



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

**Corso di Laurea in Ingegneria dell'energia**

**Dipartimento di Ingegneria Industriale**

**Recupero del calore di scarico nei motori alternativi e  
applicazione ai motori navali**

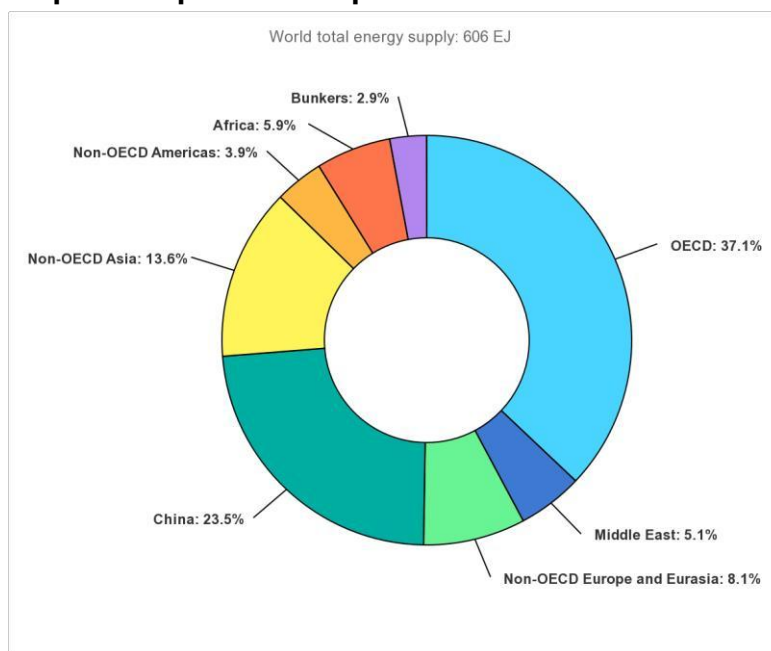
**Relatore: Anna Stoppato**

**Laureando: Matteo Ottavian**

**Anno Accademico 2022-2023**

## Introduzione

Il calore è la forma di energia più semplice e diffusa e su di esso si basa il funzionamento della maggior parte delle tecnologie di produzione dell'energia. Tra queste ci sono i motori a combustione interna, che si prestano bene all'idea di recupero del calore in quanto i rendimenti odierni, nonostante siano migliorati nel tempo, presentano comunque una parte importante di perdite.



L'immagine è tratta dal key-world-energy-statistics-2021 di IEA e rappresenta i consumi finali di energia. La categoria bunkers non rappresenta uno stato o gruppo di paesi caratterizzati da un simile livello di sviluppo economico. Essa nasce dalla necessità di riunire i consumi di combustibile in ambito aeronautico e navale, non attribuibili a singoli paesi in quanto si parla di spostamenti a livello internazionale.

Verrà affrontato solo l'ambito navale in quanto in esso è possibile parlare di tecnologie di recupero del calore di scarto prodotto dai motori.

## Capitolo 1: Componenti e tecnologie

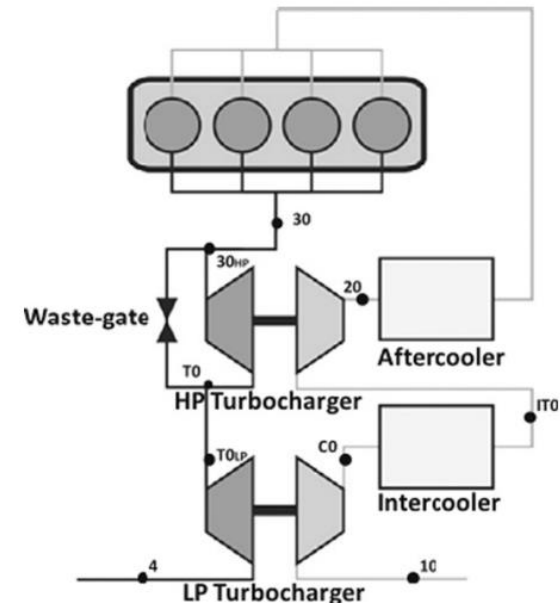
### Turbocompound

**Turbina:** componente del WHRS che converte l'entalpia contenuta nei gas di scarico in uscita dalla camera di combustione in energia meccanica

**Possibili utilizzi:**

- **Turbina di potenza:** converte l'energia dei gas di scarico in meccanica utilizzabile per vari scopi (energia elettrica, supporto al motore previa conversione rpm)
- **Turbocompressore:** turbina direttamente collegata ad un turbocompressore per attuare la sovralimentazione

La presenza simultanea di entrambe le tipologie prende il nome di turbocompound che può essere di tipo meccanico, idraulico o elettrico. Un turbocompound può essere dotato di un gruppo motore-generatore elettrico ausiliario che fornisce potenza aggiuntiva a bassi regimi e recupera energia elettrica ad alti carichi del motore.





## Capitolo 1: Componenti e tecnologie

### Ciclo Rankine

**Ciclo termodinamico che converte il calore in lavoro utilizzando come fluido operativo l'acqua. Si compone di 4 elementi principali:**

- evaporatore
- turbina
- condensatore
- pompa di circolazione

**La fonte di calore utilizzata nell'evaporatore può essere:**

- gas di scarico in uscita dal motore o da un turbocompound
- acqua di raffreddamento,
- olio lubrificante
- aria compressa (intercooler)

**Possibili variazioni:**

- **Ciclo Rankine Organico:** utilizza come fluido di lavoro fluidi organici con calori specifici inferiori (miglior accoppiamento con fonti a temperature inferiori)
- **Ciclo Rankine supercritico:** ciclo Rankine in cui la pressione raggiunta dal fluido (acqua) è superiore alla pressione critica



## Capitolo 1: Componenti e tecnologie

### Ciclo Kalina

Ciclo termodinamico simile al ciclo Rankine che utilizza come fluido di lavoro una miscela acqua-ammoniaca. Presenta un passaggio di fase a temperatura non costante e consente quindi un miglior accoppiamento con la fonte di calore. Il layout è simile ad un SRC con l'aggiunta di recuperatore, separatore, miscelatori e valvole di controllo del flusso. Il recuperatore preriscalda il fluido di lavoro riducendo le perdite al condensatore. Il separatore è un dispositivo necessario a dividere il fluido di lavoro in 2 miscele, una ricca e una magra. Tale separazione è necessaria per controllare la percentuale di acqua e ammoniaca nel fluido di lavoro. La possibilità di variare la composizione del fluido permette di cambiarne le caratteristiche e ottenere un accoppiamento termico migliore in base alla fonte di calore.

### Refrigerazione

Il calore di scarto può alimentare sistemi di refrigerazione ad assorbimento e adsorbimento. La prima tecnologia si basa sulla miscelazione e separazione di due fluidi, assorbente e refrigerante, in cui il secondo si separa dal primo tramite riscaldamento per compiere poi un ciclo frigorifero. La seconda tecnologia presenta un funzionamento analogo al precedente con la differenza che il refrigerante non si trova inizialmente in soluzione con un fluido assorbente ma è trattenuto da un materiale solido detto adsorbente.



## Capitolo 1: Componenti e tecnologie

### Dissalazione

La necessità di produrre acqua dolce a bordo di una nave è dovuta all'impossibilità in termini logistici di trasportare l'intera quantità necessaria all'equipaggio. I principali metodi di dissalazione sono la distillazione termica, l'osmosi inversa, l'elettrolisi, e il congelamento. I processi di evaporazione per flash multistadio e distillazione ad effetto multiplo utilizzano direttamente il calore recuperabile dal motore senza la necessità di convertirlo in altre forme di energia. Il primo si basa sul fenomeno dell'evaporazione per flash. Il secondo invece sfrutta il calore di scarto per l'evaporazione in un primo evaporatore, mentre per i successivi stadi il calore del vapore dello stadio precedente è sufficiente in quanto in ogni stadio decresce la pressione di saturazione.

### Generazione termoelettrica

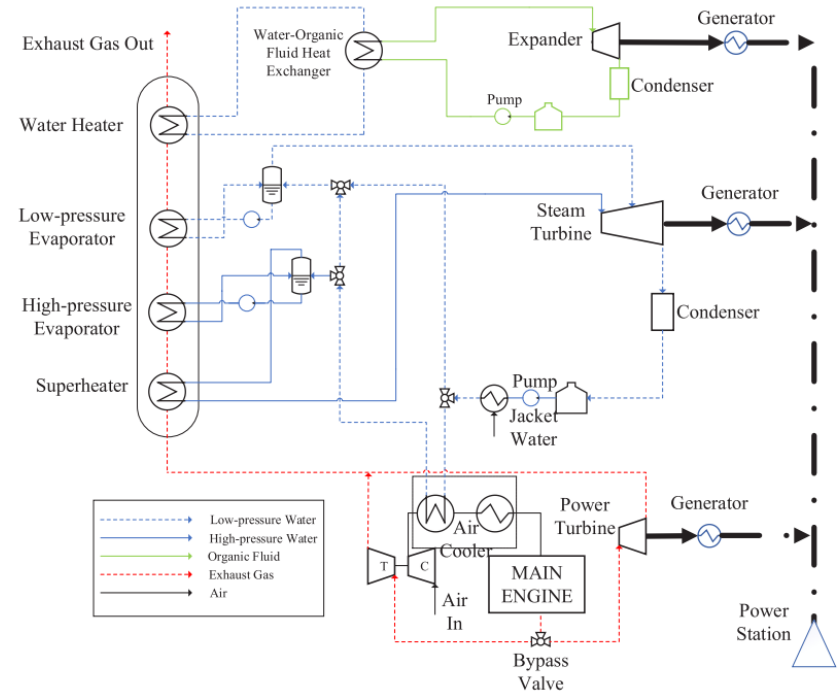
Sistema di generazione di energia elettrica basato sull'effetto Seebeck, effetto nel quale un gradiente termico applicato ad una termocoppia, strumento composto da una giunzione di 2 materiali conduttori di tipo p ed n termicamente in parallelo ed elettricamente in serie, genera una differenza di potenziale. Le termocoppie costituiscono moduli che possono essere messi in serie e parallelo per adeguarsi alle esigenze di tensione e corrente del sistema da alimentare.

## Capitolo 2: Primo caso di studio

### Sistema analizzato

- Motore diesel due tempi (MAN 6S50ME-C8.2, 9.96 MW)
- Turbocompound
- Ciclo Rankine a doppia pressione
- Ciclo Rankine organico
- Caldaia a recupero

I gas di scarico fluiscono dapprima nel turbocompound e successivamente alimentano la caldaia a recupero, fonte di calore dei sistemi SRC e ORC. Il preriscaldamento dell'acqua nella sezione a bassa pressione è ad opera di aria compressa e acqua di raffreddamento.



### Progettazione del sistema

- Valutazione termodinamica (efficienza termica ed exergetica) e tecno-economica
- Analisi ciclo Rankine (temperatura e pressione in ingresso sezione HP)
- Analisi ciclo Rankine organico
- Calcolo dei parametri di progetto

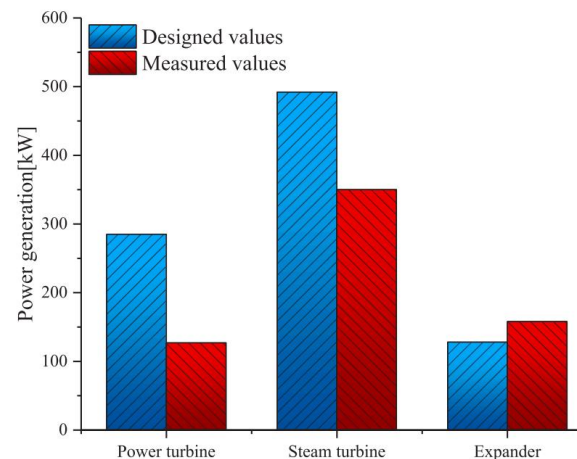
## Capitolo 2: Primo caso di studio

### Test e risultati

A differenza del modello ipotizzato il sistema ha prodotto risultati differenti dalle aspettative. Le cause sono da ricercare nelle condizioni iniziali di lavoro differenti rispetto alle ipotesi e nella scorretta valutazione di alcuni parametri (come le perdite di calore negli scambiatori di calore).

La produzione massima di potenza elettrica raggiungibile dal WHRS è di 1079 kW con motore al 100% del carico. L'efficienza termica aumenta con il regime ma si stabilizza con un rendimento del 27% a partire da un carico del motore pari al 50%. L'efficienza exergetica subisce un notevole incremento fino al 65% per carichi del motore superiori al 60%.

La valutazione economica ha stimato un periodo di ammortamento di 5,2 anni e un periodo di ammortamento scontato di 6,9 anni.





## Capitolo 2: Primo caso di studio

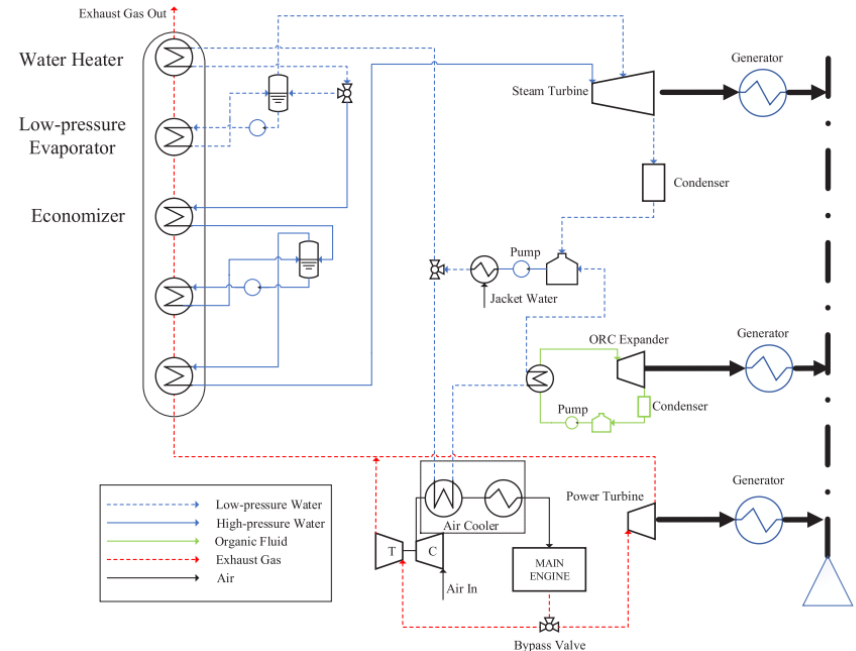
### Miglioramento del sistema

Lo schema proposto inizialmente può essere migliorato tramite una gestione differente delle varie fonti di calore. L'acqua di raffreddamento opera il preriscaldamento sia per SRC che ORC. La fonte di calore per l'ORC è ora l'intercooler mentre la caldaia a recupero alimentata dai gas di scarico funge da generatore di vapore per il solo SRC.

Oltre al miglior accoppiamento termico tra le fonti si ottiene una riduzione del grado di accoppiamento del sistema stesso, consentendo ai vari sottosistemi di operare con maggiore indipendenza fra loro.

### Conclusioni

Il WHRS analizzato risulta vantaggioso in quanto consente un recupero significativo del calore di scarto. La potenza elettrica massima raggiungibile dal sistema è di oltre il 10% della potenza nominale del motore, mentre quella ottenuta nelle condizioni di prova reali è circa il 6%. Lo schema migliorato inoltre comporta ulteriori vantaggi rispetto al modello iniziale e presenta prestazioni migliori in condizioni di carico elevate.

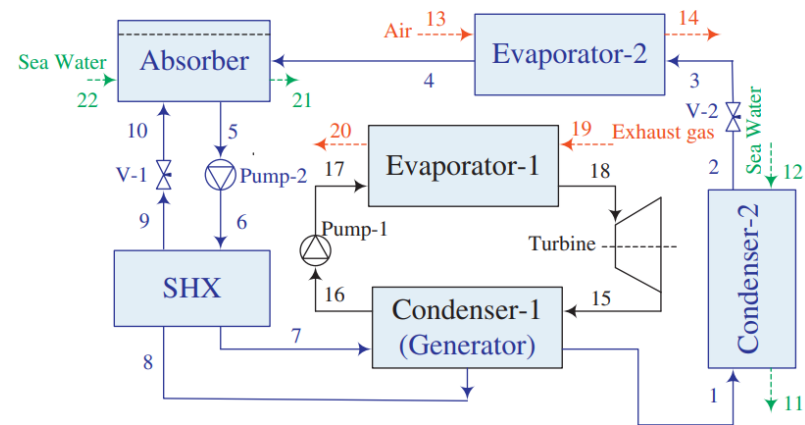


## Capitolo 3: Secondo caso di studio

### Sistema analizzato

- Motore diesel due tempi (Wartsila-Sulzer RTA-96C, 51.48 MW)
- Ciclo Rankine
- Ciclo frigorifero ad assorbimento

I gas di scarico sono utilizzati interamente come fonte di calore nel ciclo Rankine mentre il ciclo frigorifero utilizza come fonte il calore disperso al condensatore.



### Progettazione del sistema

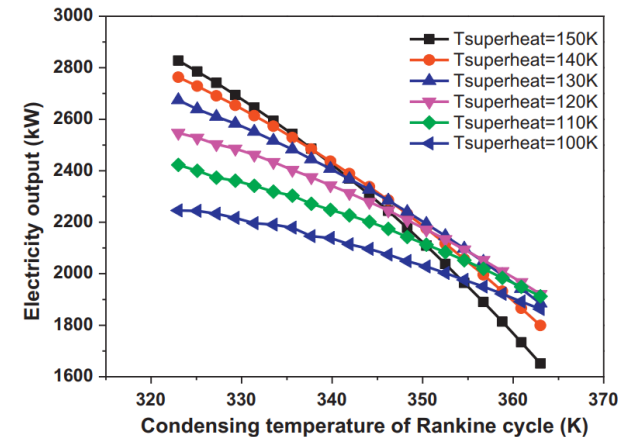
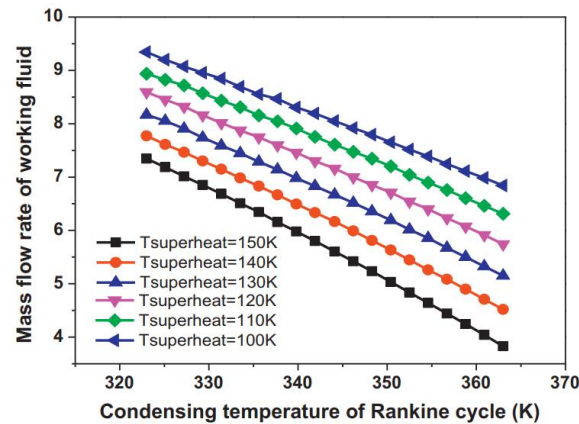
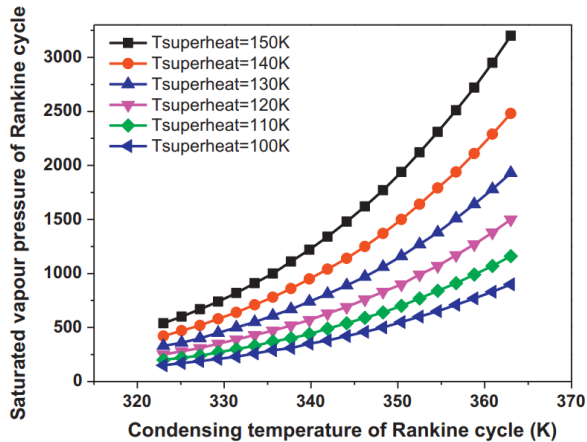
- Valutazione termodinamica (efficienza termica, COP e rendimento exergetico)
- Analisi risultati ciclo Rankine
- Analisi risultati ciclo frigorifero ad assorbimento

## Capitolo 3: Secondo caso di studio

### Analisi dei parametri del SRC

La temperatura della fonte di calore è fissata (587 K). Per evitare erosione delle pale è necessario intervenire su 2 parametri che sono la pressione di evaporazione e la portata di massa.

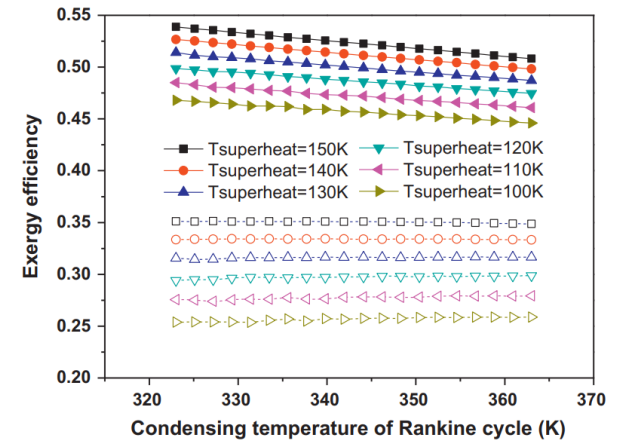
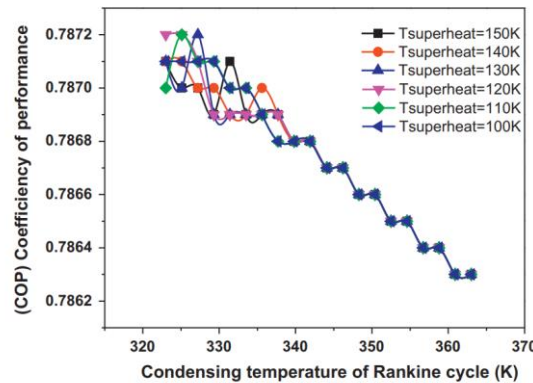
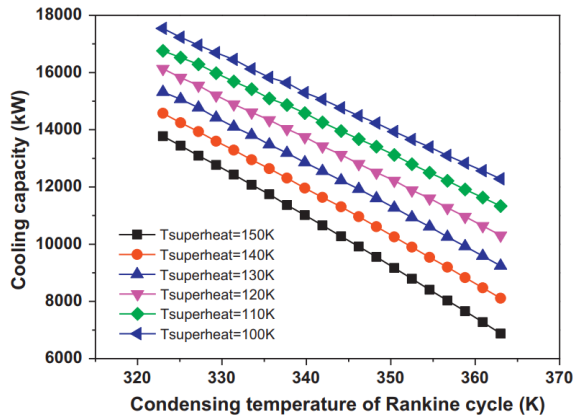
- La prima cresce con il surriscaldamento e con la temperatura di condensazione, la seconda invece cala sia all'aumentare della temperatura di surriscaldamento che di condensazione.
- La portata di massa cresce quindi al diminuire della pressione di evaporazione.
- La potenza elettrica generata cala con il crescere della temperatura di condensazione ma aumenta l'efficienza termica.



## Capitolo 3: Secondo caso di studio

### Analisi dei parametri del ciclo frigorifero

- La capacità di refrigerazione diminuisce al crescere sia della temperatura di condensazione che di surriscaldamento del SRC perché si riduce la portata di massa.
- Il COP non subisce particolari variazioni e presenta un calo trascurabile al crescere delle 2 temperature.
- Viene valutato anche il rendimento exergetico dell'intero WHRS





## Capitolo 3: Secondo caso di studio

### Conclusioni

**Il rendimento exergetico aumenta notevolmente se il ciclo Rankine viene accoppiato al ciclo frigorifero ad assorbimento. La temperatura di surriscaldamento aumenta la produzione elettrica ma riduce la capacità di raffreddamento mentre la temperatura di condensazione riduce entrambe. Si riconoscono quindi le potenzialità del WHRS in particolar modo osservando il rendimento exergetico.**

### Considerazioni finali

**I casi appena esposti sono solo 2 di molteplici sistemi soggetti tutt'ora a ricerca. Nonostante ciò i vantaggi dimostrati dai soli due WHRS analizzati sono evidenti. Gli incrementi di efficienza sia termica che exergetica comportano un utilizzo migliore dell'energia coinvolta nei processi.**

**Ne consegue la riduzione di carburante e il guadagno successivo di vantaggi su molteplici fronti:**

- **riduzione delle emissioni del sistema**
- **risparmio economico**
- **spazio aggiuntivo ricavato all'interno della nave**

**I motori a combustione interna sono una tecnologia ormai matura ma comunque in continua evoluzione verso l'aumento dell'efficienza termica. Ritengo quindi molto importante la ricerca nell'ambito dei WHRS che hanno come obiettivo il riutilizzo della maggior percentuale possibile del calore residuo.**