovare posto fino a 36 reattori come quello citato precedentemente, i quali consentirebbero di trattare una portata complessiva di 338 kg/h di rifiuti, a fronte di una disponibilità pari a 172 kg/h. Questo garantisce che lo spazio individuato sia sufficiente allo smaltimento di tutti i rifiuti interessati, permettendo anche l'alloggiamento delle parti accessorie dell'impianto.

Per valutare l'impatto energetico di questo approccio, il valore del potere calorifico inferiore del syngas prodotto è stato stimato pari a 14,5 MJ/kg (equivalente a 13,0 MJ/Nm³)[29, 31]. Il reattore ipotizzato è in grado di generare 8836 Nm³/giorno, corrispondenti a 114864 MJ/giorno di energia disponibile. Il potere calorifico inferiore del combustibile IFO 380 è pari a 39 MJ/kg e quindi pensando di sostituire quest'ultimo con il syngas generato a bordo si può ottenere un risparmio di combustibile pari a 2945 kg/giorno. Il mancato utilizzo di questo combustibile comporta una conseguente riduzione delle emissioni di CO₂: il risparmio annuale può essere stimato in 900 t/anno corrispondente a circa 2900 t/anno di CO₂. Dal punto di vista economico, il risparmio di combustibile equivale a circa 300000 €/anno, sulla base del valore medio di mercato dell'IFO 380 di gennaio 2020. La stima del costo dell'impianto è di difficile esecuzione: non esistono applicazioni simili in campo navale e le peculiarità delle installazioni a bordo sono difficilmente comparabili con quelle in campo terrestre. Una prima approssimazione può essere ricercata sulla base di impianti di simile potenzialità utilizzati per piccole città e comunità con un numero di abitanti paragonabile a quello di passeggeri ed equipaggio. Mondal, Dang e Garg [32] individua che per tale tipo di impianti il 49% del costo totale è rappresentato dalle sezioni di alimentazione, gassificazione e pulizia del gas, tutte indispensabili e sempre presenti in impianti di questo genere. Sfruttando la produzione oraria calcolata precedentemente e lo studio di Trippe et al. [33] è possibile calcolare un costo approssimativo dell'impianto pari a 260000 €. Confrontandolo con i valori di risparmio esposti in precedenza, l'investimento sembra di sicuro interesse, anche considerando le incertezze sulla stima dei costi totali.

3.3.2 Sfruttamento dei fumi uscenti dall'inceneritore

L'energia contenuta nei fumi caldi in uscita dall'inceneritore rappresenta una fonte non ancora sfruttata e potrebbe essere utilizzata in un impianto funzionante secondo un ciclo ad assorbimento come macchina frigorifera. In questo tipo di impianti il compressore operante sul liquido frigorifero viene sostituito da un sotto-impianto comprendente un generatore, un assorbitore, uno scambiatore di calore ed una pompa come esemplificato in figura 3.2, mentre la figura 3.3 riporta la schematizzazione del ciclo corrispondente.

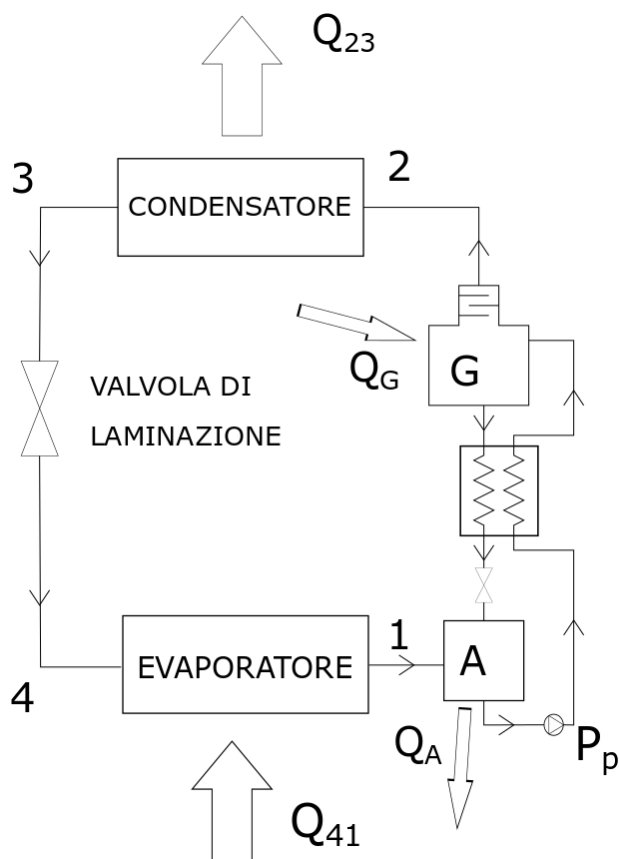


Figura 3.2: Schema di un impianto ad assorbimento

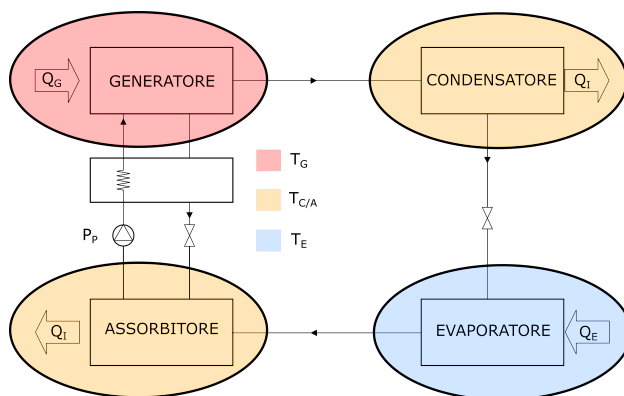


Figura 3.3: Ciclo ad assorbimento

Per quanto già esposto, a causa dei diversi livelli di potenza disponibili, solo l'alimentazione degli impianti dedicati alla conservazione dei cibi sembra

essere una via praticabile. La figura 3.4 riporta le potenze installate a bordo in funzione della stazza di diverse navi di recente costruzione.

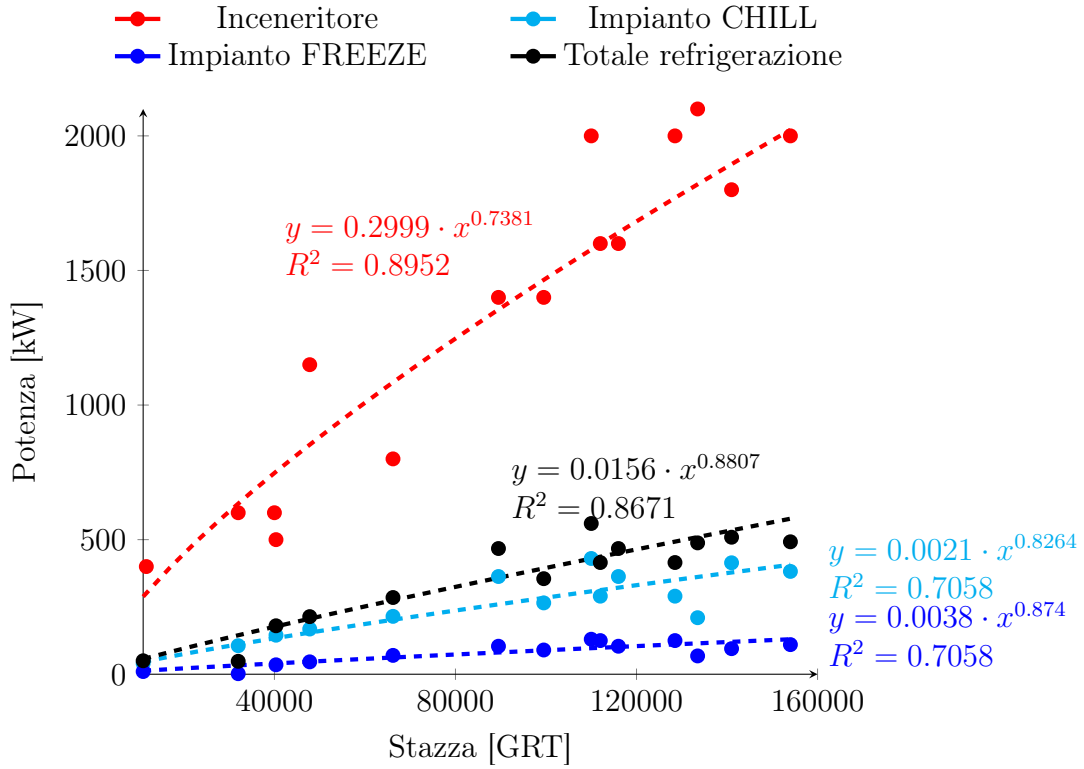


Figura 3.4: Potenza dell'inceneritore e degli impianti di refrigerazione in funzione della stazza.

Le relazioni fra potenza e stazza per ciascuna tipologia di impianto sono rappresentabili con buona approssimazione da funzioni del tipo $y = cx^b$, che forniscono i valori del coefficiente di determinazione R^2 riportati per ciascun caso:

$$\text{INCENERITORE } P = 0,2999 \cdot GRT^{0,7381}, R^2 = 0,8952$$

$$\text{CHILL } P = 0,0021 \cdot GRT^{0,8264}, R^2 = 0,7058$$

$$\text{FREEZE } P = 0,0038 \cdot GRT^{0,874}, R^2 = 0,7058$$

$$\text{TOT. REFR. } P = 0,0156 \cdot GRT^{0,8807}, R^2 = 0,8671$$

Gli stessi dati sono riportati in figura 3.5 in funzione del numero massimo di persone accoglibili a bordo (TPC). Anche in questo caso si possono

identificare semplici funzioni in grado di aiutare il dimensionamento in fase progettuale:

$$\text{INCENERITORE } P = 9,1537 \cdot GRT^{0,6148}, R^2 = 0,82$$

$$\text{CHILL } P = 1,637 \cdot GRT^{0,625}, R^2 = 0,5861$$

$$\text{FREEZE } P = 0,3683 \cdot GRT^{0,666}, R^2 = 0,6453$$

$$\text{TOT. REFR. } P = 1,4532 \cdot GRT^{0,6796}, R^2 = 0,7948$$

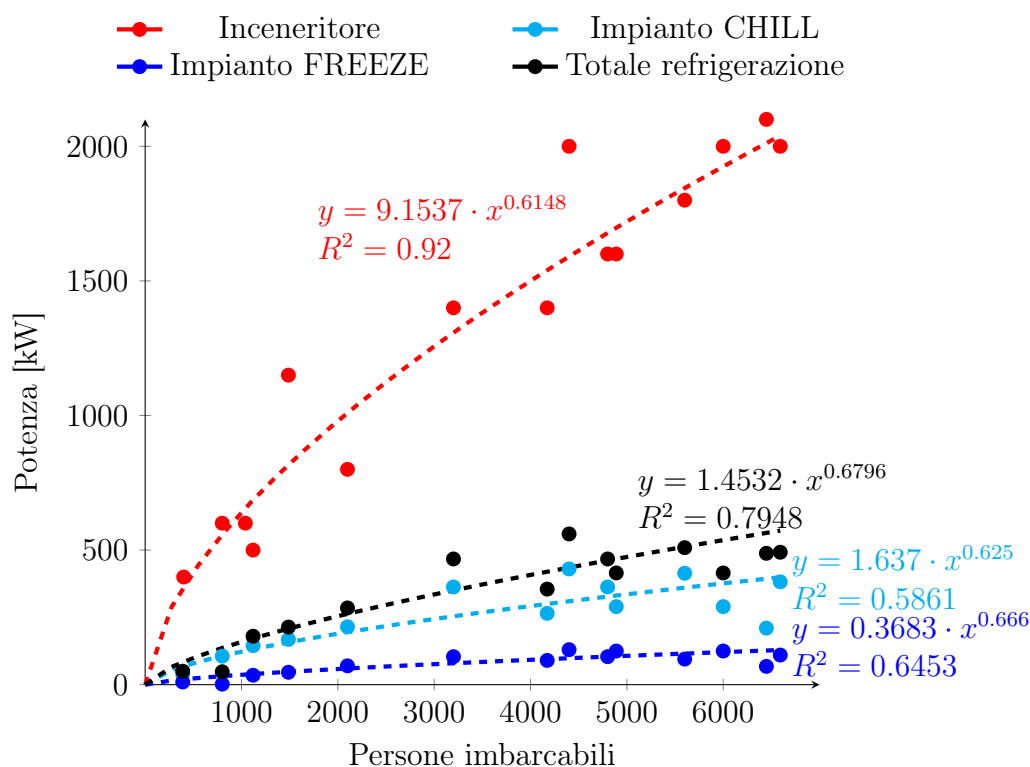


Figura 3.5: Potenza dell'inceneritore e degli impianti di refrigerazione in funzione delle persone imbarcabili.

Il confronto fra le potenze installate evidenzia la possibilità di sfruttare l'energia dei fumi uscenti dall'inceneritore come sorgente di alimentazione di un impianto ad assorbimento, in grado di refrigerare i magazzini alimentari. L'impianto CHILL risulta sempre quello con una potenza superiore è quindi si è concentrato lo studio su questo sistema per procedere con un

dimensionamento di massima per verificare la fattibilità tecnica della soluzione ipotizzata. La figura 3.6 riporta lo schema di riferimento per lo studio dell'impianto proposto.

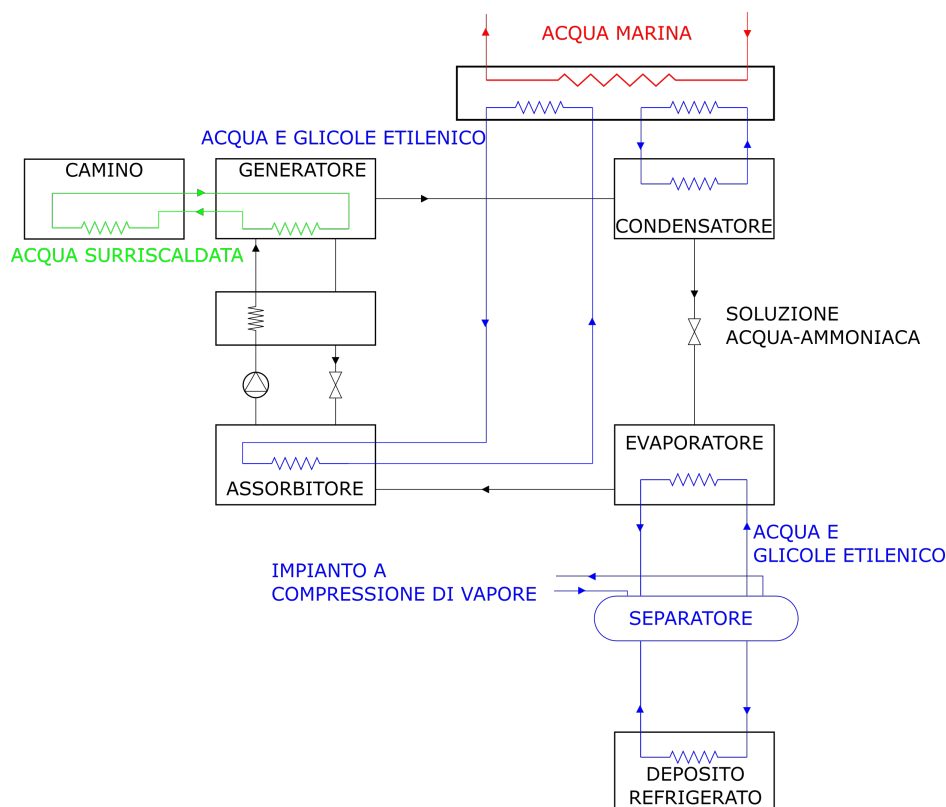


Figura 3.6: Schema dell'impianto di refrigerazione per il magazzino frigorifero

Lo sfruttamento del ciclo ad assorbimento operante con una soluzione di acqua e ammoniaca come fluido refrigerante, permette il recupero dell'energia termica altrimenti dispersa con i fumi uscenti dall'inceneritore. Questa soluzione non può sostituirsi completamente all'impianto a compressione di vapore attualmente operante, viste le limitazioni sull'utilizzo dell'impianto di incenerimento. Infatti, esso non può essere esercito qualora la nave si trovi ormeggiata o comunque troppo vicina alla costa, pertanto in queste condizioni la potenza necessaria sarà fornita dall'impianto a compressione di vapore. L'integrazione fra i due diversi sistemi è resa possibile dall'utilizzo di un separatore idraulico installato fra l'evaporatore ed il deposito refrigerato. Tale componente permette una facile commutazione degli impianti introducendo piccolissime perdite di carico e dispersioni termiche [34].

Una descrizione completa del ciclo ad assorbimento e del processo di dimensionamento degli impianti operanti secondo tale ciclo è riportata in appendice B; nel prosieguo del paragrafo saranno evidenziati i passaggi principali ed i principali risultati ottenuti.

La potenza termica della sezione refrigerante della nave caso di studio è pari a 414 kW, mentre la potenzialità del singolo inceneritore è di 1800 kW. L'allegato VI della MARPOL [11] stabilisce che la temperatura dei fumi in uscita dalla camera di combustione deve essere compresa fra gli 850 °C ed i 1200 °C; la temperatura all'interno del magazzino frigorifero invece sarà fissata in via cautelativa pari a 0 °C. Questo valore permette di fissare la temperatura media del fluido che andrà a sottrarre calore dal deposito e di conseguenza il salto termico che avverrà fra i -8 °C ed i -3 °C. Il calore specifico della miscela acqua-glicole al 30% in questo campo di temperature può essere considerato pari a 3650 J/kgK [35]. Sfruttando questi valori è possibile stimare la portata di fluido necessaria:

$$\dot{m}_{w,gl} = \frac{414 \cdot 10^3}{3650 \cdot 5} \simeq 22,7 \frac{kg}{s} \simeq 78 \frac{m^3}{h} \quad (3.1)$$

Nell'equazione 3.1 la massa volumica della miscela è stata considerata pari a 1047 kg/m³. Il dimensionamento prosegue valutando le condizioni che devono essere ottenute all'interno dell'evaporatore. Ipotizzando una temperatura d'esercizio non superiore a -15 °C, la figura 3.7 mostra il digramma pressione-entalpia dell'ammoniaca evidenziando le pressioni di funzionamento all'interno dell'evaporatore e del condensatore..

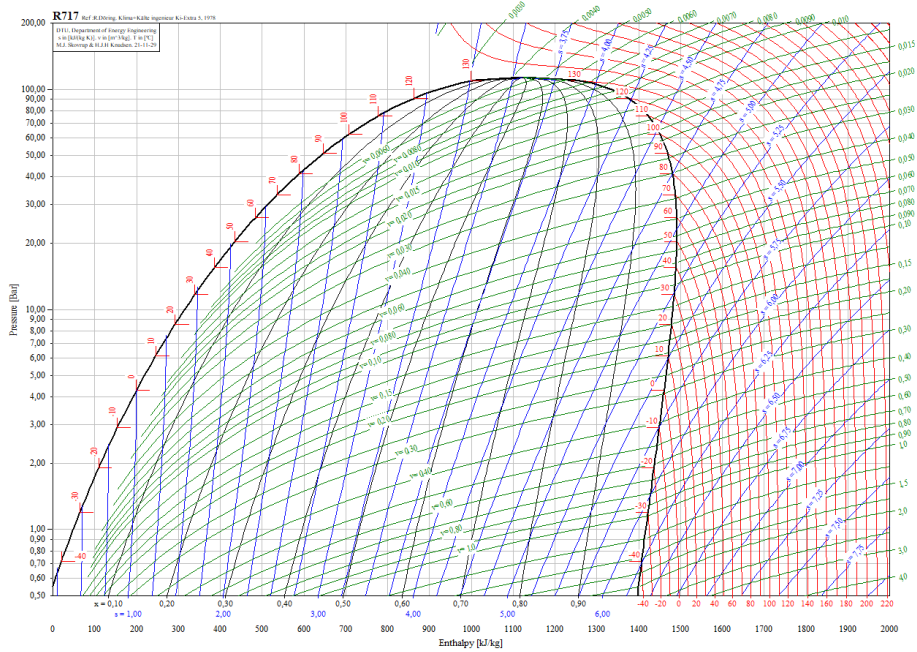


Figura 3.7: Diagramma (p,H) dell'ammoniaca [36]

La pressione di evaporazione corrispondente alle condizioni individuate è pari a 236 kPa [36]. Il calore che deve essere smaltito dal condensatore verrà assorbito da una miscela acqua-glicole per essere infine scambiato con l'acqua di mare. La temperatura di quest'ultima imporrà quindi i limiti per la valutazione delle condizioni operative di questa parte del sistema. Ipotizzando sempre il medesimo salto termico all'interno degli scambiatori, pari a 5 °C, ed una temperatura dell'acqua pari a 35 °C [37] (valore cautelativo, rappresentate dei massimi livelli riscontrabili) si può valutare il range di temperature operative per la miscela, ovvero fra i 40 °C ed i 45 °C. Questo intervallo stabilisce il calore specifico pari 3925 J/kgK ed impone la temperatura minima all'interno del condensatore, che dovrà essere superiore a 50 °C. Questa temperatura a sua volta fissa la pressione di esercizio, pari a 2030 kPa. Per il prosieguo del dimensionamento si ipotizza all'uscita del condensatore il raggiungimento dello stato di liquido saturo e quindi con una entalpia specifica pari a 435 kJ/kg ed un titolo di 0,23. Analogamente all'uscita dell'evaporatore si avrà un titolo pari ad 1, mentre l'entalpia specifica sarà di 1443 kJ/kg. Questi valori consentono il calcolo dell'energia specifica scambiata, pari a 1008 kJ/kg con la quale valutare la portata d'ammoniaca necessaria:

$$\dot{m}_N H3 = \frac{414}{1008} \simeq 0,43 \frac{kg}{s} \simeq 2,34 \frac{m^3}{h} \quad (3.2)$$

con il volume specifico pari a $1,5184 \text{ dm}^3/\text{kg}$.

La conoscenza dei parametri fin qui calcolati porta all'identificazione delle concentrazioni della soluzione di acqua e ammoniaca all'interno dell'assorbitore e del generatore. A tal fine possono essere utilizzati diagrammi, come quello riportato in figura 3.8 [38], oppure delle relazioni matematiche come quelle proposte da Pátek e Klomfar [39] e che sono state utilizzate in questa ricerca, implementandole nei codici riportato in appendice A.

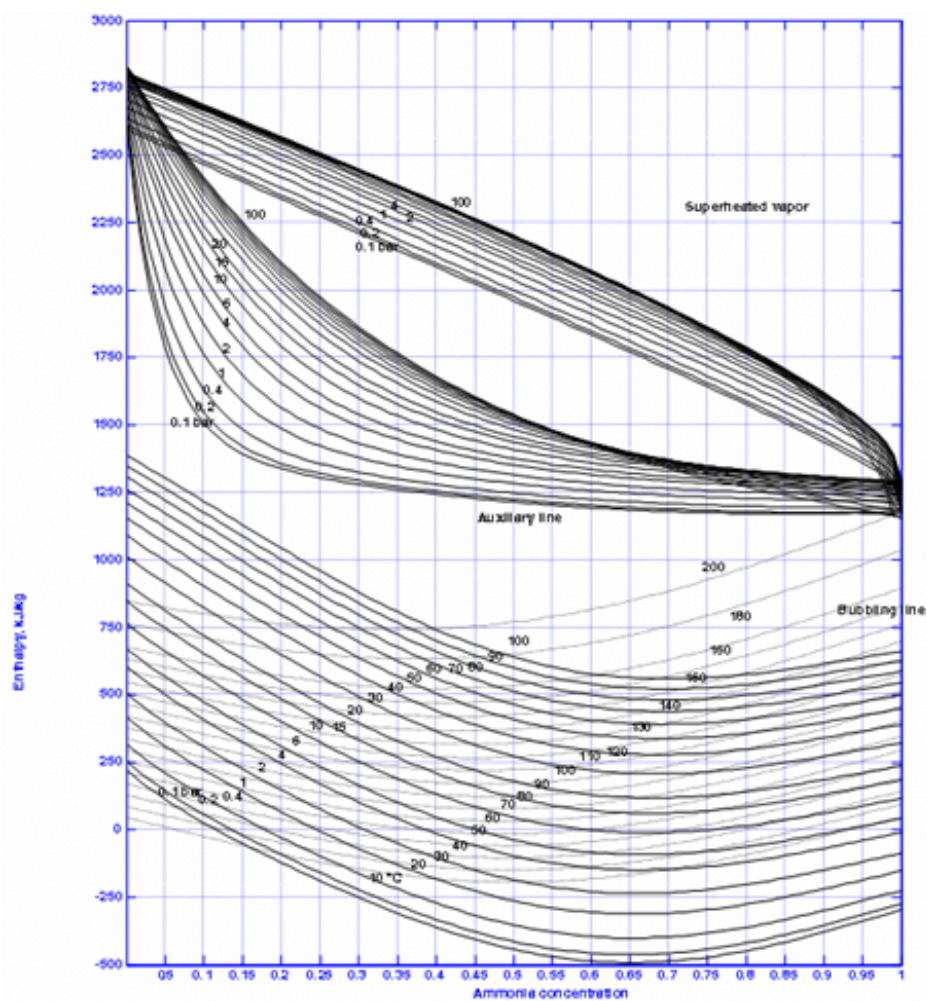


Figura 3.8: Digramma entalpia-concentrazione della soluzione acqua-ammoniaca

Sfruttando gli algoritmi realizzati si sono individuate le proprietà termodinamiche corrispondenti ai diversi punti del ciclo. La concentrazione della soluzione ricca di ammoniaca, ovvero quella all'interno dell'assorbitore, biso-

gna valutare la temperatura al suo interno, che sarà controllata come quella del condensatore e quindi pari a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$; pertanto la concentrazione *ricca* sarà uguale a 0,32. La temperatura all'interno del generatore invece sarà regolata tramite l'impianto aa acqua surriscaldata che preleverà l'energia necessaria dai fumi dell'inceneritore. Sfruttando come salto termico quello fra $155\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $145\text{ }^{\circ}\text{C}$ è possibile considerare la temperatura all'interno del generatore di $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, corrispondente ad una concentrazione di 0,24. La figura 3.9 riporta l'andamento dell'entalpia in funzione della concentrazione di ammoniaca all'interno della soluzione, per i due valori di pressione operanti nel ciclo considerato: in rosso pari a 2030 kPa ed in blu a 236 kPa. All'ingresso dell'assorbitore si avranno due flussi: uno con titolo unitario, rappresentato dal punto 1 ed uno con la concentrazione bassa, rappresentato dal punto 2. La conoscenza della concentrazione ricca desiderata in uscita (punto 3), permette di calcolare la portata di soluzione povera di ammoniaca necessaria per unità di vapore saturo (tabella 3.2).

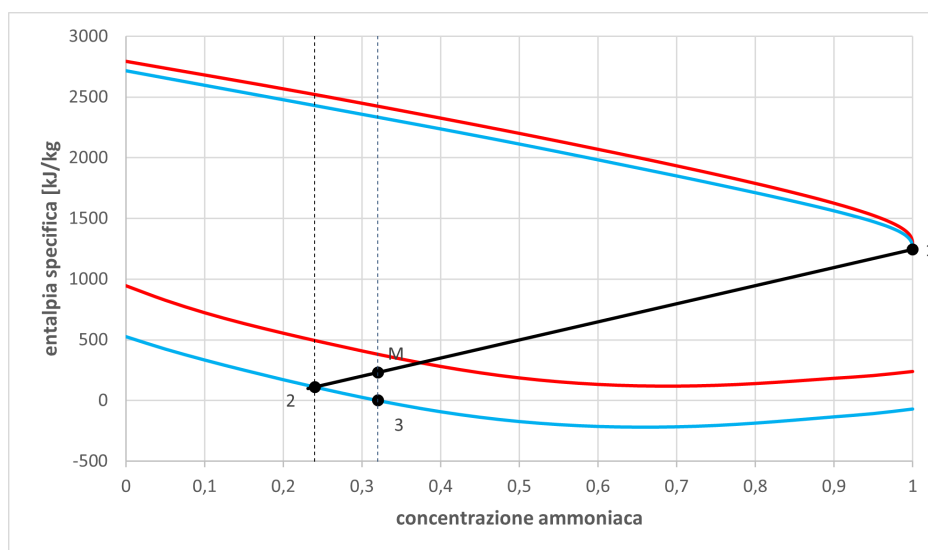


Figura 3.9: Valori di entalpia delle soluzioni nell'assorbitore

PUNTO	c	h [kJ/kg]
1	1	1244,4
2	0,24	110,3
M	0,32	229,7
3	0,32	-0,5
4	0,32	106,9
6	0,24	495,3
7	0,79	1806,9
8	1	1288,0
N	0,79	1070,0

Tabella 3.2: Entalpia e concentrazioni nell'assorbitore

Analogamente è possibile valutare le proprietà relative al generatore ed allo scambiatore di recupero, come esposte in tabella 3.2, grazie al diagramma di figura 3.10, dove il unto N rappresenta quello che si avrebbe se i fluidi entrati ed uscenti si mescolassero.

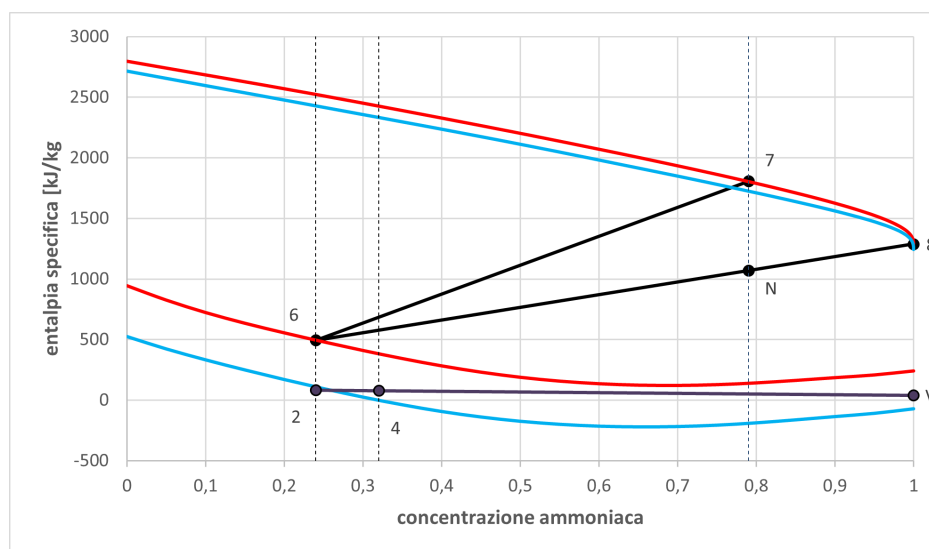


Figura 3.10: Valori di entalpia delle soluzioni nel generatore e nello scambiatore di recupero

Il processo di dimensionamento porta all'individuazione delle principali potenze scambiate, come riportato in tabella 3.3 dove sono state confrontate con quelle fornite da una ditta specializzata nella realizzazione di impianti ad assorbimento. Il paragone conferma la bontà del procedimento adottato, permettendo di considerare affidabili i risultati ottenuti, quanto meno per

Parametro	Valore			Significato
	teorico	azienda		
q_g	976	880	kW	Potenza termica richiesta dal generatore
$q_a + q_{cond}$	1417	1315	kW	Potenza da dissipare in mare
q_{ev}	440	414	kW	Potenza frigorifera scambiata all'evaporatore
COP	0,45	0,47		Coefficiente di prestazione

Tabella 3.3: Principali potenze scambiate dall'impianto ad assorbimento

Fattore d'utilizzazione	Risparmio di carburante		Mancate emissioni di CO_2	
	kg/h		kg/giorno	kg/anno (305 giorni)
25%	10,25		348	106035
50%	20,50		695	212070
75%	30,75		1043	318104

Tabella 3.4: Risparmi ottenibili con l'impianto ad assorbimento

una fase iniziale di valutazione delle prestazioni e del rapporto costo/benefici della soluzione proposta. Inoltre, la stessa ditta ha permesso di stimare l'ingombro di un impianto con questa potenzialità, che può essere contenuto in uno spazio corrispondente ad un parallelepipedo di lati lunghi 6 m, 2,5 m e 6 m, che a sua volta può sostituire uno dei due inceneritori installati, non richiedendo quindi nuovi spazi e permettendo l'installazione su navi già operative.

L'implementazione dell'impianto ad assorbimento permette, quando l'inceneritore è in funzione, di controllare la temperatura del deposito frigorifero senza l'intervento dell'impianto a compressione di vapore. In ogni caso, l'impianto di raffreddamento non opera in continuazione, entrando in funzione solamente quando la temperatura all'interno dell'ambiente controllato esce dai parametri desiderati. Per questo motivo, non potendo reperire dati reali sui tempi di funzionamento di tale impianto si sono ipotizzate tre percentuali di attivazione, rispettivamente del 25%, 50% e 75% per stimare i risparmi conseguenti all'adozione del nuovo approccio, come riportato in tabella 3.4.

Capitolo 4

Conclusione

La crescente attenzione alle tematiche ambientali che inizialmente ha coinvolto le attività terrestri, negli ultimi anni ha iniziato ad interessare sempre di più anche il settore navale. Il controllo delle emissioni provenienti dai motori principali si accompagna all'utilizzo di combustibili sempre più pregiati oltre che alla ricerca di efficienze sempre maggiori, sinonimo di riduzione delle emissioni di CO_2 . Ma le navi da crociera comportano anche un altro tipo di inquinamento, legato a tutte le tipologie di rifiuti derivanti dalle attività ricettive a bordo di veri e propri villaggi galleggianti. Un approccio integrato alla gestione di tutta la filiera di questi rifiuti può sfociare in una maggior sostenibilità, grazie a diversi fattori:

1. la riduzione dell'utilizzo della carta
2. lo sfruttamento del vetro con vuoto a rendere
3. la gassificazione dei rifiuti a base di cellulosa
4. lo sfruttamento dell'energia dei fumi dell'impianto di incenerimento per l'alimentazione degli impianti frigoriferi

Le strategie sopra esposte possono essere applicate separatamente o simultaneamente, anche con integrazioni successive. Le soluzioni che prevedono nuove installazioni impiantistiche sono state concepite per poter essere applicate senza dover individuare nuovi spazi da dedicarvi. Esse infatti trovano posto in sostituzione di elementi preesistenti nei locali adibiti al trattamento ed allo smaltimento dei rifiuti. Questa scelta progettuale è motivata dalla ricerca di favorire una più facile transizione verso la gestione *green* del problema. Per valutare l'impatto ambientale si possono ipotizzare diversi scenari che prevedano l'applicazione delle soluzioni proposte in varia misura. Per tutti è prevista la riduzione del consumo di carta come esposto e l'utilizzo

del vuoto a rendere per quanto riguarda le bottiglie di vetro. In aggiunta a queste pratiche nello *Scenario 1* è previsto solo lo sfruttamento dei fumi dell'inceneritore per l'alimentazione dell'impianto di refrigerazione. Lo *Scenario 2* prevede anche la produzione di syngas, dedicando a tale impianto tutti i rifiuti il cui smaltimento tramite l'inceneritore fornirebbe una potenza non sfruttabile dall'impianto ad assorbimento. L'ultima ipotesi (*Scenario 3*) prevede invece lo sfruttamento di tutti i rifiuti idonei per la produzione di syngas. La figura 4.1 riporta i risultati ottenibili per la nave modello, nell'ipotesi di 305 giorni di navigazione all'anno.

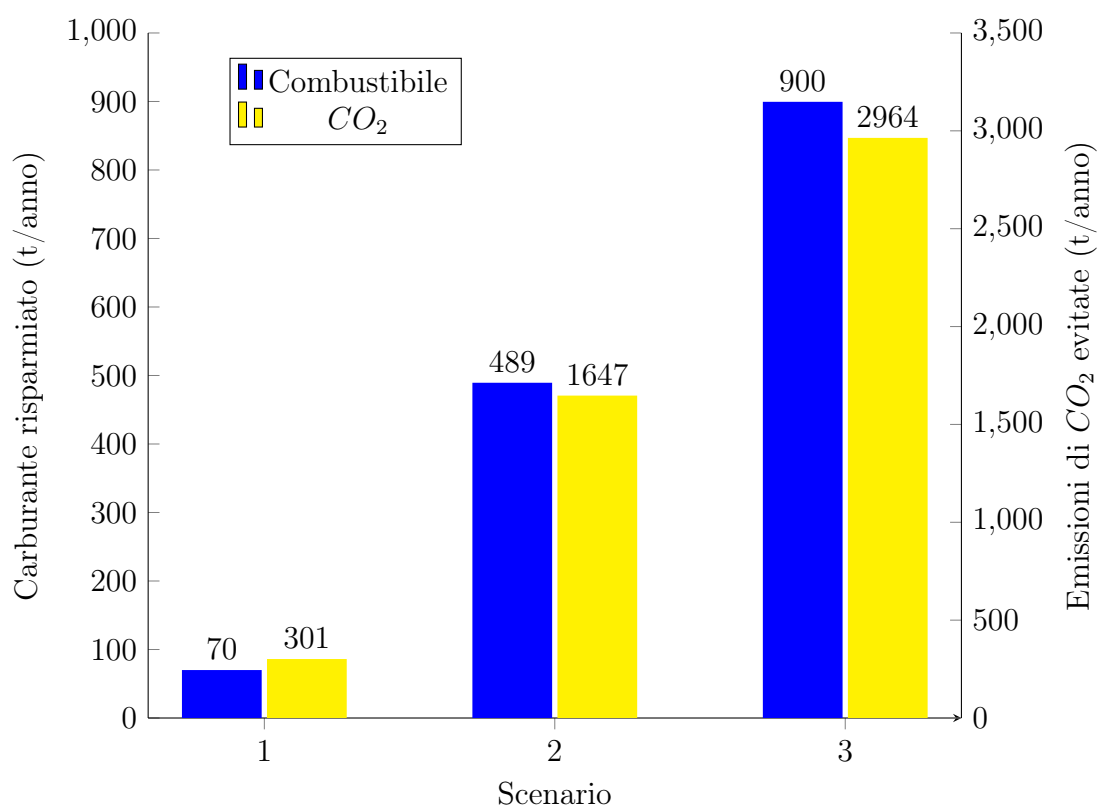


Figura 4.1: Risparmio di carburante e riduzione delle emissioni di CO_2

L'impatto economico dei tre diversi scenari è legato da un lato al ridotto consumo di carta e dall'altro ai risparmi conseguenti al non utilizzo del combustibile tradizionale.

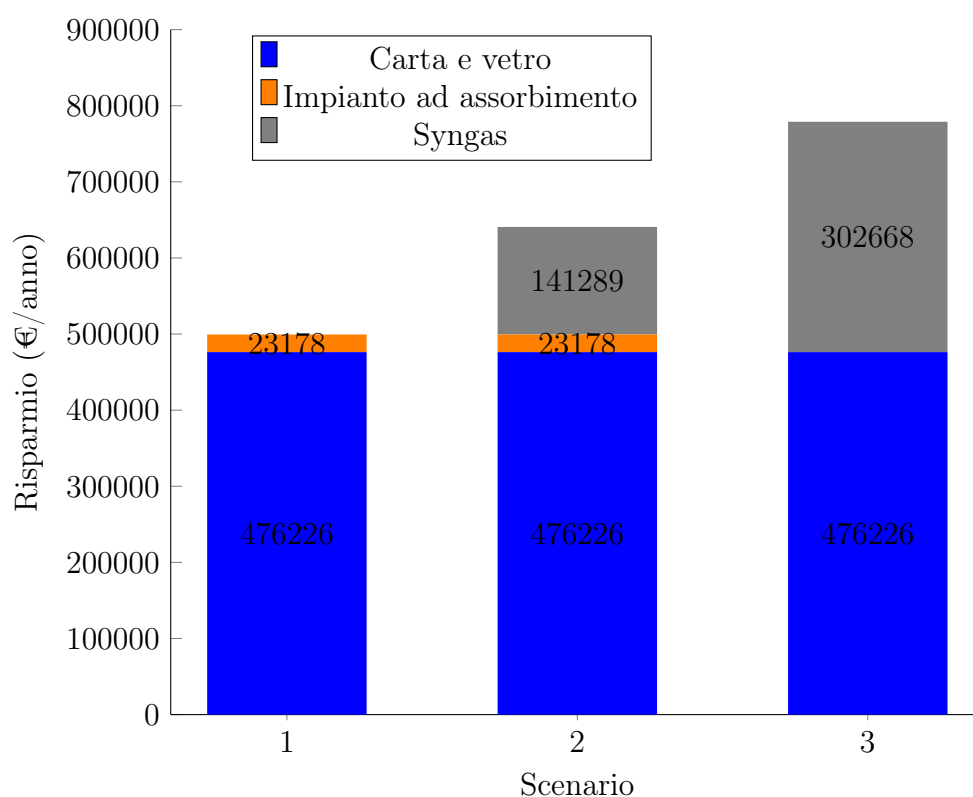


Figura 4.2: Risparmio economico derivante dalle soluzioni proposte

I valori esposti in figura 4.2 rappresentano la prima approssimazione utilizzabile per valutare il rendimento di un eventuale investimento indirizzato alla realizzazione delle soluzioni individuate. I fattori che possono influire su tali scelte non sono soltanto quelli economici "diretti", infatti già adesso alcuni armatori stanno sfruttando da un punto di vista pubblicitario di immagine alcune scelte indirizzate verso un approccio più sostenibile delle loro crociere con ricadute che in questa sede sono difficilmente calcolabili.

Inoltre, il lavoro svolto fino ad adesso rappresenta soltanto una fase del percorso verso uno sfruttamento sempre più sostenibile delle risorse anche nel settore crocieristico: ulteriori miglioramenti potranno essere raggiunti ad esempio con lo sfruttamento di impianti ad assorbimento più evoluti, in grado di alimentare entrambi i livelli di temperatura richiesti per la conservazione degli alimenti, mentre il ricorso al syngas potrebbe trovare diverse applicazioni oltre all'alimentazione dei motori principali, magari con lo sfruttamento di celle a combustibile dedicate a particolari impianti di bordo.

Appendici

Appendice A

Listati dei codici

A.1 Acqua-Ammoniaca.py

```
# -*- coding: utf-8 -*-

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

x = np.arange(0, 1, .01)
p = np.arange(.1, 3, .2)

T10 = 100 # K
p10 = 2 # MPa
mli = [0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 2, 4, 5, 5, 6,
        13]
nli = [0, 1, 2, 3, 4, 0, 1, 2, 3, 0, 0, 1, 0,
        1]
ali = [3.22302, -0.384206, 0.0460965,
        -0.00378945, 0.00013561, 0.487755,
        -0.120108, 0.0106154, -0.000533589, 7.85041,
        -11.5941, -0.052315,
        4.89596, 0.0421059]

TEMP1 = []
for jj in range(0, len(p)):
    TEMP1.append([])
```

```

for j in range(0, len(x)):
TEMP1[jj].append(0)
for indice in range(0, len(a1i)):
TEMP1[jj][j]=TEMP1[jj][j] + a1i[indice]*(1-x[j
    ])**m1i[indice]*\
(np.log(p10/p[jj])**n1i[indice])
TEMP1 = np.array(TEMP1)
TEMP1 = T10 * TEMP1

p30 = 2
m3i = [0,0,0,0,1,2,2,3,4,5,6,7,7,8]
n3i = [0,1,6,7,0,1,2,2,3,4,5,6,7,7]
a3i = [19.8022017, -11.8092669, 27.747998,
    -28.8634277, -59.1616608, 578.091305,
    -6.21736743, -3421.98402, 11940.3127,
    -24541.3777, 29159.1865, -18478.229,
    23.4819434, 4803.10617]

#y = []
#yy = []
#for jj in range(0, len(p)):
#    y.append([])
#    for j in range(0, len(x)):
#        y[jj].append(0)
#        for indice in range(0, len(a3i)):
#            y[jj][j]=y[jj][j]+a3i[indice]*(p[
jj]/p30)**m3i[indice]*\
#                x[j]**(n3i[indice]/3)
#        provv = np.array(y[jj])
#        yy.append([])
#        yy[jj]=1-np.exp(1-x)*provv

T20 = 100
p20 = 2
m2i = [0,0,0,0,1,1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,7]
n2i = [0,1,2,3,0,1,2,0,1,0,1,0,2,0,2,0,2]
a2i = [3.24004, -0.39592, 0.0435624,
    -0.00218943, -1.43526, 1.05256, -0.0719281,
    12.2362, -2.24368, -20.178, 1.10834, 14.5399,
    0.644312, -2.21246, -0.756266,

```

```

-1.35529, 0.183541]

m4i = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1,1,2,3,5,5,5,6,6,8]
n4i = [1, 4, 8, 9, 12,14,0,1,1,3,3,4,5,2,4,0]
a4i = [-7.61080, 25.6905, -247.092, 325.952,
        158.854, 61.9084, 11.4314, 1.18157,
        2.84179, 7.41609, 891.844, 1613.09, 622.106,
        207.588, 6.87393, 3.50716]

h40 = 100 # kJ/kg
T40 = 273.16 # K

#Ma = 17.03026
#Mw = 18.015268
#y = np.arange(0, 1, .1)
#
#w = (y*Ma) / (y*Ma + (1 - y)*Mw)
#
#
#
#
hl = []
for j in range(0, len(x)):
hl.append(0)
for indice in range (0, len(a4i)):
hl[j]=hl[j] + a4i[indice]*\
(TEMP1[2][j]/T40-1)**m4i[indice]*x[j]**n4i[
    indice]

hl=np.array(hl)
hl=h40 * hl
print (TEMP1)

plt.figure()
plt.plot(x,hl)
#plt.plot(x,somma1[1])
#plt.plot(x,somma1[2])
plt.show()

```

A.2 Acqua-Ammoniaca-H_liquid.py

```

# -*- coding: utf-8 -*-

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

x = [0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8,
      0.9, 1.0]
mi = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1,1,2,3,5,5,5,6,6,8]
ni = [1, 4, 8, 9, 12,14,0,1,1,3,3,4,5,2,4,0]
ai = [-7.61080, 25.6905, -247.092, 325.952,
      158.854, 61.9084, 11.4314, 1.18157,
      2.84179, 7.41609, 891.844, 1613.09, 622.106,
      207.588, 6.87393, 3.50716]

h0 = 100
T0 = 273.16
t = np.array([-15.0,100.0,145.0])
T = T0 + t

somma1 = []
for jj in range(0, len(T)):
    somma1.append([])
    for j in range(0, len(x)):
        somma1[jj].append(0)
    for indice in range(0, len(ai)):
        somma1[jj][j]=somma1[jj][j] + ai[indice]*(T[jj
            ]/T0-1)**mi[indice]*x[j]**ni[indice]

#somma2=np.array(somma1)

print (somma1)
plt.figure()
plt.plot(x,somma1[0])
plt.plot(x,somma1[1])
plt.plot(x,somma1[2])
plt.show()

```

A.3 Acqua-Ammoniaca-H_vapor.py

```

# -*- coding: utf-8 -*-

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

x = np.arange(0, 1.01, .05)
p = 2.0331 # MPa

# Temperatura di ebollizione
T0 = 100 # K
p0 = 2 # MPa
mi = [0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 2, 4, 5, 5, 6,
      13]
ni = [0, 1, 2, 3, 4, 0, 1, 2, 3, 0, 0, 1, 0, 1]
ai = [3.22302, -0.384206, 0.0460965,
      -0.00378945, 0.00013561, 0.487755,
      -0.120108, 0.0106154, -0.000533589, 7.85041,
      -11.5941, -0.052315,
      4.89596, 0.0421059]
Tb = []
for c in x:
    somma = 0
    for i in range(0, len(ai)):
        somma = somma + ai[i]*(1-c)**mi[i]*(np.log(p0/p
            ))**ni[i]
    Tb.append(T0 * somma)

# Frazione molare in gas
p0 = 2 # MPa
mi = [0, 0, 0, 0, 1, 2, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 7, 8]
ni = [0, 1, 6, 7, 0, 1, 2, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 7]
ai = [19.8022017, -11.8092669, 27.747998,
      -28.8634277, -59.1616608, 578.091305,
      -6.21736743, -3421.98402, 11940.3127,
      -24541.3777, 29159.1865, -18478.229,
      23.4819434, 4803.10617]
y = []
for c in x:

```

```

somma = 0
for i in range(0, len(ai)):
somma = somma + ai[i]*(p/p0)**mi[i]*c**(ni[i]
    ]/3)
y.append(1 - np.exp(np.log(1-c)*somma))

# Temperatura di rugiada
T0 = 100 # K
p0 = 2 # MPa
mi = [0,0,0,0,1,1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,7]
ni = [0,1,2,3,0,1,2,0,1,0,1,0,2,0,2,0,2]
ai = [3.24004, -0.39592, 0.0435624,
    -0.00218943, -1.43526, 1.05256, -0.0719281,
    12.2362, -2.24368, -20.178, 1.10834, 14.5399,
    0.644312, -2.21246, -0.756266,
    -1.35529, 0.183541]
Td = []
for c in y:
somma = 0
for i in range(0, len(ai)):
somma = somma + ai[i]*(1-c)**(mi[i]/4)*(np.log(
    p0/p))**ni[i]
Td.append(T0*somma)

# Entalpia vapore
h0 = 1000 # kJ/kj
T0 = 324 # K
mi = [0,1,2,3,0,1,2,3,0,1,2,0,1,0,4,2,1]
ni = [0,0,0,0,2,2,2,2,3,3,3,4,4,5,6,7,10]
ai = [1.28827, 0.125247, -2.08748, 2.17696,
    2.35687, -8.86987, 10.2635,
    -2.37440, -6.70155, 16.4508, -9.36849, 8.42254,
    -8.58807, -2.77049,
    -0.961248, 0.988009, 0.308482]
hv = []
for i in range(0, len(y)):
somma = 0
for ii in range(0, len(ai)):
somma = somma + ai[ii]*(1-Td[i]/T0)**mi[ii]*(1-
    y[i])**ni[ii]/4)
hv.append(h0*somma)

```



```

# Entalpia liquido
h0 = 100 # kJ/kj
T0 = 273.16 # K
mi = [0,0,0,0,0,0,1,1,2,3,5,5,5,6,6,8]
ni = [1,4,8,9,12,14,0,1,1,3,3,4,5,2,4,0]
ai = [-7.61080, 25.6905, -247.092, 325.952,
      -158.854, 61.9084, 11.4314, 1.18157,
      2.84179, 7.41609, 891.844, -1613.09, 622.106,
      -207.588, -6.87393, 3.50716]
hl = []
for i in range(0, len(x)):
somma = 0
for ii in range(0, len(ai)):
somma = somma + ai[ii]*(Tb[i]/T0-1)**mi[ii]*x[i]
      **ni[ii]
hl.append(h0*somma)

plt.plot(x,hv,y,hv,x,hl)

```

A.4 Acqua-Ammoniaca-II_STUDIO.py

```

# -*- coding: utf-8 -*-

import numpy as np

# Entalpia liquido
R = 8.314
Tb = 100 # K
Pb = 10 # bar
hro = np.array([4.878573, 21.821141])
Tro = np.array([3.2252, 5.0705])
Pro = np.array([2.000, 3.000])

T = -2.08 + 273.15
p = 4.0

Tr = T / Tro
Pr = p / Pro

```

```

A1 = np.array([.03971423, .02748796])
A2 = np.array([-0.00001790557, -0.00001016665])
A3 = np.array([-0.01308905, -0.004452025])
A4 = np.array([.003752836, .0008389246])
B1 = np.array([16.34519, 12.14557])
B2 = np.array([-6.508119, -1.898065])
B3 = np.array([1.448937, .02911966])

E1 = -41.733398
E2 = 0.02414
E3 = 6.702285
E4 = -0.011475
E5 = 63.608967
E6 = -62.490768
E7 = 1.761064
E8 = 0.008626
E9 = 0.387983
E10 = 0.004772
E11 = -4.648107
E12 = 0.836376
E13 = -3.553627
E14 = 0.000904
E15 = 21.361723
E16 = -20.736547

h = -R * Tb * (-hro + B1 * (Tro - Tr) + B2 / 2
    * (Tro**2 - Tr**2) \
+ B3 / 3 * (Tro**3 - Tr**3) \
+ (A4 * Tr**2 - A1) * (Pr - Pro) \
- A2 / 2 * (Pr**2 - Pro**2))

c = np.arange(0, 1, .1)

hl = []
for x in range(0, len(c)):
    he = -R * Tb * (1-x) * (-E1 - E2*Pr - 2*E5/Tr -
        3*E6/Tr**2 \
+ (2*x - 1)*(-E7 - E8*Pr - 2*E11/Tr - 3*E12/Tr

```

```

        **2) \
+ (2*x-1)**2*(-E13 - E14*Pr -2*E15/Tr - 3*E16/
        Tr**2))
hl.append(x*h[0]+(1-x)*h[1]+he[0])

print(hl)
## Entalpia vapore saturo
#R = 8.314
#Tb = 100 # K
#Pb = 10 # bar
#hrov = np.array([26.468879, 60.965058])
#Tro = np.array([3.2252, 5.0705])
#Pro = np.array([2.000, 3.000])
#
#C1 = np.array([-0.01049377, 0.02136131])
#C2 = np.array([-8.288224, -31.69291])
#C3 = np.array([-664.7257, -46346.11])
#C4 = np.array([-3045.352, 0.0])
#
#D1 = np.array([3.673647, 4.019170])
#D2 = np.array([0.09989629, -0.05175550])
#D3 = np.array([0.03617622, 0.01951939])
#
##T = np.array(2 * [55 + 273])
#T = Td # K
##P = np.array(2 * [p])
#P = p * 10 # bar
#Tr = np.array([T / Tro[0], T / Tro[1]])
##Tr.append(np.array(T / Tro[0]))
##Tr.append(np.array(T / Tro[1]))
#Tr = Tr.transpose()
#Pr = P / Pro
#
#hv = []
#for i in range(0, len(y)):
#    h = -R*Tb*(-hrov + D1*Tro \
#            + D2 / 2 * (Tr[i]**2 + Tro**2)
#            \
#            + D3 / 3 * (2*Tr[i]**3+Tro**3)
#            \

```

```

#           - D1 * Tr[i] \
#           - D2 * Tr[i]**2 \
#           - D3 / 2 * (Tr[i]**2+Tro**2) \
#           - C1 * (Pr-Pro) \
#           + C2 * (-4*(Pr/Tr[i]**3)+4*(Pro
# /Tro**3)) \
#           + C3 * (-12*(Pr/Tr[i]**11)+12*(
# Pro/Tro**11)) \
#           * C4 / 3 * (-12*(Pr**3/Tr[i
# ]**11)+12*(Pro**3/Tro**11))
#     hv.append(h)
#
###hav = -R*Tb*(-hrov + D1*Tro + D2/2*(Tr**2+Tro
# **2) + D3/3*(2*Tr**3+Tro**3)+\
### -D1*Tr - D2*Tr**2 - D3/2*(Tr**2+
# Tro**2) - C1*(Pr-Pro)+\
### C2*(-(4*Pr/Tr**3)+(4*Pro/Tro**3)
# ) +\
### C3*((-12*Pr/Tr**11)+(12*Pro/Tro
# **11))+\
### C4/4*((-12*Pr**3/Tr**11)+(12*Pro
# **3/Tro**11))
#
#
#h = []
#
#for i in range(0, len(y)):
#     h.append(y[i] * hv[i][0] + (1 - y[i]) * hv
# [i][1])
#plt.plot(x, h)

```

A.5 Acqua-Ammoniaca-ricerca valori.py

```

# -*- coding: utf-8 -*-

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

def fraz_mol_gas(p, c):

```

```

# Frazione molare in gas
p0 = 2 # MPa
mi = [0,0,0,0,1,2,2,3,4,5,6,7,7,8]
ni = [0,1,6,7,0,1,2,2,3,4,5,6,7,7]
ai = [19.8022017, -11.8092669, 27.747998,
      -28.8634277, -59.1616608, 578.091305,
      -6.21736743, -3421.98402, 11940.3127,
      -24541.3777, 29159.1865, -18478.229,
      23.4819434, 4803.10617]
somma = 0
if c == 1:
    y = 1
    return y
for i in range(0, len(ai)):
    somma = somma + ai[i]*(p/p0)**mi[i]*c**(ni[i]
        ]/3)
y=1 - np.exp(np.log(1-c)*somma)
return y

def temp_ebo(p, x):
# Temperatura di ebollizione
T0 = 100 # K
p0 = 2 # MPa
mi = [0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 2, 4, 5, 5, 6,
      13]
ni = [0, 1, 2, 3, 4, 0, 1, 2, 3, 0, 0, 1, 0, 1]
ai = [3.22302, -0.384206, 0.0460965,
      -0.00378945, 0.00013561, 0.487755,
      -0.120108, 0.0106154, -0.000533589, 7.85041,
      -11.5941, -0.052315,
      4.89596, 0.0421059]
somma = 0
for i in range(0, len(ai)):
    somma = somma + ai[i]*(1-x)**mi[i]*(np.log(p0/p
        ))**ni[i]
Tb= T0 * somma
return Tb

def temp_rug(p, y):
# Temperatura di rugiada
T0 = 100 # K

```

```

p0 = 2 # MPa
mi = [0,0,0,0,1,1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,7]
ni = [0,1,2,3,0,1,2,0,1,0,1,0,2,0,2,0,2]
ai = [3.24004, -0.39592, 0.0435624,
      -0.00218943, -1.43526, 1.05256, -0.0719281,
      12.2362, -2.24368, -20.178, 1.10834, 14.5399,
      0.644312, -2.21246, -0.756266,
      -1.35529, 0.183541]
somma = 0
for i in range(0, len(ai)):
somma = somma + ai[i]*(1-y)**(mi[i]/4)*(np.log(
    p0/p))**ni[i]
Td= T0 * somma
return Td

def ent_liq(T, x):
# Entalpia liquido
h0 = 100 # kJ/kj
T0 = 273.16 # K
mi = [0,0,0,0,0,0,1,1,2,3,5,5,5,6,6,8]
ni = [1,4,8,9,12,14,0,1,1,3,3,4,5,2,4,0]
ai = [-7.61080, 25.6905, -247.092, 325.952,
      -158.854, 61.9084, 11.4314, 1.18157,
      2.84179, 7.41609, 891.844, -1613.09, 622.106,
      -207.588, -6.87393, 3.50716]
somma = 0
for ii in range(0, len(ai)):
somma = somma + ai[ii]*(T/T0-1)**mi[ii]*x**ni[
    ii]
h = h0*somma
return h

def ent_vap(T, y):
# Entalpia vapore
h0 = 1000 # kJ/kj
T0 = 324 # K
mi = [0,1,2,3,0,1,2,3,0,1,2,0,1,0,4,2,1]
ni = [0,0,0,0,2,2,2,2,3,3,3,4,4,5,6,7,10]
ai = [1.28827, 0.125247, -2.08748, 2.17696,
      2.35687, -8.86987, 10.2635,
      -2.37440, -6.70155, 16.4508, -9.36849, 8.42254,

```

```

        -8.58807, -2.77049,
        -.961248, .988009, .308482]
somma = 0
for ii in range(0, len(ai)):
somma = somma + ai[ii]*(1-T/T0)**mi[ii]*(1-y)
        *(ni[ii]/4)
h = h0 * somma
return h

#

# DATI INIZIALI
# Evaporatore
# T evaporatore -15 C
p_ass = 0.2362 # MPa
# T raffreddamento acqua-glicole
Tass = 50 + 273.15 # K

# Condensatore
# T condensatore 50 C
p_gen = 2.0331 # MPa
Tgen = 150 + 273.15 # K

# Ricerca concentrazione povera e ricca
T0 = 100 # K
p0 = 2 # MPa
mi = [0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 2, 4, 5, 5, 6,
      13]
ni = [0, 1, 2, 3, 4, 0, 1, 2, 3, 0, 0, 1, 0, 1]
ai = [3.22302, -0.384206, 0.0460965,
      -0.00378945, 0.00013561, 0.487755,
      -0.120108, 0.0106154, -0.000533589, 7.85041,
      -11.5941, -0.052315,
      4.89596, 0.0421059]

# Assorbitore

x = 0
step = .01

```

```
test = False
while not test:
    somma = 0
    for i in range(0, len(ai)):
        somma = somma + ai[i]*(1-x)**mi[i]*(np.log(p0/
            p_ass))**ni[i]
    T = T0 * somma
    if abs(T - Tass) < 1:
        c_ric = x
        test = True
    else:
        x = x + step
        if x > 1:
            print("Valore non trovato")
            test = True

# Generatore

x = 0
step = .01
test = False
while not test:
    somma = 0
    for i in range(0, len(ai)):
        somma = somma + ai[i]*(1-x)**mi[i]*(np.log(p0/
            p_gen))**ni[i]
    T = T0 * somma
    if abs(T - Tgen) < 1:
        c_pov = x
        test = True
    else:
        x = x + step
        if x > 1:
            print("Valore non trovato")
            test = True

print('Concentrazione povera: ', c_pov)
print('Concentrazione ricca: ', c_ric)

# Ricerca punti
mNH3 = 0.438
```



```

# P1
P1 = [1, p_ass]
T1 = temp_rug(P1[1], P1[0])
y1 = fraz_mol_gas(P1[1], P1[0])
h1 = ent_vap(T1, y1)

# P2
P2 = [c_pov, p_ass]
h2 = ent_liq(temp_ebo(P2[1], P2[0]), P2[0])

# P3
P3 = [c_ric, p_ass]
h3 = ent_liq(temp_ebo(P3[1], P3[0]), P3[0])

# M
hM = h2+(h1-h2)/(1-c_pov)*(c_ric-c_pov)

# q_s
q_a = (hM - h3)*(1-c_pov)/(c_ric-c_pov)
P_a = q_a*mNH3

# P6
P6 = [c_pov, p_gen]
T6 = temp_ebo(P6[1], P6[0])
h6 = ent_liq(T6, P6[0])

# P7
# Ricerca punto 7
T0 = 100 # K
p0 = 2 # MPa
mi = [0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 2, 2, 3, 3, 4, 4, 5,
      5, 6, 7]
ni = [0, 1, 2, 3, 0, 1, 2, 0, 1, 0, 1, 0, 2, 0,
      2, 0, 2]
ai = [3.24004, -0.39592, 0.0435624,
      -0.00218943, -1.43526, 1.05256, -0.0719281,
      12.2362, -2.24368, -20.178, 1.10834, 14.5399,
      0.644312, -2.21246, -0.756266,
      -1.35529, 0.183541]

p = p_gen # MPa
Tdet = T6 # K

```

```

x = 0
step = .001
test = False
while not test:
y = fraz_mol_gas(p, x)
somma = 0
for i in range(0, len(ai)):
somma = somma + ai[i]*(1-y)**(mi[i]/4)*(np.log(
    p0/p))**ni[i]
T = T0 * somma
if abs(T - Tdet) < 1:
c_n = y
test = True
else:
x = x + step
if x > 1:
print("Valore non trovato 2")
test = True
h7 = ent_vap(T6, c_n)

# P8
h8 = ent_vap(temp_rug(p_gen,1),1)

# PN
hN = h6 + (h8-h6)/(1-c_pov)*(c_n-c_pov)

# q_s
q_s = (h7 - hN)*(1-c_pov)/(c_n-c_pov)
P_s = q_s*mNH3

# q_r
q_r = (h6-h2)*(1-c_pov)/(c_ric-c_pov)
P_r = q_r*mNH3

# P4
h4 = h3 + q_s/((1-c_pov)/(c_ric-c_pov))

# PV
hV = h2 + (h4-h2)/(c_ric-c_pov)*(1-c_pov)

```

```

# q_g
q_g = (h8-hV)+q_s
P_g = q_g*mNH3

# P9
P9 = [1, p_gen]
h9 = ent_liq(temp_ebo(P9[1], P9[0]), P9[0])

# P5
h5 = h4+(h6-h2)*(1-c_ric)/(1-c_pov)

# q_ev
q_ev = (h1-h9)
P_ev = q_ev*mNH3

# q_cond
q_cond = (h8-h9)
P_cond = q_cond*mNH3

print("q_g: {0:4.2 f} [kJ/kg_refr]    P_g: {1:4.2
      f} kW".format(q_g, P_g))
print("q_cond: {0:4.2 f} [kJ/kg_refr]    P_cond:
      {1:4.2 f} kW".format(q_cond, P_cond))
print("q_ev: {0:4.2 f} [kJ/kg_refr]    P_ev:
      {1:4.2 f} kW".format(q_ev, P_ev))
print("q_a: {0:4.2 f} [kJ/kg_refr]    P_a: {1:4.2
      f} kW".format(q_a, P_a))
print("q_s: {0:4.2 f} [kJ/kg_refr]    P_s: {1:4.2
      f} kW".format(q_s, P_s))
print("COP: {0:1.2 f}".format(q_ev/q_g))

```

A.6 Acqua-Ammoniaca-ricerca calori_FREEZE.py

```

# -*- coding: utf-8 -*-

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

def fraz_mol_gas(p, c):

```

```

# Frazione molare in gas
p0 = 2 # MPa
mi = [0,0,0,0,1,2,2,3,4,5,6,7,7,8]
ni = [0,1,6,7,0,1,2,2,3,4,5,6,7,7]
ai = [19.8022017, -11.8092669, 27.747998,
      -28.8634277, -59.1616608, 578.091305,
      -6.21736743, -3421.98402, 11940.3127,
      -24541.3777, 29159.1865, -18478.229,
      23.4819434, 4803.10617]
somma = 0
if c == 1:
    y = 1
    return y
for i in range(0, len(ai)):
    somma = somma + ai[i]*(p/p0)**mi[i]*c**((ni[i]
        ]/3)
y=1 - np.exp(np.log(1-c)*somma)
return y

def temp_ebo(p, x):
# Temperatura di ebollizione
T0 = 100 # K
p0 = 2 # MPa
mi = [0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 2, 4, 5, 5, 6,
      13]
ni = [0, 1, 2, 3, 4, 0, 1, 2, 3, 0, 0, 1, 0, 1]
ai = [3.22302, -0.384206, 0.0460965,
      -0.00378945, 0.00013561, 0.487755,
      -0.120108, 0.0106154, -0.000533589, 7.85041,
      -11.5941, -0.052315,
      4.89596, 0.0421059]
somma = 0
for i in range(0, len(ai)):
    somma = somma + ai[i]*(1-x)**mi[i]*(np.log(p0/p
        ))**ni[i]
Tb= T0 * somma
return Tb

def temp_rug(p, y):
# Temperatura di rugiada
T0 = 100 # K

```

```

p0 = 2 # MPa
mi = [0,0,0,0,1,1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,7]
ni = [0,1,2,3,0,1,2,0,1,0,1,0,2,0,2,0,2]
ai = [3.24004, -0.39592, 0.0435624,
      -0.00218943, -1.43526, 1.05256, -0.0719281,
      12.2362, -2.24368, -20.178, 1.10834, 14.5399,
      0.644312, -2.21246, -0.756266,
      -1.35529, 0.183541]
somma = 0
for i in range(0, len(ai)):
somma = somma + ai[i]*(1-y)**(mi[i]/4)*(np.log(
    p0/p))**ni[i]
Td= T0 * somma
return Td

def ent_liq(T, x):
# Entalpia liquido
h0 = 100 # kJ/kj
T0 = 273.16 # K
mi = [0,0,0,0,0,0,1,1,2,3,5,5,5,6,6,8]
ni = [1,4,8,9,12,14,0,1,1,3,3,4,5,2,4,0]
ai = [-7.61080, 25.6905, -247.092, 325.952,
      -158.854, 61.9084, 11.4314, 1.18157,
      2.84179, 7.41609, 891.844, -1613.09, 622.106,
      -207.588, -6.87393, 3.50716]
somma = 0
for ii in range(0, len(ai)):
somma = somma + ai[ii]*(T/T0-1)**mi[ii]*x**ni[
    ii]
h = h0*somma
return h

def ent_vap(T, y):
# Entalpia vapore
h0 = 1000 # kJ/kj
T0 = 324 # K
mi = [0,1,2,3,0,1,2,3,0,1,2,0,1,0,4,2,1]
ni = [0,0,0,0,2,2,2,2,3,3,3,4,4,5,6,7,10]
ai = [1.28827, 0.125247, -2.08748, 2.17696,
      2.35687, -8.86987, 10.2635,
      -2.37440, -6.70155, 16.4508, -9.36849, 8.42254,

```

```

        -8.58807, -2.77049,
        -.961248, .988009, .308482]
somma = 0
for ii in range(0, len(ai)):
somma = somma + ai[ii]*(1-T/T0)**mi[ii]*(1-y)
        *(ni[ii]/4)
h = h0 * somma
return h

#
-----

# DATI INIZIALI
# Evaporatore
# T evaporatore -40 C
p_ass = 0.0717 # MPa
# T raffreddamento acqua-glicole
Tass = 50 + 273.15 # K

# Condensatore
# T condensatore 50 C
p_gen = 2.0331 # MPa
Tgen = 175 + 273.15 #150 + 273.15 # K

# Ricerca concentrazione povera e ricca
T0 = 100 # K
p0 = 2 # MPa
mi = [0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 2, 4, 5, 5, 6,
      13]
ni = [0, 1, 2, 3, 4, 0, 1, 2, 3, 0, 0, 1, 0, 1]
ai = [3.22302, -0.384206, 0.0460965,
      -0.00378945, 0.00013561, 0.487755,
      -0.120108, 0.0106154, -0.000533589, 7.85041,
      -11.5941, -0.052315,
      4.89596, 0.0421059]

# Assorbitore

x = 0
step = .01
test = False

```

```

while not test:
    somma = 0
    for i in range(0, len(ai)):
        somma = somma + ai[i]*(1-x)**mi[i]*(np.log(p0/
            p_ass))**ni[i]
    T = T0 * somma
    if abs(T - Tass) < 1:
        c_ric = x
        test = True
    else:
        x = x + step
        if x > 1 :
            print ("Valore non trovato")
            test = True

# Generatore

x = 0
step = .01
test = False
while not test:
    somma = 0
    for i in range(0, len(ai)):
        somma = somma + ai[i]*(1-x)**mi[i]*(np.log(p0/
            p_gen))**ni[i]
    T = T0 * somma
    if abs(T - Tgen) < 1:
        c_pov = x
        test = True
    else:
        x = x + step
        if x > 1 :
            print ("Valore non trovato")
            test = True

print ('Concentrazione povera: ', c_pov)
print ('Concentrazione ricca: ', c_ric)

# Ricerca punti
mNH3 = 95 / 972.43
# P1

```

```

P1 = [1, p_ass]
T1 = temp_rug(P1[1], P1[0])
y1 = fraz_mol_gas(P1[1], P1[0])
h1 = ent_vap(T1, y1)

# P2
P2 = [c_pov, p_ass]
h2 = ent_liq(temp_ebo(P2[1], P2[0]), P2[0])

# P3
P3 = [c_ric, p_ass]
h3 = ent_liq(temp_ebo(P3[1], P3[0]), P3[0])

# M
hM = h2 + (h1 - h2) / (1 - c_pov) * (c_ric - c_pov)

# q_s
q_a = (hM - h3) * (1 - c_pov) / (c_ric - c_pov) * mNH3

# P6
P6 = [c_pov, p_gen]
T6 = temp_ebo(P6[1], P6[0])
h6 = ent_liq(T6, P6[0])

# P7
# Ricerca punto 7
T0 = 100 # K
p0 = 2 # MPa
mi = [0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 2, 2, 3, 3, 4, 4, 5, 5, 6, 7]
ni = [0, 1, 2, 3, 0, 1, 2, 0, 1, 0, 1, 0, 2, 0, 2, 0, 2]
ai = [3.24004, -0.39592, 0.0435624,
      -0.00218943, -1.43526, 1.05256, -0.0719281,
      12.2362, -2.24368, -20.178, 1.10834, 14.5399,
      0.644312, -2.21246, -0.756266,
      -1.35529, 0.183541]

p = p_gen # MPa
Tdet = T6 # K
x = 0
step = .001
test = False
while not test:

```



```

y = fraz_mol_gas(p, x)
somma = 0
for i in range(0, len(ai)):
somma = somma + ai[i]*(1-y)**(mi[i]/4)*(np.log(
    p0/p))**ni[i]
T = T0 * somma
if abs(T - Tdet) < 1:
c_n = y
test = True
else:
x = x + step
if x > 1 :
print ("Valore non trovato 2")
test = True
h7 = ent_vap(T6, c_n)

# P8
h8 = ent_vap(temp_rug(p_gen,1) ,1)

# PN
hN = h6 + (h8-h6)/(1-c_pov)*(c_n-c_pov)

# q_s
q_s = (h7 - hN)*(1-c_pov)/(c_n-c_pov)*mNH3

# q_r
q_r = (h6-h2)*(1-c_pov)/(c_ric-c_pov)*mNH3

# P4
h4 = h3 + q_s/((1-c_pov)/(c_ric-c_pov)*mNH3)
# PV
hV = h2 + (h4-h2)/(c_ric-c_pov)*(1-c_pov)
# q_g
q_g = (h8-hV)*mNH3+q_s

# P9
P9=[1, p_gen]
h9=ent_liq(temp_ebo(P9[1] ,P9[0]) ,P9[0])

# P5
h5 = h4+(h6-h2)*(1-c_ric)/(1-c_pov)

```

```

# q_ev
q_ev = (h1-h9)*mNH3

#q_cond
q_cond = (h8-h9)*mNH3

print('q_a: ', q_a)
print('q_g: ', q_g)
print('q_s: ', q_s)
print('q_ev: ', q_ev)
print('q_cond: ', q_cond)
print('COP: ', q_ev/q_g)

```

A.7 Punto_7.py

```

# -*- coding: utf-8 -*-

import numpy as np

def fraz_mol_gas(p, c):
# Frazione molare in gas
p0 = 2 # MPa
mi =[0,0,0,0,1,2,2,3,4,5,6,7,7,8]
ni =[0,1,6,7,0,1,2,2,3,4,5,6,7,7]
ai =[19.8022017, -11.8092669, 27.747998,
-28.8634277, -59.1616608, 578.091305,
-6.21736743, -3421.98402, 11940.3127,
-24541.3777, 29159.1865, -18478.229,
23.4819434, 4803.10617]
somma = 0
if c == 1:
y = 1
return y
for i in range(0, len(ai)):
somma = somma + ai[i]*(p/p0)**mi[i]*c**(ni[i]
)/3)
y=1 - np.exp(np.log(1-c)*somma)
return y

```

```

# Ricerca punto 7
T0 = 100 # K
p0 = 2 # MPa
mi = [0,0,0,0,1,1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,7]
ni = [0,1,2,3,0,1,2,0,1,0,1,0,2,0,2,0,2]
ai = [3.24004, -0.39592, 0.0435624,
      -0.00218943, -1.43526, 1.05256, -0.0719281,
      12.2362, -2.24368, -20.178, 1.10834, 14.5399,
      0.644312, -2.21246, -0.756266,
      -1.35529, 0.183541]

p = 2.31 # MPa
Tdet = 424 # K
x = 0
step = .01
test = False
while not test:
y = fraz_mol_gas(p, x)
# y = x
somma = 0
for i in range(0, len(ai)):
somma = somma + ai[i]*(1-y)**(mi[i]/4)*(np.log(
    p0/p))**ni[i]
T = T0 * somma
if abs(T - Tdet) < 1:
c = x
test = True
else:
x = x + step
if x > 1 :
print ("Valore non trovato")
test = True

print ('Concentrazione punto 7: ', c, y)

```

Appendice B

Description of the Absorption Refrigeration Cycle (ARC)

B.1 System structure

The proposed ARC system is schematically represented in figure B.1: it exploits water (H_2O) and ammonia (NH_3) as the absorbent (high vapour saturation pressure) and refrigerant fluid (low vapour saturation pressure), respectively. In the following, we will refer to a solution rich in NH_3 as *concentrated* solution.

A concentrated solution in state 2 enters the Generator (GEN). The solution residing in the generator is heated by exchanging heat with the exhaust gases produced in the incinerator: as a consequence, the highly volatile solute (ammonia) evaporates, increasing the concentration of NH_3 within the vapor phase of the mixture in the GEN. The concentrated vapour in state 8 leaves the GEN towards the distillation column (DC), where it is further concentrated. The distillation column must reduce the water content in the vapours produced by the generator to avoid that liquid water accumulates in the evaporator, causing a sensible reduction of the COP [40, 41]. Furthermore, the vaporization temperature increases at higher concentrations of water in the vapour mixture (*temperature glide*): this, in turn, implies that a lower evaporation pressure must be attained to realize the required cooling effect [41]. It is assumed that the refrigerant vapour leaves the DC with an ammonia concentration of 100%: this limiting condition is not significantly far from concentrations obtained with conventional distillation towers (see, e.g., [42]). [43] suggest that an ammonia concentration not lower than 99.9% wt is required for a proper ARC operation. The distillation tower and the generator can be integrated in a single component, as is the case for sieve-

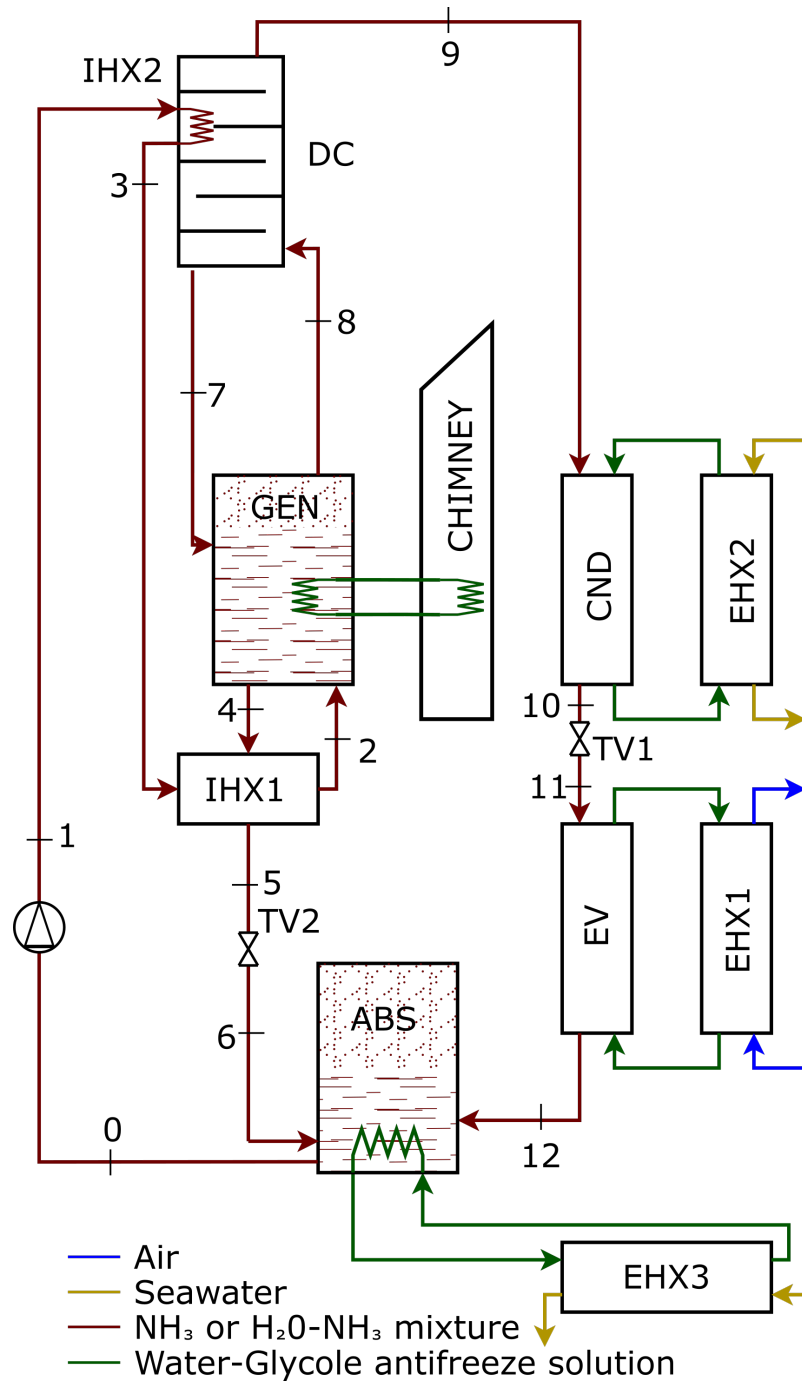


Figura B.1: Schematic representation of the ARC system.

tray DC's [41], where a reservoir of liquid solution at the base of the column acts as generator. The refrigerant vapour leaves the DC in state 9, flowing towards the condenser (CND), where it is condensed to saturation conditions by releasing heat to a stream of water-glycol solution. The condensed ammonia leaves the condenser in state 10 and flows towards the evaporator (EV) passing through a throttling valve (TV1). In flowing through the TV the pressure and the temperature of the refrigerant are reduced to evaporation conditions (state 11) and part of the liquid evaporates. The liquid-vapour mixture of ammonia enters the evaporator in state 11: flowing through the evaporator the refrigerant fluid exchanges heat from a stream of warmer water-glycol solution, which, in turn, subtracts heat from the storage room, realizing the desired *cooling effect*. The intermediate water-glycol heat exchange circuits HEX1 and HEX2 could be eliminated, in principle, reducing the gap between the condensation, absorption and evaporation temperatures. The refrigerant fluid leaves the evaporator as a saturated vapour (state 12) and enters the absorber (ABS), where it is *absorbed* by the water-ammonia mixture therein. Absorption is an exo-thermal process: the excess heat is transferred to a water-glycol mixture and eventually to seawater through the heat exchanger HEX3. The concentrated, liquid solution leaves the absorber in state 0 and is conveyed to the GEN by a pump. Along the way, the concentrated mixture absorbs heat from the DC flowing through the recuperative heat exchanger IHX2 reaching state 3, then passes through the *recuperative* heat exchanger IHX1 (states $3 \rightarrow 2$), where it receives heat from the stream $4 \rightarrow 5$ of lean mixture hailing from the GEN and eventually enters the GEN. Two more streams of mixture interact with the GEN: the flow of highly diluted liquid mixture transferred from the DC to the GEN and the flow of lean liquid mixture leaving the GEN towards IHX1. The latter flow leaves IHX1 in state 5 and successively passes through the throttling valve TV2, where the pressure of the mixture is reduced to the evaporation pressure.

B.2 Assumptions and design parameters

The proposed design strategy of the ARC is based on a set of (quite reasonable) assumptions:

- The system runs under steady-state conditions, and changes in the kinetic and potential energies are ignored.
- The flow is adiabatic through the pump PU and iso-enthalpic through the throttling valves TV1 and TV2.

- The flow through the connecting pipes and through the components of the ARC is free of frictional losses and of the ensuing pressure drops.
- The refrigerants at the EV and COND outlets are at the saturated vapour state and saturated liquid state, respectively. The vapour at the DC outlet contains only ammonia.
- The liquid stream of lean mixture transferred from GEN to ABS enters the ABS in saturated conditions at the evaporation pressure (which is present also in the ABS). Notice that the concentration of NH_3 in the aforementioned stream remains constant as it is transferred (in liquid state) from GEN to ABS.
- Only the liquid phase of the water-ammonia mixture is withdrawn from the ABS and transferred to the GEN.
- Only the vapour phase of the water-ammonia mixture is withdrawn from the GEN and transferred to the DC.
- The stream of condensed water-ammonia mixture leaving the DC is saturated at the (p, T) conditions present in the GEN.
- The inlet temperature of the water-glycol mixture in EHX1 is $t_{s.r.} - 8 \text{ K}$ and $t_{evap} + 7 \text{ K}$, while its temperature is increased by 5 K flowing through EHX1.
- The temperature of seawater, used as a refrigerant in the EHX2 and EHX3 heat exchangers, is raised by 5 K when flowing through this components. The outlet temperature of the water-glycol solution from EHX2 and EHX3 is 5 K above the maximum seawater temperature and its temperature drop is 5 K .
- The hydraulic efficiency of the pump is 0.7 .

The following design parameters are assigned:

- The desired refrigerating power \dot{q}_{EV}^+ , transferred from the cold room to the refrigerant fluid in the evaporator.
- The temperature of the mixture within the generator: t_{GEN} .
- The temperature of the storage room, the temperature difference between the storage room and the water-glycol mixture in the intermediate heat exchange circuit, the temperature difference between the evaporating refrigerant fluid and the water-glycol mixture in the intermediate

heat exchange circuit. Using these input parameters, the evaporation temperature t_{EV} can be derived.

- The seawater temperature, the admissible temperature increase for seawater, the temperature differences between the seawater and the water-glycol mixture in the intermediate heat exchange circuits. Using these input parameters, the condensation temperature t_{COND} and the temperature within the absorber t_{ABS} can be calculated.

B.3 Thermodynamic model

The coefficient of performance (COP) is the most relevant thermodynamic parameter as for the present investigation:

$$\text{COP} := \frac{\dot{q}_{EV}}{\dot{q}_{GEN} + \left| \dot{P}_{PU} \right|} \quad (\text{B.1})$$

In the following, we summarize the balance equations used to design the ARC. To this end, it is convenient to normalize the mass flow rates with the mass flow rate of the refrigerant fluid through the evaporator. We denote by g the normalized mass flow rate of lean mixture flowing from the GEN to the ABS and by p the normalized mass flow rate of lean condensed mixture leaving the DC towards the GEN.

Species and energy balance for the absorber

The normalized species (NH_3) and energy balance for the ABS components are:

$$g w_6 + 1 = (1 + g) w_0 \quad (\text{B.2a})$$

$$\left| \dot{q}_{ABS}^- \right| = g h_6 + h_{12} - (1 + g) h_0 \quad (\text{B.2b})$$

Species and energy balance for the generator

The normalized species (NH_3) and energy balance for the GEN components are:

$$(1 + g) w_3 + p w_7 = (1 + p) w_8 + g w_4 \quad (\text{B.3a})$$

$$(1 + g) h_3 + p h_7 + \dot{q}_{GEN}^+ = g h_4 + (1 + p) h_8 \quad (\text{B.3b})$$

Energy conservation for the evaporator

$$h_{12} - h_{11} = \dot{q}_{evap}^+ \quad (\text{B.4})$$

Energy conservation for the condenser

$$h_9 - h_{10} = \left| \dot{q}_{cond}^- \right| \quad (\text{B.5})$$

Species and energy balance for the distillation tower

The normalized species (NH_3) and energy balance for the DC components are:

$$w_9 + p w_7 = (1 + p) w_8 \quad (\text{B.6a})$$

$$h_9 + p h_7 + (1 + g) (h_3 - h_2) = (1 + p) h_8 \quad (\text{B.6b})$$

The normalized heat removal rate from the DC is:

$$\left| \dot{q}_{DC}^- \right| = (1 + g) (h_3 - h_2) \quad (\text{B.7})$$

Energy conservation for the heat exchanger IHX1

$$(1 + g) (h_2 - h_3) = g (h_4 - h_5) \quad (\text{B.8})$$

B.4 Design process, stage by stage

The thermodynamic properties of the water-ammonia mixture under liquid-vapour equilibrium conditions are estimated using the correlations proposed by [39]. The same correlations are used to calculate the thermodynamic properties of pure ammonia. In the following, the aforementioned correlations are expressed in the form

$$z_p = f(x_q, y_r) \quad (\text{B.9})$$

where the subscripts denote a specific phase of the mixture (either l for liquid or v for vapour), z denotes the dependent thermodynamic variable, x and y denote the independent thermodynamic variables. The molar (x) or mass (w) concentrations quantify the content of NH_3 in the mixture. For instance, the dependence of the specific enthalpy of the liquid phase on the temperature and pressure of the mixture is denoted by

$$h_l = h_l(T, p) \quad (\text{B.10})$$

while the dependence of the specific enthalpy of the vapour phase on the temperature of the mixture and on the mole fraction of NH_3 in the liquid phase is expressed as

$$h_v = h_v(T, x_l) \quad (\text{B.11})$$

The different stages of the design process are detailed below.

1. Evaporation pressure:

$$p_{11} = p_{12} = p(t_{EV}, x_l = 1.0) \quad (\text{B.12})$$

2. The specific enthalpy of the saturated vapour at the exit from the evaporator is

$$h_{12} = h_v(t_{EV}, x_v = 1.0) \quad (\text{B.13})$$

while the specific enthalpy of the saturated liquid phase at the inlet of the evaporator is

$$h_{l,11} = h_l(t_{EV}, x_l = 1.0) \quad (\text{B.14})$$

3. Condensation temperature and pressure:

$$t_9 = t_{10} = t_{COND} \quad (\text{B.15})$$

$$p_{COND} := p_9 = p_{10} = p(t_{COND}, x_l = 1.0) \quad (\text{B.16})$$

4. Specific enthalpy of the refrigerant fluid at the inlet and outlet of the condenser. It is assumed that the distillation tower provides saturated ammonia vapour to the condenser and that the condenser returns saturated ammonia liquid.

$$h_9 = h_v(t_{COND}, x_v = 1.0) \quad (\text{B.17})$$

$$h_{10} = h_l(t_{COND}, x_l = 1.0) \quad (\text{B.18})$$

5. Assuming an isoenthalpic expansion of the refrigerant through the throttling valve TV1, the specific enthalpy of the refrigerant at the inlet of the evaporator is readily computed as:

$$h_{11} = h_{10} \quad (\text{B.19})$$

6. The mass fraction of ammonia vapour at the inlet of the evaporator is calculated by considering that the specific enthalpy of the liquid-vapour mixture of ammonia at conditions 11 is obtained as a weighted sum of the specific enthalpies of each phase:

$$y_{11} = \frac{h_{11} - h_{l,11}}{h_{12} - h_{l,11}} \quad (\text{B.20})$$

7. The mass flow rate of ammonia through the evaporator (and the condenser) is obtained from the energy balance for the evaporator, equation (B.4):

$$\dot{m}_{EV} = \frac{\dot{q}_{EV}^+}{h_{12} - h_{11}} \quad (\text{B.21})$$

8. The heat rejected from the condenser is obtained from the energy balance for the condenser itself, equation (B.5):

$$\left| \dot{q}_{COND}^- \right| = \dot{m}_{EV} (h_9 - h_{10}) \quad (\text{B.22})$$

9. Thermodynamic conditions within the absorber:

- (a) The temperature within the ABS is a design parameter, which must be set considering that the heat rejected from the ABS is transferred to seawater. Thus, a reasonable assumption is to set the temperature within the ABS to be the same as the condensation temperature:

$$t_0 = t_9 = t_{10} \quad (\text{B.23})$$

- (b) The pressure in the ABS equals the evaporation pressure p_{12} , known from (B.12):

$$p_0 = p_6 = p_{12} \quad (\text{B.24})$$

- (c) The concentrations of ammonia in the liquid and in the vapour phases of the water-ammonia mixture in the ABS are calculated as:

$$x_{l,ABS} = x_0 = x_l(p_0, t_0) \quad (\text{B.25})$$

$$x_{v,ABS} = x_v(p_0, t_0) \quad (\text{B.26})$$

while the corresponding mass fractions are readily obtained:

$$w_{l,ABS} = w_0 = \frac{x_{l,ABS} M_{\text{NH}_3}}{M_{\text{H}_2\text{O}} + x_{l,ABS} (M_{\text{NH}_3} - M_{\text{H}_2\text{O}})} \quad (\text{B.27})$$

$$w_{v,ABS} = \frac{x_{v,ABS} M_{\text{NH}_3}}{M_{\text{H}_2\text{O}} + x_{v,ABS} (M_{\text{NH}_3} - M_{\text{H}_2\text{O}})} \quad (\text{B.28})$$

- (d) The specific enthalpy of the liquid and of the vapour phases of the water-ammonia mixture in the ABS are calculated as:

$$h_{l,ABS} = h_0 = h_l(t_0, x_{l,ABS}) \quad (\text{B.29})$$

$$h_{v,ABS} = h_v(t_0, x_{v,ABS}) \quad (\text{B.30})$$

10. Knowledge of the pressure and temperature within the generator allow to calculate other thermodynamic quantities. The same pressure is present within the GEN and the COND (see equation (B.16)). The temperature of the mixture in the GEN is an assigned design data.

- (a) The concentrations of ammonia in the liquid and in the vapour phases of the water-ammonia mixture in the GEN are calculated as:

$$x_{l,GEN} = x_4 = x_l(p_{COND}, t_{GEN}) \quad (B.31)$$

$$x_{v,GEN} = x_v(p_{COND}, t_{GEN}) \quad (B.32)$$

while the corresponding mass fractions are readily obtained:

$$w_{l,GEN} = w_4 = \frac{x_{l,GEN} M_{NH_3}}{M_{H_2O} + x_{l,GEN} (M_{NH_3} - M_{H_2O})} \quad (B.33)$$

$$w_{v,GEN} = \frac{x_{v,GEN} M_{NH_3}}{M_{H_2O} + x_{v,GEN} (M_{NH_3} - M_{H_2O})} \quad (B.34)$$

- (b) The specific enthalpy of the liquid and of the vapour phases of the water-ammonia mixture in the GEN are calculated as:

$$h_{l,GEN} = h_4 = h_l(t_{GEN}, x_{l,GEN}) \quad (B.35)$$

$$h_{v,GEN} = h_v(t_{GEN}, x_{v,GEN}) \quad (B.36)$$

11. The species (NH_3) mass balance for the ABS (equation (B.2a)) allows to calculate the normalized mass flow rate of lean mixture transferred from the GEN to the ABS (using the results (B.27) and (B.33)):

$$g w_4 + 1 = (1 + g) w_0 \implies g = \frac{1 - w_0}{w_0 - w_4} \quad (B.37)$$

The mass-flow rate of mixture transferred from the generator to the absorber can be computed using (B.21) as $\dot{m}_{EV} g$. The mass-flow rate of mixture transferred from the ABS to the GEN is $\dot{m}_{EV} (1 + g)$.

12. The heat removal rate from the absorber is calculated from the corresponding energy balance, equation (B.2b):

$$\left| \dot{q}_{ABS}^- \right| = \dot{m}_{EV} [g h_6 + 1 h_{12} - (1 + g) h_0] \quad (B.38)$$

The specific enthalpies h_0 and h_{12} are given by (B.29) and (B.13), respectively. The specific enthalpy h_6 is still unknown and, in principle,

depends on the sizing the heat exchanger IHX1 and, consequently, on the outlet temperature t_5 from IHX1. As a further simplification, we assume that the lean liquid mixture is brought at saturation conditions at stage 6: as a consequence, all thermodynamic properties of the mixture at this stage can be calculated from the pressure $p_6 = p_{EV}$ and from the molar fraction of NH_3 in the liquid phase of the mixture $x_6 = x_4$, given by (B.31). With this assumption, the heat removal rate from the ABS can be calculated from (B.38) with

$$h_6 = h_l(p_{EV}, x_{l,GEN}) \quad (\text{B.39})$$

The aforementioned simplifying assumption constrains the outlet temperature t_5 from IHX1. This temperature could be computed using a *complete* model for the thermodynamic behaviour of the water-ammonia mixture, as at stage 5 the mixture has the same enthalpy and molar concentration existing at stage 6 (as the flow of the mixture through TV2 is isoenthalpic) while the pressure is $p_5 = p_{COND} > p_{EV}$: the mixture is therefore in sub-cooled liquid conditions and the knowledge of three thermodynamic variables is required for the full characterization of the mixture. Since in this work we use the correlations by [39] for saturation conditions, we can not calculate t_5 .

13. The species mass balance for the distillation tower, equation (B.6a), returns the normalized mass-flow rate of condensate p :

$$p = \frac{1 - w_8}{w_8 - w_7} \quad (\text{B.40})$$

with $w_8 = w_{v,GEN}$ given by (B.34) and $w_7 = w_4 = w_{l,GEN}$ given by (B.33). Equation (B.40) relies on the following assumptions about the operation of the distillation tower:

- (a) Perfect distillation: the vapour leaving the distillation tower from outlet 9 contains only NH_3 .
- (b) The condensed mixture leaving the DC from outlet 7 attains the same temperature of the vapour entering from inlet 8: this is reasonable as the vapour is cooled off at the top of the tower, where the heat exchanger IHX2 is located, and the condensed, lean mixture flows downwards in counter current with respect to the ascending vapour.

The mass flow rate of condensate leaving the DC through the outlet 7 is thus $\dot{m}_{EV} p$. The energy balance (B.6b) returns the required heat

removal rate from the DC:

$$\left| \dot{q}_{DC}^- \right| = \dot{m}_{EV} [(1+p)h_8 - ph_7 - h_9] \quad (\text{B.41})$$

with h_9 given by (B.17), $h_7 = h_4$ given by (B.35) and $h_8 = h_{v,GEN}$ calculated in (B.36).

14. The heat transfer rate to be supplied to the GEN is obtained from the energy balance for the GEN, equation (B.3b), which nevertheless requires to know the enthalpy flux through the inlet 2 of the GEN. To this end, the enthalpy h_2 is calculated by tracking the exchanges of energy of the concentrated mixture from stage 0 to stage 2:

$$h_2 - h_0 = (h_2 - h_3) + (h_3 - h_1) + (h_1 - h_0) \quad (\text{B.42a})$$

From the energy balance for the heat exchanger IHX1 (B.8) (and the throttling valve TV2):

$$h_2 - h_3 = \frac{g}{1+g} (h_4 - h_6) \quad (\text{B.42b})$$

From the energy balance for the heat exchanger IHX2:

$$h_3 - h_1 = \frac{\left| \dot{q}_{DC}^- \right|}{\dot{m}_{EV} (1+g)} \quad (\text{B.42c})$$

Using the definition of the hydraulic efficiency of the pump PU:

$$h_1 - h_0 = \frac{p_{COND} - p_{EV}}{\rho_0 \eta_{PU}} \quad (\text{B.42d})$$

The heat transfer rate to the generator can now be calculated:

$$\dot{q}_{GEN}^+ = \dot{m}_{EV} [gh_4 + (1+p)h_8 - ph_7 - (1+g)h_2] \quad (\text{B.43})$$

The (positive) heat transfer rate in the recuperative heat exchanger IHX1 is given by

$$\dot{q}_{IHX1} = \dot{m}_{EV} g (h_4 - h_6) \quad (\text{B.44})$$

Bibliografia

- [1] *Growth of the Ocean Cruise Line Industry*. 10 Nov. 2021. URL: <https://cruisemarketwatch.com/growth/>.
- [2] Nickie Butt. «The impact of cruise ship generated waste on home ports and ports of call: A study of Southampton». In: *Marine Policy* 31 (5 set. 2007), pp. 591–598. ISSN: 0308597X. DOI: 10.1016/j.marpol.2007.03.002.
- [3] Juliette Commoy et al. «The Environmental Impact of Cruise Ships». In: 2005, pp. 1–12. DOI: 10.1061/40792(173)308.
- [4] Ross A. Klein. «The cruise sector and its environmental impact». In: *Bridging Tourism Theory and Practice* 3 (2010), pp. 113–130. ISSN: 20421443. DOI: 10.1108/S2042-1443(2010)0000003009.
- [5] Oliver G. Krenshaw. *Cruise Ship Pollution*. Nova Science Publishers, Inc., 2009, p. 190. ISBN: 978-160692655-0.
- [6] C Copeland. *Cruise Ship Pollution: Background, Laws and Regulations, and Key Issues*. Nova Science Publishers, Inc., 2011, pp. 155–183. ISBN: 9781616683078 (ISBN).
- [7] Ke Xu. «China’s cruise industry: Progress, challenges and outlook». In: *Maritime Affairs* 12 (1 2016), pp. 38–45. ISSN: 19466609. DOI: 10.1080/09733159.2016.1175129.
- [8] Marjolein C. J. Caniëls, Eugène Cleophas e Janjaap Semeijn. «Implementing green supply chain practices: an empirical investigation in the shipbuilding industry». In: *Maritime Policy & Management* 43 (8 nov. 2016), pp. 1005–1020. ISSN: 0308-8839. DOI: 10.1080/03088839.2016.1182654. URL: <https://doi.org/10.1080/03088839.2016.1182654> <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/03088839.2016.1182654>.
- [9] Ting Liang Guo, Hui Xia Zhang e Hong Juan Dai. «Analysis of green ships design and manufacturing technology». In: vol. 109. 2012, pp. 489–493. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.109.489.

- [10] D. Lu et al. «The important factors for the implementation of green shipbuilding». In: vol. 2. 2009, pp. 999–1022.
- [11] Marine Environment Protection Committee. *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)*. 1997.
- [12] Marine Environment Protection Committee. *RESOLUTION MEPC.220(63). 2012 GUIDELINES FOR THE DEVELOPMENT OF GARBAGE MANAGEMENT PLANS*. 2012.
- [13] *AMENDMENTS TO THE ANNEX OF THE PROTOCOL OF 1997 TO AMEND THE INTERNATIONAL CONVENTION FOR THE PREVENTION OF POLLUTION FROM SHIPS, 1973, AS MODIFIED BY THE PROTOCOL OF 1978 RELATING THERETO*. 2011.
- [14] World Health Organization. «Guide to ship sanitation.» In: (2011), p. 155.
- [15] Luca Toneatti et al. «Rationalization and optimization of waste management and treatment in modern cruise ships». In: *Waste Management* 118 (2020). ISSN: 18792456. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.08.018.
- [16] Xiao Jie Wang, Qiu Hua Shen e Yun Zhe Ji. «Research Progress of Ships Waste Treatment Technology». In: *Applied Mechanics and Materials* 587-589 (2014), pp. 674–679. ISSN: 1662-7482. DOI: 10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMM.587-589.674. URL: <https://www.scientific.net/AMM.587-589.674>.
- [17] *Recovered glass container prices*. 2019. URL: <https://wrap.org.uk/resources/market-knowledge-portal/recovered-glass-container-prices>.
- [18] ASSOVETRO, cur. *Il settore industriale della produzione di vetro e prodotti in vetro*. 2017.
- [19] *Container-deposit legislation*, Wikipedia. 2020. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Container-deposit_legislation.
- [20] Carlo Strazza et al. «Investigation of green practices for paper use reduction onboard a cruise ship-a life cycle approach». In: *International Journal of Life Cycle Assessment* 20 (7 2015), pp. 982–993. ISSN: 16147502. DOI: 10.1007/s11367-015-0900-0.
- [21] M. Costa et al. «Numerical analysis of a compression ignition engine powered in the dual-fuel mode with syngas and biodiesel». In: *Energy* 137 (ott. 2017), pp. 969–979. ISSN: 03605442. DOI: 10.1016/j.energy.2017.02.160.

- [22] Ignacio Arias Fernández et al. «Review of propulsion systems on LNG carriers». In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67 (gen. 2017), pp. 1395–1411. ISSN: 18790690. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.095.
- [23] Menno Merts e Sebastian Verhelst. «Literature Review on Dual-Fuel Combustion Modelling». In: vol. 2019-September. SAE International, set. 2019. DOI: 10.4271/2019-24-0120.
- [24] V. Di Sarli, F. Cammarota e E. Salzano. «Explosion parameters of wood chip-derived syngas in air». In: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 32 (nov. 2014), pp. 399–403. ISSN: 09504230. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.10.016.
- [25] A. Molino et al. «Classification procedure of the explosion risk areas in presence of hydrogen-rich syngas: Biomass gasifier and molten carbonate fuel cell integrated plant». In: *Fuel* 99 (set. 2012), pp. 245–253. ISSN: 00162361. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.04.040.
- [26] Adrian J. Pierorazio e Quentin A. Baker. «Hazards for syngas fires and explosions». In: *Process Safety Progress* 29 (4 dic. 2010), pp. 288–292. ISSN: 10668527. DOI: 10.1002/prs.10400.
- [27] Paolo Baggio et al. «Energy and environmental analysis of an innovative system based on municipal solid waste (MSW) pyrolysis and combined cycle». In: *Applied Thermal Engineering* 28 (2-3 2008). Dati su LHV HHV del syngas prodotto da pirolisi di rifiuti cittadini, pp. 136–144. ISSN: 13594311. DOI: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2007.03.028. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431107001238>.
- [28] Jianjun Hu et al. «Integrated gasification and catalytic reforming syngas production from corn straw with mitigated greenhouse gas emission potential». In: *Bioresour. Technol.* 280 (mag. 2019), pp. 371–377. ISSN: 0960-8524. DOI: 10.1016/J.BIORTECH.2019.02.064. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852419302640>.
- [29] I. Ahmed e A.K. Gupta. «Evolution of syngas from cardboard gasification». In: *Applied Energy* 86 (9 2009), pp. 1732–1740. ISSN: 03062619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2008.11.018.
- [30] A.A.P. Susastriawan, Harwin Saptoadi e Purnomo. «Small-scale down-draft gasifiers for biomass gasification: A review». In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 76 (2017), pp. 989–1003. ISSN: 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.112.

- [31] Edris Madadian. *Experimental Observation on Downdraft Gasification for Different Biomass Feedstocks*. InTech, lug. 2018. DOI: 10.5772/intechopen.77119.
- [32] P. Mondal, G. S. Dang e M. O. Garg. «Syngas production through gasification and cleanup for downstream applications - Recent developments». In: *Fuel Processing Technology* 92 (8 2011), pp. 1395–1410. ISSN: 03783820. DOI: 10.1016/j.fuproc.2011.03.021.
- [33] Frederik Trippe et al. «Techno-economic assessment of gasification as a process step within biomass-to-liquid (BtL) fuel and chemicals production». In: *Fuel Processing Technology* 92 (11 nov. 2011), pp. 2169–2184. ISSN: 03783820. DOI: 10.1016/j.fuproc.2011.06.026.
- [34] Luca Toneatti et al. «Hydraulic and thermal characterization of a family of thermo-hydraulic separators». In: *Applied Thermal Engineering* 179 (2020). ISSN: 13594311. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115701.
- [35] URL: <http://www.mhtl.uwaterloo.ca/old/onlinetools/airprop/airprop.html>.
- [36] URL: <https://www.ipu.dk/>.
- [37] *World Sea Temperatures*. 2021. URL: <https://www.seatemperature.org/>.
- [38] N.S. Ganesh e T. Srinivas. «Development of thermo-physical properties of aqua ammonia for Kalina cycle system». In: *International Journal of Materials and Product Technology* 55 (1-3 2017), pp. 113–141. DOI: 10.1504/IJMPT.2017.084955.
- [39] J. Pátek e J. Klomfar. «Simple functions for fast calculations of selected thermodynamic properties of the ammonia-water system». In: *International Journal of Refrigeration* 18 (4 1995), pp. 228–234. ISSN: 01407007. DOI: 10.1016/0140-7007(95)00006-W.
- [40] J. Fernández-Seara e J. Sieres. «The importance of the ammonia purification process in ammonia-water absorption systems». In: *Energ. Convers. Manage.* 47 (2006), pp. 1975–1987.
- [41] E.W. Zavaleta-Aguilar e J.R. Simões-Moreira. «Thermal design of a tray-type distillation column of an ammonia/water absorption refrigeration cycle». In: *Applied Thermal Engineering* 41 (2012), pp. 52–60.

- [42] M. Clerx e G.J. Trezek. «Performance of an Aqua-Ammonia Absorption Solar Refrigerator at Sub-Freezing Evaporator Conditions». In: *Solar Energy* 39 (1987), pp. 379–389. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(87\)80056-7](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(87)80056-7).
- [43] S.D. White e B.K. O'Neill. «Analysis of an improved aqua-ammonia absorption refrigeration cycle employing evaporator blowdown to provide rectifier reflux». In: *Appl. Energ.* 50 (1995), pp. 323–337.