www.dii.unipd.it

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Relazione per la prova finale Cicli Brayton-Joule: varianti e accoppiamenti con il sistema di propulsione NEP

Tutor universitario: Prof. Arianna Berto

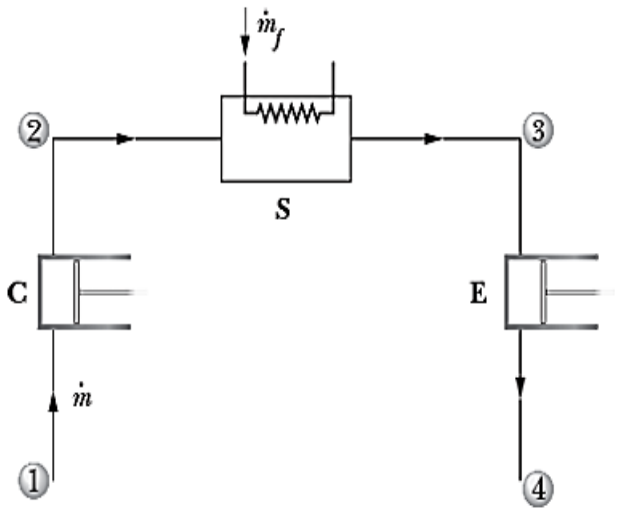
Laureando: *Enrico De Toma*

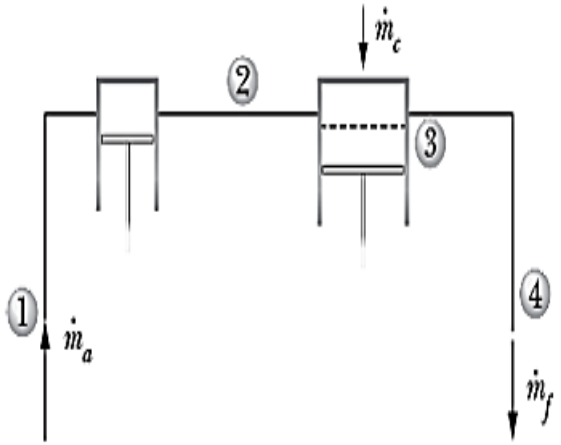
Padova, 18/9/2025

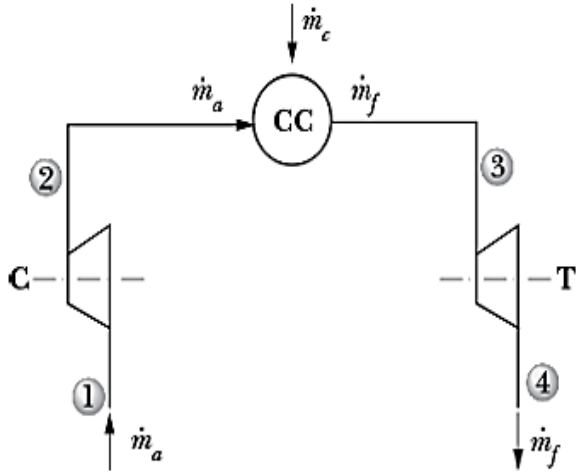
INTRODUZIONE SUI CICLI BRAYTON-JOULE

.dii.unipd.it

- Ciclo costituito da due trasformazioni adiabatiche e due isobare
- Produzione di potenza meccanica e spinta propulsiva
- Tre fasi di sviluppo: ciclo Joule, ciclo Brayton, ciclo Turbogas



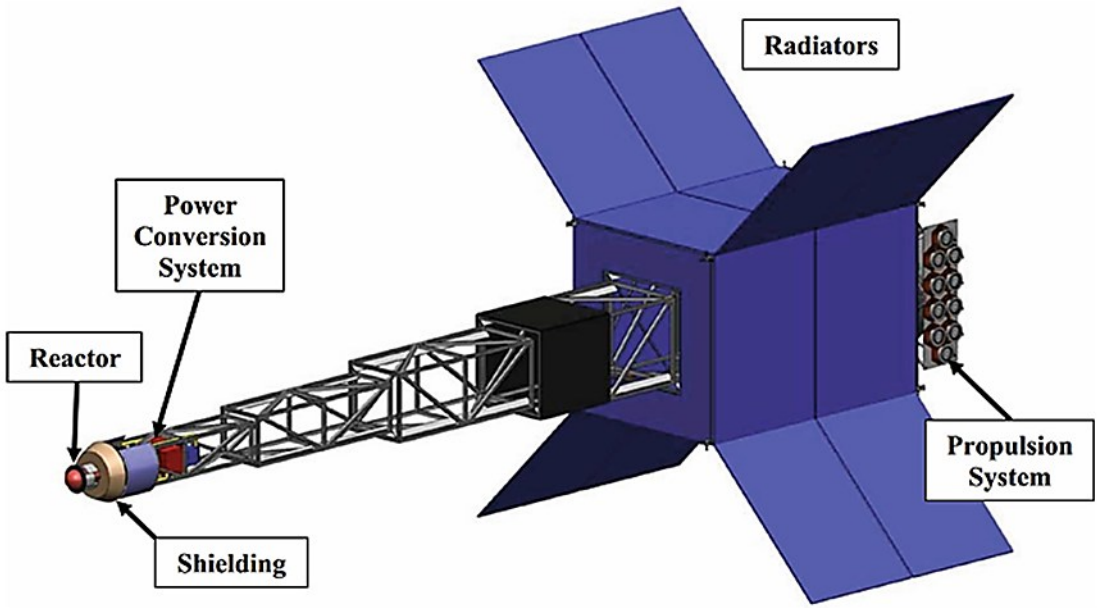




NUCLEAR ELECTRIC PROPULSION

www.dii.unipd.it

- Sistema utilizzato per missioni spaziali con distanza superiore a quella fra Terra e Luna
- Impulso specifico molto elevato (2000s 10000s)
- Elevati Δv cumulati nel tempo
- Spinta continua e modulabile, ma bassa: manovre complicate per uscire da LEO
- Energia termica derivante dal reattore sufficiente per l'alimentazione dei sistemi di bordo
- Tempi di trasferimento maggiori
- Elevata complessità del sistema
- Gestione termica
- Necessità di protezioni dalle radiazioni
- Difficoltà nel ricreare le condizioni operative

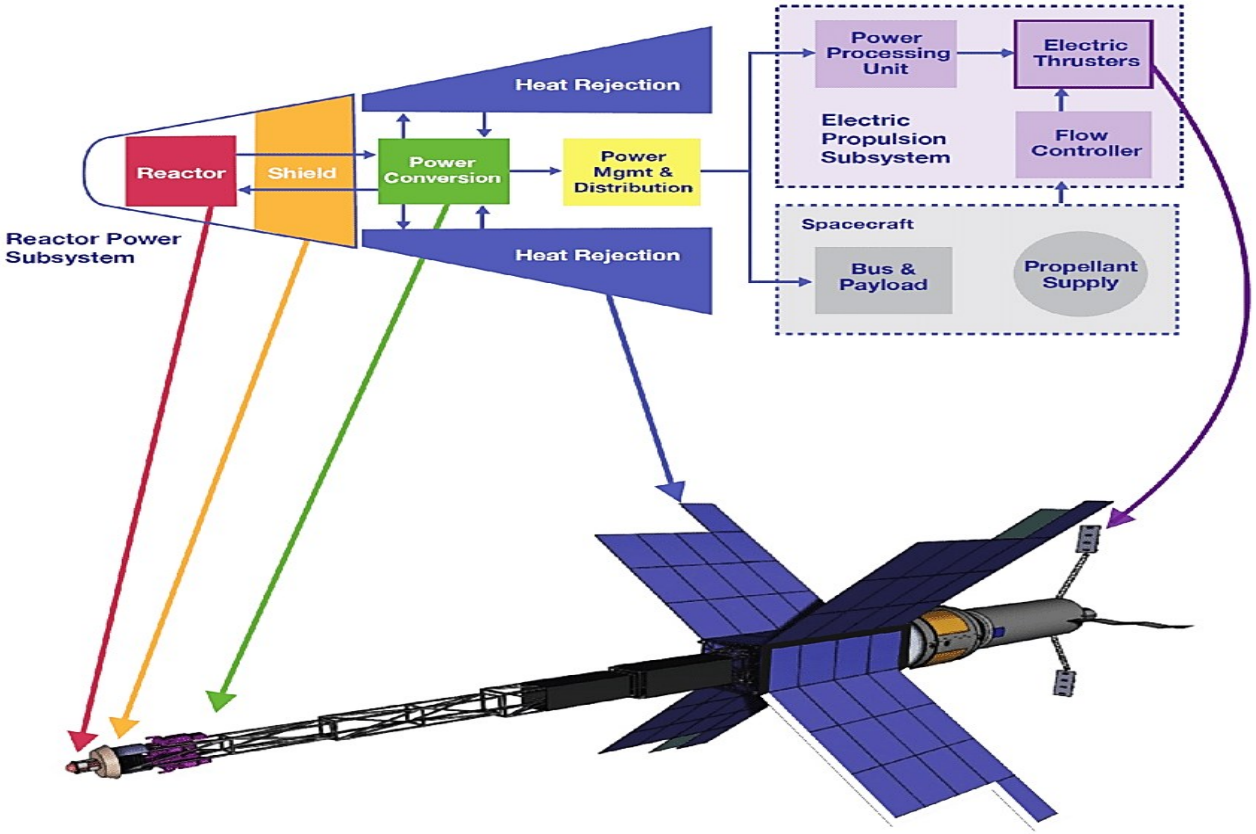


NUCLEAR ELECTRIC PROPULSION

www.dii.unipd.it

COMPONENTI PRINCIPALI

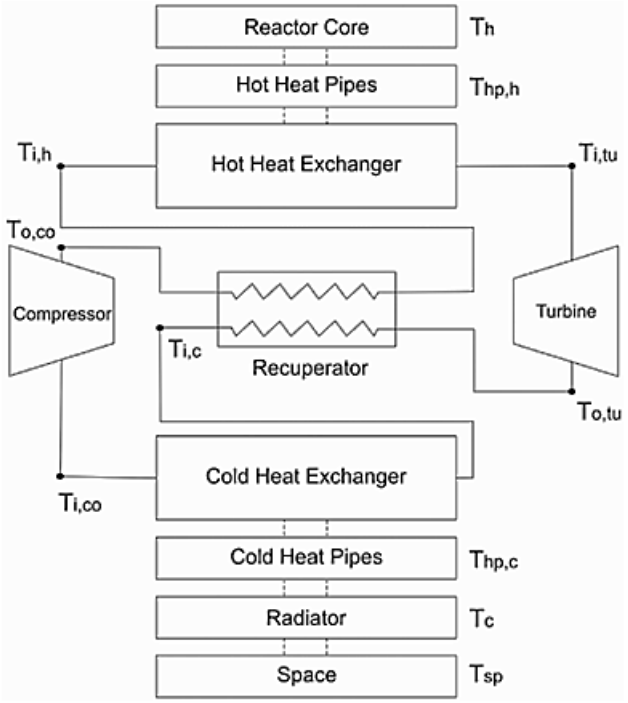
- Reattore: produzione di calore tramite fissione nucleare
- Sistema di protezione: schermo dalle radiazioni prodotte dal reattore
- Radiatori: smaltimento del calore in eccesso
- Sistema di controllo e distribuzione della potenza: elevata efficienza ($\eta > 90\%$)
- Sistemi di conversione della potenza: statici e dinamici
- Sistemi di propulsione: energia elettrica utilizzata per accelerare il propellente



CICLI BRAYTON-JOULE APPLICATI ALLA NEP

www.dii.unipd.it

- Utilizzato dagli inizi degli anni Settanta dalla Nasa
- Adoperato dalla Commissione Europea con il progetto MEGAHIT (2012)
- Configurazione chiusa del ciclo Brayton-Joule
- Diverse versioni del ciclo (ricompressione, doppia turbina)
- Fluidi operativi: miscele di Elio con gas nobili, anidride carbonica supercritica (sCO2), miscela supercritica di Elio con protossido d'azoto



CICLI BRAYTON-JOULE APPLICATI ALLA NEP

www.dii.unipd.it

CALCOLO DEL RENDIMENTO

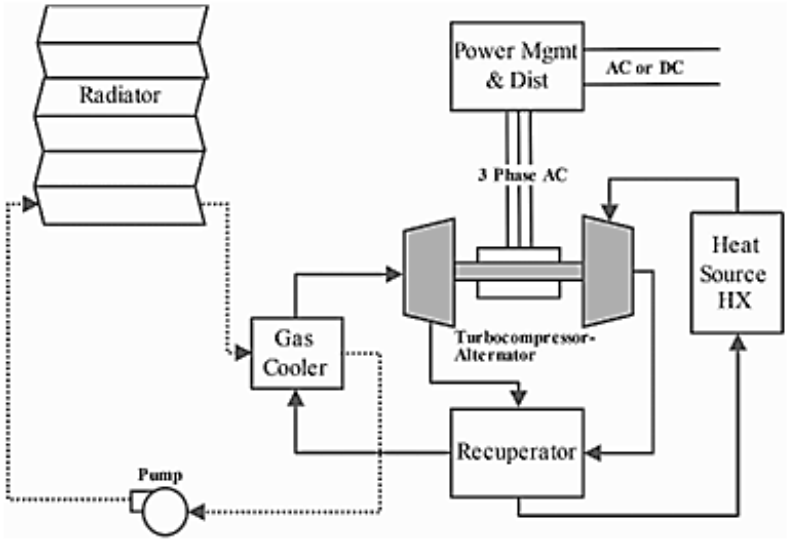
- Potenza netta: - $P_{net} = \left(P_{turbina} - P_{compressore}\right)$
- Trasformazioni adiabatiche reversibili, dunque isoentropiche:
- $$T_{out,compressore,i} = T_{in,compressore}\left(\frac{p_{in,compressore}}{p_{out,compressore}}\right)^{\frac{1-k}{k}}$$
  $$T_{out,turbina,i} = T_{in,turbina}\left(\frac{p_{in,turbina}}{p_{out,turbina}}\right)^{\frac{1-k}{k}}$$
- Temperature effettive ricavate tramite i rendimenti isoentropici:
  $$T_{out,compressore} = T_{in,compressore} + \frac{T_{out,compressore,i} - T_{in,compressore}}{\eta_{compressore}}$$
  $$T_{out,turbina} = T_{in,turbina} - \eta_{espansione} * \left(T_{in,turbina} - T_{out,turbina,i}\right)$$
- Potenze risultanti:
  $$P_{compressore} = \dot{m} * c_p * \left(T_{out,compressore} - T_{in,compressore}\right)$$
  $$P_{turbina} = \dot{m} * c_p * \left(T_{out,turbina} - T_{in,turbina}\right)$$
- Calore generato dal reattore:
  $$q_{reattore} = \dot{m} * c_p * \left(T_{out,reattore} - T_{in,reattore}\right)$$
- Rendimento del sistema:
  $$\eta_{sistema} = \frac{P_{tot}}{q_{reattore}}$$

RENDIMENTO DI DUE DIVERSE APPLICAZIONI DEL CICLO BRAYTON-JOULE

www.dii.unipd.it

PRIMA APPLICAZIONE

- Ciclo Brayton-Joule chiuso con recuperatore posizionato prima del reattore
- Fluido operativo: miscela Elio (30%)-Xenon(70%)
- Rendimento del sistema: $\eta_{sistema} = 40{,}89\%$
- Rendimento elettrico: $\eta_{elettrico} = \eta_{sistema} * \eta_{gen} = 38{,}84\%$ $(\eta_{gen} = 0{,}95)$
- Lavoro netto: $W_{net} = 84{,}32\,\frac{kJ}{kg}$
- Portata di massa necessaria alla produzione di 100kWe: $\dot{m} = \frac{100}{W_{net}*\eta_{gen}} = 1{,}25\,\frac{kg}{s}$

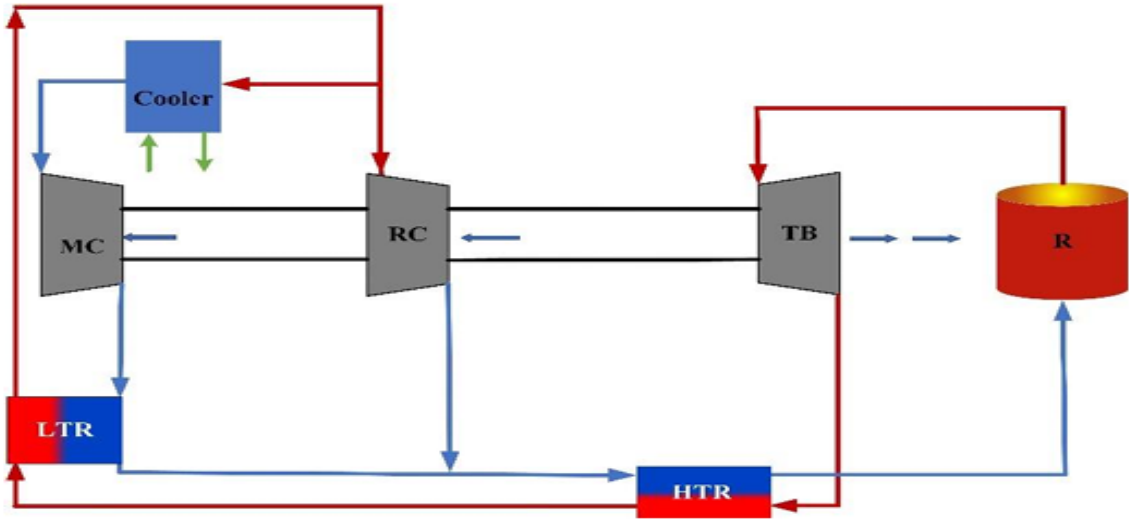


RENDIMENTO DI DUE DIVERSE APPLICAZIONI DEL CICLO BRAYTON-JOULE

www.dii.unipd.it

SECONDA APPLICAZIONE

- Ciclo Brayton-Joule chiuso con ricompressione
- Fluido operativo: miscela supercritica di Elio (15%)-protossido d'Azoto (85%)
- Rendimento del sistema: $\eta_{sistema} = 41{,}11\%$
- Rendimento elettrico: $\eta_{elettrico} = \eta_{sistema} * \eta_{gen} = 39{,}06\%$ $(\eta_{gen} = 0{,}95)$
- Lavoro netto: $W_{net} = 236{,}38 \frac{kJ}{kg}$
- Portata di massa necessaria alla produzione di 100kWe: $\dot{m} = \frac{100}{W_{net} * \eta_{gen}} = 0{,}44 \frac{kg}{s}$



RENDIMENTO DI DUE DIVERSE APPLICAZIONI DEL CICLO BRAYTON-JOULE

www.dii.unipd.it

CONFRONTO TRA LE ALTERNATIVE

	Prima alternativa	Seconda alternativa
Rendimento sistema $\eta_{sistema}$	40,89%	41,11%
Rendimento elettrico $\eta_{elettrico}$	38,84%	39,06%
Lavoro netto W_{net} $[\frac{kJ}{kg}]$	84,32	236,38
Portata di massa necessaria a produrre 100kWe $\dot{m}$ $[\frac{kg}{s}]$	1,25	0,44

CONCLUSIONI

- Prima applicazione: layout più semplice e minori masse in gioco
- Seconda applicazione: rendimento migliore, lavoro netto superiore e minore quantità di propellente richiesta
- Sistema NEP efficiente per esplorazione spaziale profonda e trasporto di carichi elevati
- Soluzione di interesse per il futuro dell'esplorazione spaziale

www.dii.unipd.it