

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

***Relazione per la prova finale***  
***«Analisi dei sistemi di propulsione per i veicoli***  
***aeronautici: studio dei cicli termodinamici di base e loro***  
***evoluzione»***

Tutor universitario: Prof. Azzolin Marco

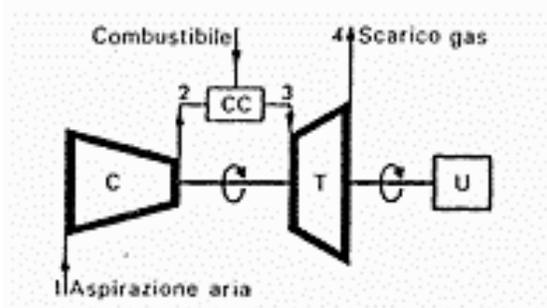
Laureando: Montesi Maria Giulia

Padova, 27/09/2024

La propulsione aeronautica è il campo con il maggior impiego delle turbine a gas, introdotte nel corso della Seconda Guerra Mondiale, sono state progettate per la generazione di potenza.

L'elaborato descrive in primo luogo l'impianto e il funzionamento secondo il ciclo di Brayton-Joule di una turbina a gas, con le varie configurazioni che si possono adottare. In seguito si sofferma in maniera dettagliata sulla propulsione aeronautica, rappresentando i tipi di propulsori ad elica e di propulsori a getto, sul meccanismo di un esoreattore, che utilizza l'aria come propellente, sui motori non convenzionali, il caso degli alianti, con qualche cenno sulla propulsione spaziale. Gli ultimi capitoli, in opposizione, espongono sia una visione del passato, con l'impiego degli aeroplani nel corso del Novecento, sia uno sguardo al futuro, con le migliori prestazioni e caratteristiche richieste ai propulsori.

La turbina a gas è una macchina motrice rotante a combustione interna, che produce energia meccanica disponibile all'esterno. Il funzionamento di un impianto turbogas può essere descritto mediante il ciclo termodinamico di Brayton-Joule composto da quattro trasformazioni: compressione, riscaldamento, espansione, raffreddamento.

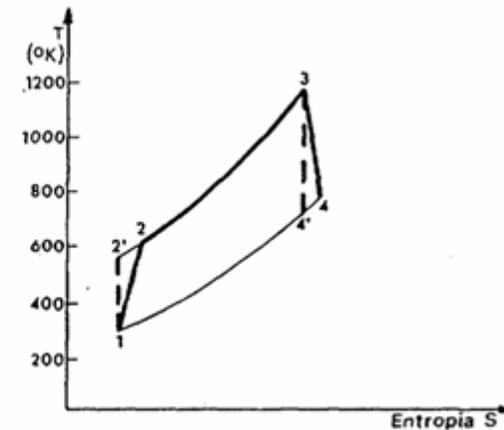
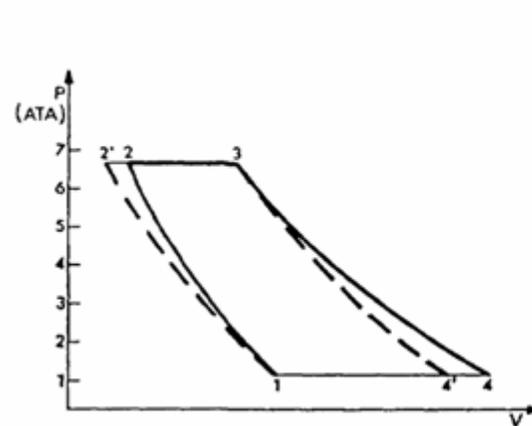


L'impianto trasforma l'energia chimica del combustibile in energia elettrica, il rendimento è tanto migliore quanto maggiore è la temperatura che si raggiunge nella camera di combustione, che deve essere contenuta entro certi limiti per le giuste prestazioni dell'espansore, influenzate anche dalla composizione del fluido.

È un ciclo che può essere descritto sia come ciclo ideale, il quale comprende due trasformazioni adiabatiche reversibili e due isobare, sia come ciclo reale, in cui generalmente il fluido non è aria, e nel calcolo dell'efficienza si devono considerare le perdite che si hanno nei vari tratti.

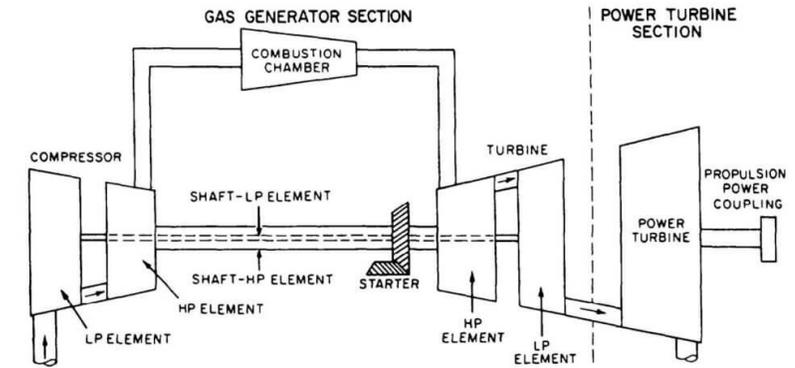
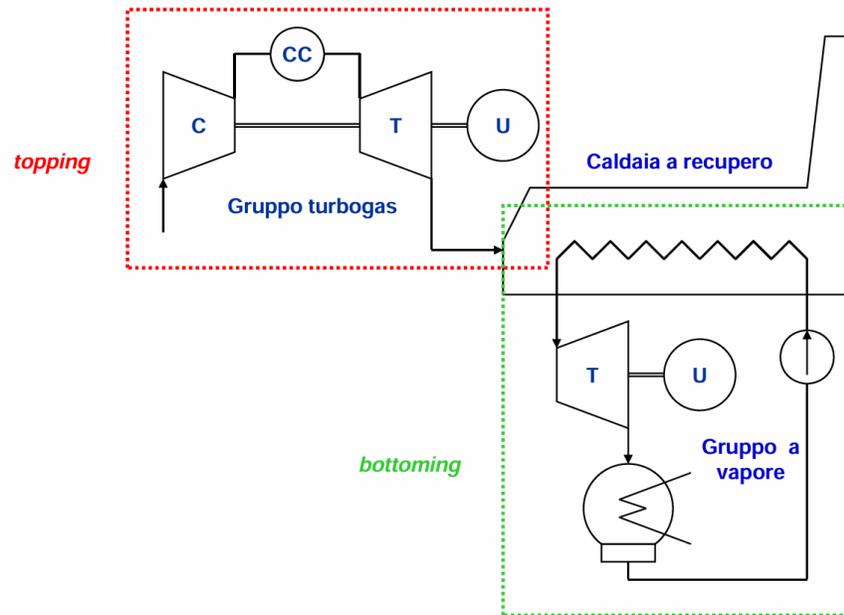
$$\eta_{id} = 1 - \frac{Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

$$\eta_q = \eta_b \eta_{mt} \eta_{tis} \frac{\frac{T_3}{T_{2is}} - \frac{1}{\eta}}{\frac{Q_{1id}}{L_{cis}} - \frac{1 - \eta_{cis}}{\eta_{cis}}}$$



Esistono diverse configurazioni di turbine a gas a seconda dell'impiego, dal ciclo turbogas semplice, la struttura più basilare, al ciclo combinato, al ciclo a cogenerazione, alla refrigerazione dell'aria in ingresso, per la diminuzione della temperatura e l'aumento dell'efficienza. Sono state introdotte anche forme più complicate: la turbina a gas Multi-Spool, la turbina a gas con palette statoriche a incidenza variabile, la turbina a gas con valvole di by pass.

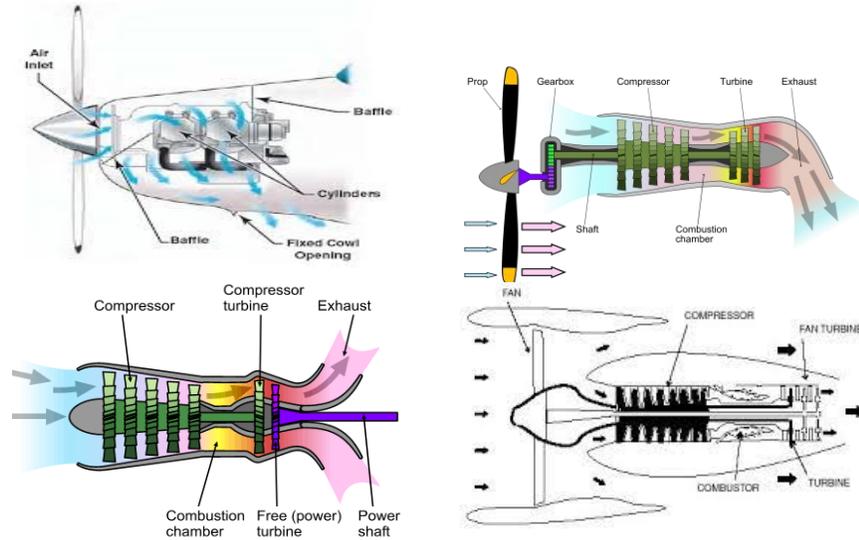
Data la complessità che può avere un impianto, a livello macroscopico esistono due classificazioni: a ciclo aperto, maggiormente impiegato per scopi aeronautici, e a ciclo chiuso.



I cicli combinati gas-vapore sono maggiormente utilizzati per la generazione di potenza elettrica, raggiungono rendimenti molto elevati, fino al 60%.

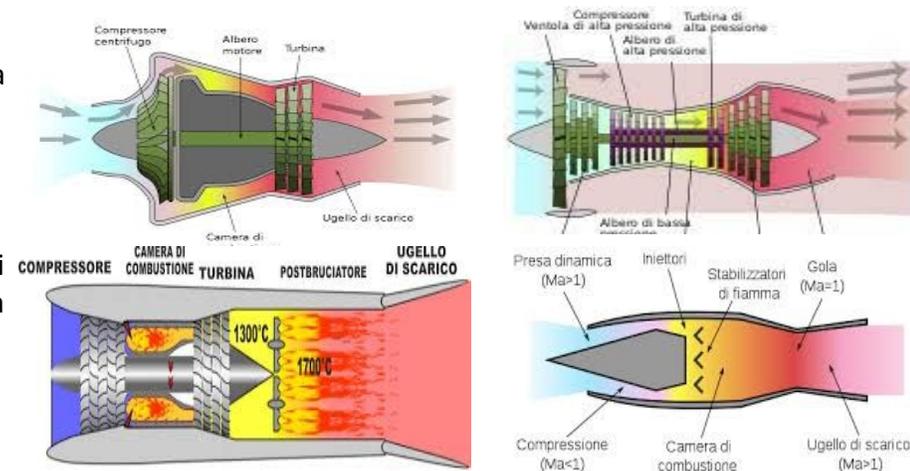
La propulsione aeronautica è il maggior campo di impiego delle turbine a gas, progettate per generare la potenza necessaria ad azionare il compressore e i gas, uscenti dalla turbina ad elevata pressione e temperatura, vengono espansi fino alla pressione atmosferica in un ugello propulsivo per ottenere un getto ad elevata velocità.

**Propulsori ad elica:** la velocità dell'aria esterna viene aumentata per mezzo di un'un'elica, al fine generare una spinta per reazione.



**Propulsori a getto:** la spinta è ottenuta grazie all'espulsione di un getto ad alta velocità.

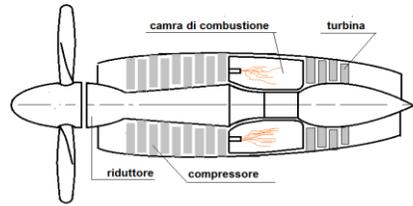
**ESOREATTORE:** il fluido operativo è l'aria che scorre esternamente al veicolo, introdotta nel motore, elaborata e poi espulsa, la spinta si ottiene aumentando la quantità di moto dell'aria.



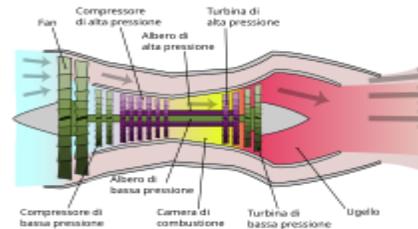
**Aliante:** è un aerodina, un aeromobile più pesante dell'aria, che si sostiene in volo grazie all'azione dinamica dell'aria contro le superfici alari e il cui volo libero non dipende da un motore. Sono progettati per avere la minore resistenza aerodinamica possibile a parità di potenza, caratteristiche che consentono di ottenere i più alti valori di efficienza aerodinamica.



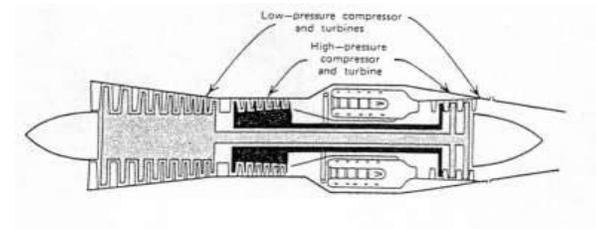
La maggior parte dei motori aeronautici non alternativi funzionano secondo il principio della propulsione.



**TURBOELICA**

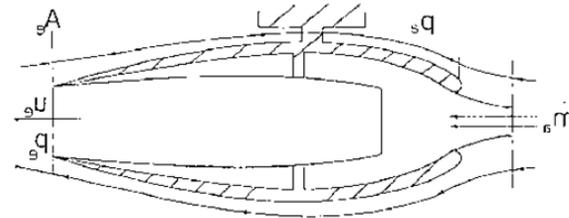


**TURBOFAN**



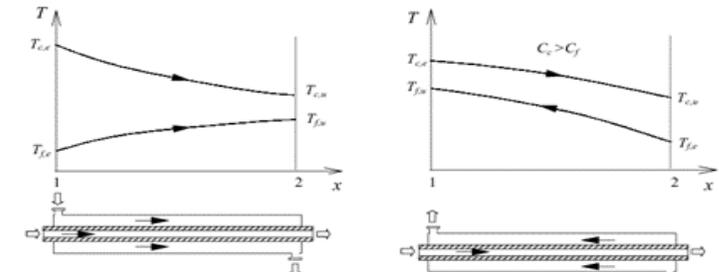
**TURBOGETTO**

Gli organi principali che compongono un motore aeronautico sono: presa d'aria, compressore, camera di combustione, turbina, ugello. Le differenze non sono date dalle trasformazioni, ma da alcuni dispositivi e dal rendimento che tali macchine riescono a raggiungere.



$$F = \dot{m}_e u_e - \dot{m}_a v_0 + (p_e - p_a) A_e$$

Elementi poco utilizzati in ambito aeronautico sono gli scambiatori di calore: si ha la trasmissione del calore da un fluido temperatura più alta ad un fluido a temperatura più bassa, sono dispositivi che permettono il raffreddamento, riscaldamento, il controllo di temperatura. Allo stesso tempo però sfruttano l'energia del motore e sono ingombranti.



La propulsione a razzo è il sistema fondamentale per i veicoli che operano nello spazio: produce un flusso di molecole di gas, o altre particelle, che vengono emesse ad altissima velocità e il veicolo viene spinto in direzione opposta.

**ENDOREATTORE:** sistema propulsivo in cui propellente e ossidante sono immagazzinati all'interno di serbatoi e non viene prelevata aria dall'esterno, progettati per operare nel vuoto o in ambienti rarefatti.

Fonti di energia utilizzate:

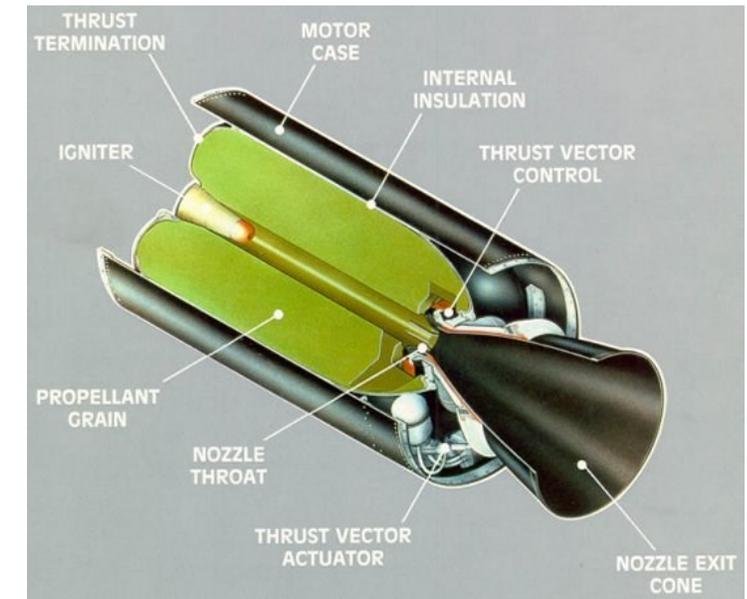
- Energia chimica
- Energia nucleare termica
- Energia solare

Forme di energia che possono essere convertite in energia cinetica, impiegabile per accelerare un mezzo e generare una spinta.

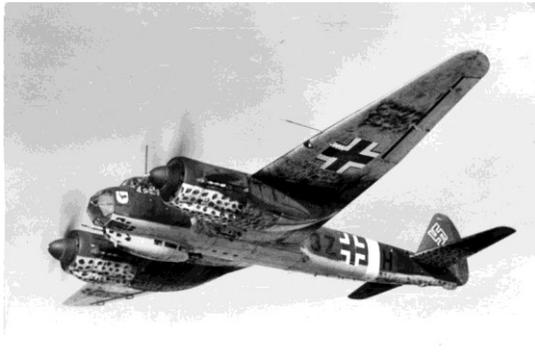
Sulla base delle fonti di energia ed il modo in cui viene accelerato il fluido, gli endoreattori sono classificati in:

- Endoreattori termici
- Endoreattori elettrostatici
- Endoreattori elettromagnetici

$$F = \frac{dp}{dt} = ma + \dot{m}v$$



L'aviazione, civile e militare, ebbe un ruolo fondamentale nel corso della Seconda Guerra Mondiale, influenzò profondamente anche l'esito del conflitto.

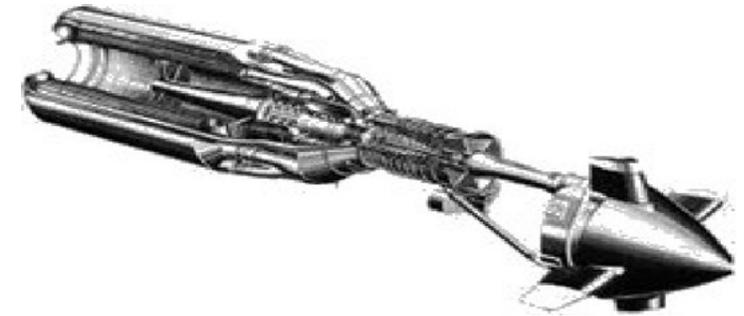


Bundesarchiv, RM 1011-417-1789-03A  
Foto: Steinhilber, I. (1921-22)

*Junkers Ju-88, bombardiere veloce tedesco*

Le prime applicazioni di aerei militari vennero sperimentate durante l'inizio del Novecento, quando ci fu l'introduzione degli alettoni che resero gli aeroplani più facili da pilotare e, con l'inizio della Prima Guerra Mondiale, i velivoli più pesanti dell'aria divennero di uso pratico.

Gli eventi compresi tra il 1935 e il 1939 diedero ad alcune nazioni l'occasione di sperimentare nuovi aeroplani e nuove tecniche di combattimento. La tecnologia aeronautica e l'impiego bellico dell'aviazione negli anni 30' portarono allo sviluppo di diversi motori per l'aviazione : motori raffreddati ad aria, motori a getto, tra cui il turboelica e il turbogetto.



*Turboelica di Allison*

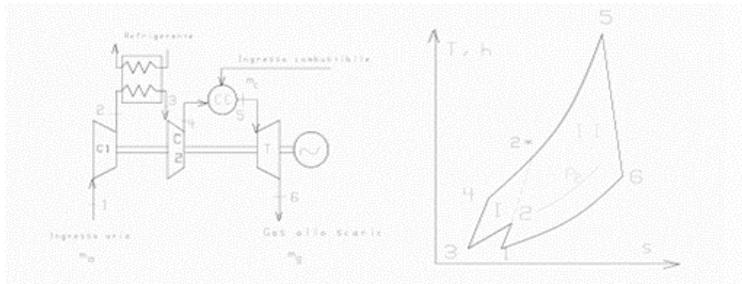


Concorde, aereo coprodotto da Francia e Inghilterra, attraversava l'Atlantico in sole 4 ore.



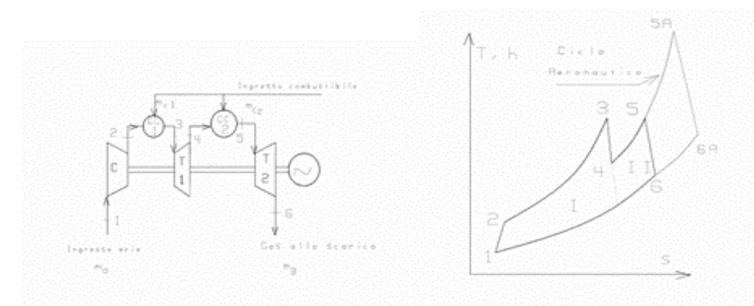
Boeing 747, aereo di linea, utilizzato nelle tratte a lungo raggio di avvio.

Dall'introduzione dei motori a reazione, l'industria aeronautica ha subito forti innovazioni, ma ad oggi produce ancora il 2% delle emissioni mondiali di CO<sub>2</sub>, deve quindi ridurre il suo impatto ambientale. Nell'ambito dell'ingegneria della propulsione i recenti successi della propulsione elettrica e dell'idrogeno sembrano essere la forza trainante di un'aviazione moderna e sostenibile, così come per rivoluzionare l'esplorazione e il trasporto spaziale. Importanti rinnovamenti sono anche l'utilizzo di cicli termodinamici ottimizzati e l'introduzione di velivoli bimotore.



Schema di turbogas e ciclo turbogas a compressione interrefrigeratoria.

I cicli termodinamici ottimizzati sono fondamentali per migliorare l'efficienza energetica e ridurre le perdite nei sistemi termici, incrementando le condizioni operative, come la temperatura e la pressione.



Schema di turbogas e ciclo turbogas con postcombustione.



Uno dei vantaggi più significativi dei velivoli bimotore è quello economico, che deriva dai risparmi in termini di efficienza e operazioni. I miglioramenti tecnici e regolamentari hanno spianato la strada all'avvento dei grandi bimotori, come il Boeing 777.

L'elaborato è prettamente descrittivo, si sofferma principalmente su una rappresentazione schematica, espone tramite immagini gli impianti e il funzionamento degli organi impiegati nella propulsione aeronautica. È bene però porre l'attenzione sui miglioramenti che possono essere apportati in campo aeronautico e spaziale, confrontando anche i mezzi che si hanno oggi a disposizione con ciò che invece veniva utilizzato in passato, cercare di capire quali sono le soluzioni da introdurre soprattutto per contenere l'inquinamento ambientale.

## Bibliografia

- La turbina a gas: tecnologie attuali e sviluppi futuri**, Emilio Minghetti, 1996.
- Fondamenti di termodinamica dell'Ingegneria Chimica**, Renato Rota.
- Le turbine a gas e i cicli combinati**, Giovanni Lozza.
- Lezioni di fisica tecnica**, Pierfrancesco Brunello, 2017.
- Guida alla turbina a gas per la propulsione aeronautica**, Delfo Bulleri.
- Propulsione aerospaziale**, Diego Lentini, dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale, Sapienza, Università di Roma.
- Storia ed evoluzione della propulsione aerea**, Giovanni Zizzi.
- Fondamenti di chimica**, P. Silvestrini, Masson, Roma, 1996.
- Dispense del corso di propulsione aerospaziale**, Francesco Nasuti, Diego Lentini, Fausto Gamma, 2004/2005.
- Selection of power plant elements for future reactor space electric power systems**, D. Buden, Los Alamos Scientific Laboratory, 1979.
- Principi di trasmissione del calore**, F. Kreith, Liguori editore, Napoli, 1991.
- Propulsione aerea**, Ernesto Benini, Padova, 2006.