



# UNIVERSITÀ DI PISA

---

## MOTORI PER AEROMOBILI E LABORATORIO DI PROPULSIONE AEROSPAZIALE

FABRIZIO PAGANUCCI

Anno accademico 2023/24  
CdS INGEGNERIA AEROSPAZIALE  
Codice 980II  
CFU 12

Moduli	Settore/i	Tipo	Ore	Docente/i
MOTORI PER AEROMOBILI E LABORATORIO DI PROPULSIONE AEROSPAZIALE	ING-IND/07	LEZIONI	120	FABRIZIO PAGANUCCI

### Obiettivi di apprendimento

#### Conoscenze

Il corso ha lo scopo di introdurre gli allievi alla propulsione aerospaziale in generale, e più in particolare a quella aeronautica con motori a turbina ed a pistoni, fornendo loro le nozioni basilari di termo-fluidodinamica e di tecnologia per la classificazione, descrizione e selezione dei motori, l'analisi quantitativa delle loro prestazioni in condizioni stazionarie e non stazionarie. Vengono illustrate le metodologie per il dimensionamento preliminare dei componenti (in particolare prese d'aria, compressori, eliche, camere di combustione, turbine ed ugelli di scarico). Il corso introduce inoltre le principali strategie di manutenzione e le tecniche di monitoraggio delle condizioni del motore. Durante le ore di laboratorio gli allievi, organizzati in gruppi, vengono guidati all'utilizzo di strumenti informatici per l'analisi parametrica delle prestazioni dei motori, la progettazione preliminare dei componenti, la realizzazione e prova di prototipi didattici.

#### Modalità di verifica delle conoscenze

Le conoscenze acquisite vengono verificate attraverso:

- lo svolgimento di esercizi numerici nel corso di una prova in itinere alla fine del primo semestre o comunque preliminare al colloquio;
- un colloquio individuale;
- una verifica dell'attività svolta nell'ambito del laboratorio.

#### Capacità

Alla fine del corso, lo studente dovrà essere in grado di:

- classificare, descrivere e selezionare i motori di impiego aerospaziale;
- analizzare quantitativamente le loro prestazioni in condizioni stazionarie e non stazionarie dei motori aeronautici;
- eseguire il dimensionamento preliminare dei componenti (in particolare prese d'aria, compressori ed eliche, camere di combustione, turbine ed ugelli di scarico).
- Utilizzare gli strumenti informatici acquisiti nel corso di studi per sviluppare modelli per lo studio delle prestazioni dei motori, il progetto dei componenti, la realizzazione e prova di prototipi didattici.

#### Modalità di verifica delle capacità

- Nelle prove in itinere o preliminari gli studenti sono chiamati a riconoscere schemi di motori o loro parti, impianti motore ecc.
- Inoltre vengono loro proposti esercizi numerici che devono essere svolti esaustivamente, in modo che si possa apprezzare il risultato finale in termini quantitativi.
- Nel colloquio individuale lo studente viene posto davanti a problemi aperti, dove deve dimostrare la capacità di applicare le nozioni acquisite in maniera olistica e critica.
- La verifica dell'attività di laboratorio ha lo scopo di valutare quanto lo studente sia in grado di utilizzare gli strumenti informatici con adeguata padronanza e la capacità di lavoro in gruppo.

#### Comportamenti



## UNIVERSITÀ DI PISA

Il corso intende introdurre lo studente alla propulsione aerospaziale ed aeronautica in particolare con un approccio ingegneristico, ovvero dove gli strumenti fisico-matematici sono utilizzati per la comprensione del funzionamento delle macchine, il calcolo delle prestazioni ed il loro dimensionamento.

Viene data enfasi sull'uso di modelli di ordine ridotto per la stima delle prestazioni ed il dimensionamento preliminare dei motori e delle sue parti.

### Modalità di verifica dei comportamenti

Nel corso delle prove di esame si valuta con attenzione la capacità critica dello studente verso i risultati numerici ottenuti.

### Prerequisiti (conoscenze iniziali)

- Tutti i contenuti dei corsi del primo anno del CdS.
- I contenuti del corso di Termodinamica Applicata e di Impianti Aeronautici del secondo anno del CdS.

### Indicazioni metodologiche

- Le lezioni frontali vengono prevalentemente svolte con l'ausilio di slide, integrate con la lavagna.
- Per alcuni argomenti, vengono proiettati filmati esplicativi.
- Il laboratorio è svolto in aula ed in aula informatica.
- Le esercitazioni in aula consistono dello svolgimento di alcuni problemi numerici, esplicativi degli argomenti trattati. I problemi sono analoghi a quelli proposti per lo studio personale ed all'esame. Gli esercizi svolti durante lo studio personale sono rivisti su richiesta durante le ore di ricevimento.
- Il laboratorio è finalizzato all'applicazione delle conoscenze informatiche acquisite dallo studente nel corso di laurea per la soluzione di problemi di propulsione aerospaziale, la progettazione di componenti, la realizzazione e prova di prototipi didattici.
- Se le condizioni lo consentono, viene svolta una esercitazione fuori sede presso un'officina di manutenzione di motori aeronautici (normalmente presso la 46sima Brigata Aerea).
- Tutto il materiale didattico utilizzato a lezione, ampiamente integrato da altro materiale tecnico e scientifico, inclusi siti web, filmati ecc. è messo a disposizione degli studenti tramite il sito elearning.
- Il sito elearning è utilizzato per tutte le comunicazioni agli studenti e la gestione degli esami.
- Il ricevimento settimanale è accessibile agli studenti senza prenotazione.
- Viene proposta una prova scritta intermedia inerente gli argomenti svolti nel primo semestre.

### Programma (contenuti dell'insegnamento)

#### Introduzione

Panoramica sulla propulsione aerospaziale. Richiami sull'atmosfera terrestre. Definizioni e classificazione dei propulsori aerospaziali. Cenni sui motori endotermici chimici ed elettrici. Moto del velivolo sul piano longitudinale. Definizione di spinta. Il turbogetto semplice. Descrizione dei moduli del motore. Configurazioni delle turbomacchine. Ciclo Brayton ideale. Il generatore di gas e classificazione delle turbomacchine di impiego aeronautico. Requisiti e vincoli dei motori per applicazioni civili. Generalità sui requisiti dei motori per applicazioni militari. Spinta specifica e rapporto spinta/peso. Post-combustione. Motori a doppio flusso. Rapporto di diluizione. Classificazione motori a doppio flusso. Generatori di coppia: schemi di turbo-alberi e turbo-eliche.

#### Nozioni fondamentali di termofluidodinamica

Formulazione integrale delle equazioni della termofluidodinamica (massa, quantità di moto, momento della quantità di moto, energia. Flusso stazionario unidimensionale in un condotto. Equazioni di stato termiche e caloriche. Fluido incompressibile: equazione di Bernoulli. Gas termicamente e caloricamente perfetti. Equazioni del flusso unidimensionale per un gas caloricamente perfetto. Definizione delle proprietà totali. Flusso isoentropico di un gas caloricamente perfetto in un condotto di aria variabile. Flussi alla Rayleigh ed alla Fanno. Ugelli di espansione. Ugelli conici ed a campana. Criteri di dimensionamento (cenni al metodo di Rao). Equazione calorica per gas termicamente perfetto e sviluppi. Equazioni di stato termica e calorica per gas reali. Fattore di comprimibilità. Diagramma di Mollier.

#### Prestazioni dei motori aeronautici

La spinta dei turbogetti e del turboelica. Potenza equivalente. Rendimento complessivo, rendimento termodinamico e rendimento di spinta. Formula di Breguet. Il rendimento termodinamico ed il lavoro specifico del ciclo Brayton ideale. Campi di applicazione ottimale dei motori a singolo e doppio flusso e dei turbo-elica. TSFC, BSFC, EBSFC.

#### Analisi termodinamica dei motori aeronautici

Prese d'aria subsoniche. Compressore. Camera di combustione: bilancio termico. Turbina. Ugelli di scarico. Bilancio meccanico. Rendimento politropico e legame con rendimento isoentropico. Trattamento degli spillamenti d'aria e potenza per ausiliari. Teorema di Buckingham. Variabili corrette. Esempi di mappe e loro utilizzo. Effetto dinamico. Schema dell'autoreattore.

#### Elementi di turbomacchine

Configurazioni delle turbomacchine e classificazione. Analisi termodinamica dello stadio. Analisi meccanica: momento torcente e potenza. (equazione di Eulero). Grado di reazione. Stadio compressore assiale. Nomenclatura. Teoria elementare: i triangoli delle



## UNIVERSITÀ DI PISA

velocità: casi notevoli. Flusso bidimensionale: fluidodinamica delle schiere. Coefficiente di pressione e fattore di diffusione. Flusso tridimensionale: criteri di dimensionamento di una paletta. Compressori radiali. Criteri di dimensionamento preliminare della girante di un compressore centrifugo. Flusso nello statore senza palette. Calcolo del rendimento isoentropico. Perdite nelle turbomacchine. Perdite di trafilamento. Problemi di stabilità nelle turbomacchine. Stallo e pompaggio. Analisi dimensionale applicata alle turbomacchine: mappe del compressore e della turbina. Funzionamento off-design. Matching compressore turbina. Sollecitazioni meccaniche nelle turbomacchine. Equilibratura degli alberi. Momento giroscopico. Velocità critiche degli alberi. Sollecitazioni meccaniche su dischi e palette. Diagramma di Campbell. Sollecitazioni termo-strutturali in turbina. Tecniche di raffreddamento attivo e passivo. Criteri di scalatura delle turbomacchine.

### Camere di combustione

Caratteristiche generali. Proprietà dei combustibili aeronautici. Deflagrazione e detonazione. Accensione e propagazione della fiamma. Configurazione generale di una camera di combustione aeronautica. Iniezione del combustibile. Atomizzazione: numero di Weber e di Ohnesorge. Weber critico. Ugelli di iniezione: a getto ed air blast, vorticolatore. Stabilizzazione della fiamma. Produzione di inquinanti, configurazioni (tubolare, anulare e cannulare). Perdite di pressione. Rendimento di combustione. Mappe della camera di combustione. Post-bruciatori.

### Eliche aeronautiche

Analisi dimensionale. Teoria impulsiva semplice. Teoria impulsiva generale. Il sistema vorticoso dell'elica. Teoria generale dell'elemento di pala. Curve caratteristiche. Configurazioni a passo fisso ed a passo variabile. Mappe dell'elica.

### Cenni sull'analisi dei regimi transitori dei motori aeronautici

Modello a parametri concentrati. Bilancio meccanico. Equazioni di bilancio di massa ed energia. Stima delle costanti di tempo. Esempio di manovre e di sequenza di avviamento motore.

### Impianti del motore

Sistemi di inversione della spinta. Impianto combustibile. Sistemi di controllo del motore. FADEC. Impianto lubrificazione. Impianto aria. Impianto indicazioni motore. Tecniche di misura e trasduttori: ruota fonica, termocoppie e termoresistenze, sonde di pressione, torsionmetro.

### Introduzione alle tecniche di manutenzione dei motori aeronautici

Nomenclature e definizioni: sicurezza, affidabilità, disponibilità e manutenibilità. Classificazione dei guasti. Cenni sulla teoria dell'affidabilità. Strategie manutentive (TBO, TBO a moduli, per condizione, ERAN). Tecniche di Engine Condition Monitoring. Ispezioni visive: il boroscopio. Trend Analysis. Gas Path Analysis. Tecniche di diagnostica dell'olio di lubrificazione.

### Motori a pistoni

Classificazione, schema. Nomenclatura e parametri fondamentali. Componenti del motore. Ciclo a quattro tempi. Sistema di distribuzione. Ciclo a due tempi. Analisi termodinamica: ciclo Otto e ciclo Diesel ideali. Rendimenti termodinamici ideali. Ciclo indicato e rendimento indicato. Diagramma delle pressioni. Rendimento organico. Potenza effettiva. Cinematica e meccanica del sistema manovella-biella-stantuffo.

Coppia motrice media. Grado di irregolarità del motore. Curve caratteristiche. Piano quotato dei consumi. Rendimento volumetrico. Diagramma della distribuzione. Effetto della quota. Fattore di potenza. Criteri di scelta del rapporto corsa/diametro. Immissione del combustibile. Schema del carburatore semplice. Carburatore ad iniezione. Schema motore ad iniezione diretta. Sovralimentazione. Curve di calibratura e loro utilizzo. Impianti motore.

### Bibliografia e materiale didattico

- P. G. Hill, C. R. Peterson, **"Mechanics and Thermodynamics of Propulsion"**, Addison-Wesley Publishing Company.
- J. L. Kerrebrock, **"Aircraft Engines and Gas Turbines"**, MIT Press.
- H. Cohen, G.F.C. Rogers, H.I.H. Saravanamuttoo, **"Gas Turbine Theory"**, Longman Group Limited.
- Rolls-Royce, **"The Jet Engine"**, Rolls-Royce Limited, Derby.
- D. Giacosa, **"Motori Endotermici"**, Editore Hoepli, Milano.
- Materiale didattico fornito dal docente su <http://elearn.ing.unipi.it>.

### Indicazioni per non frequentanti

I contenuti del corso sono ogni anno in parte rielaborati. Si consiglia di tenersi aggiornati sulle ultime versioni dei documenti a supporto delle lezioni tramite e-learn e consultando il docente.

E' molto importante integrare lo studio con lo svolgimento degli esercizi proposti, reperibili su e-learn.

### Modalità d'esame

- Prova (scritta) in itinere o preliminare al colloquio individuale. Sono proposti collettivamente due esercizi numerici più uno descrittivo. Lo studente è ammesso a proseguire con il colloquio solo se la prova ha avuto esito soddisfacente. La prova può



## UNIVERSITÀ DI PISA

---

essere ripetuta senza limitazioni.

- Colloquio individuale. Allo studente sono posti tre quesiti, alcuni nella forma di problemi aperti. Lo studente viene quindi lasciato da solo ad organizzare le risposte, che vengono quindi discusse con il docente.
- Verifica dell'attività di laboratorio. Alla fine del corso i gruppi di lavoro espongono quanto fatto tramite una presentazione in classe. Il contributo al lavoro di gruppo dei singoli studenti sarà oggetto di verifica nel colloquio individuale.

*Ultimo aggiornamento 19/09/2023 11:54*