



# UNIVERSITÀ DI PISA

---

## TERMODINAMICA APPLICATA

### SAURO FILIPPESCHI

Anno accademico	2023/24
CdS	INGEGNERIA AEROSPAZIALE
Codice	165II
CFU	6

Moduli	Settore/i	Tipo	Ore	Docente/i
FISICA TECNICA INDUSTRIALE	ING-IND/10	LEZIONI	60	SAURO FILIPPESCHI

#### Obiettivi di apprendimento

##### *Conoscenze*

Lo studente che completa con successo l'intero percorso di questo corso acquisirà una conoscenza dei principi, dei processi e dei concetti della termodinamica. Egli avrà una solida conoscenza dei principi fondanti della termodinamica e delle leggi fisiche alla base dei bilanci energetici. Egli sarà capace di mostrare adeguata conoscenza delle sostanze e delle miscele omogenee, rappresentandone le principali proprietà termodinamiche nei diversi stati di aggregazione della materia. Egli avrà una conoscenza teorica dei bilanci energetici delle principali macchine termiche. Egli sarà in grado di modellizzare il moto dei fluidi nei condotti sia per moti a bassa velocità che per quelli ad alta velocità. Avrà una conoscenza teorica dei principali cicli termodinamici dei motori termici (Aria e vapore) e delle macchine frigorifere. Conoscerà i concetti fondamentali dello scambio termico. Sarà in grado di modellizzare processi di scambio termico per conduzione, convezione e irraggiamento per corpi con geometria semplice.

##### *Modalità di verifica delle conoscenze*

Lo studente sarà valutato sulla sua capacità di discutere i maggiori contenuti del corso usando un linguaggio chiaro e una metodologia appropriata. Lo studente dovrà esporre con chiarezza i concetti generali del corso e deve essere abile di collegare differenti argomenti del corso da un punto di vista teorico.

Metodo:

- Esame finale: orale

##### *Capacità*

Lo studente che completerà il corso con successo sarà capace di eseguire un bilancio energetico di qualsiasi sistema termodinamico con una critica consapevole. Egli sarà abile di valutare l'impatto delle irreversibilità sui principali processi termodinamici e per le più importanti macchine termiche. Egli sarà in grado di predire le portate, le pressioni, le perdite di carico dinamico e le velocità all'interno di generici condotti (tubazioni, ugelli, canne fumarie...). Egli sarà in grado di valutare i rendimenti termodinamici e i fabbisogni energetici dei principali motori termici e delle macchine frigorifere. Lo studente sarà in grado di progettare preliminarmente e risolvere i più semplici problemi di scambio termico.

##### *Modalità di verifica delle capacità*

Lo studente sarà valutato oralmente sulla sua capacità di calcolare l'evoluzione e i principali scambi energetici di un processo termodinamico o di una macchina termica. Sarà inoltre valutato sulle capacità di calcolare le pressioni le velocità e le temperature di fluido all'interno di un condotto e in ultimo di risolvere un semplice problema di scambio termico.

Metodo:

Lo studente dovrà risolvere analiticamente tre diversi problemi (esercizi) durante il suo esame orale:

- Esercizio n 1: calcolare l'evoluzione e i principali scambi energetici di un processo termodinamico o di una macchina termica o di una macchina termica
- Esercizio n 2: calcolare le prestazioni di fluido all'interno di un condotto
- Esercizio n 3: risolvere un semplice problema di scambio termico

##### *Comportamenti*

Lo studente dovrà partecipare attivamente alle lezioni. Lo studente dovrà responsabilmente concludere i compiti assegnati durante il corso. Egli dovrà essere capace di analizzare i problemi in autonomia e di proporre soluzioni che da discutere in gruppi di lavoro. Egli dovrà adattare il proprio comportamento alla risoluzione dei diversi problemi tecnici incontrati durante il corso.



## UNIVERSITÀ DI PISA

### *Modalità di verifica dei comportamenti*

Lo studente sarà valutato sulla sua capacità di partecipare attivamente alle lezioni (chiedendo dettagli, individuando eventuali errori nei materiali didattici, commentando le soluzioni proposte dal docente e in ultima istanza, calcolare in autonomia i principali parametri tecnici dell'esercitazioni pratiche).

### **Prerequisiti (conoscenze iniziali)**

Analisi matematica: Siano appresi i concetti di: funzione (anche a più variabili), limite, derivata, integrale, Trigonometria, Equazioni differenziali lineari.

Fisica: Misura delle grandezze fisiche e unità di misura. analisi dimensionale. Principi ed equazioni fondamentali della meccanica. Energia.

Algebra: Grandezze scalari e vettoriali. Elementi fondamentali del calcolo vettoriale.

### **Indicazioni metodologiche**

Lezioni frontali (60 ore).

Frequenza: raccomandata

### **Programma (contenuti dell'insegnamento)**

#### **Termodinamica dei sistemi**

Definizioni di sistema termodinamico. Lo stato di equilibrio termodinamico e il postulato di stato. I principali parametri di stato e le loro unità di misura. I parametri intensivi: pressione, temperatura e le grandezze specifiche. I parametri estensivi: massa e volume. Il concetto di trasformazione e di reversibilità della trasformazione. Il calore e la sua trasmissione. Il principio zero della termodinamica. Il calore specifico. Il lavoro di trasformazione e quello continuo. Il regime permanente. Il lavoro meccanico e il lavoro di pulsione.

Il primo principio della termodinamica. L'energia interna e l'entalpia. Il primo principio della termodinamica nei sistemi aperti. Definizione di volume di controllo. Schematizzazione di sistemi aperti ed applicazione del primo principio per: scambiatori di calore, turbine e compressori, camini, etc.

I serbatoi di energia ed i motori termici. I processi ciclici. Le macchine per la produzione di lavoro e le macchine frigorifere. Il secondo principio della termodinamica. I due enunciati di Kelvin-Thompson e di Clausius. Concetto di rendimento termico di cicli diretti. Il COP per le macchine frigorifere e per le pompe di calore. Traformazioni irreversibili e reversibili.

Il ciclo di massimo rendimento: il ciclo di Carnot. La scala termodinamica assoluta della temperatura. Il rendimento del ciclo di Carnot. La macchina frigorifera e la pompa di calore operanti secondo un ciclo di Carnot inverso. La diseguglianza di Clausius. Definizione di entropia. L'entropia di un sistema isolato. Il bilancio di entropia di un sistema chiuso. Il bilancio di entropia di un sistema aperto.

Le principali trasformazioni termodinamiche: adiabatica, isoterma, isovolumica, isobara e politropica. Calcolo del lavoro continuo e del calore per le principali trasformazioni termodinamiche reversibili per i gas perfetti, per i vapori, per i solidi ed i liquidi.

La compressione e l'espansione politropica. Il rendimento isoentropico.

#### **Proprietà dei fluidi**

Le proprietà delle sostanze pure. Le fasi di una sostanza. Il punto triplo ed il punto critico. La fase aeriforme: l'equazione di stato dei gas perfetti. Le gas tables and i gas con calori specifici variabili con la temperatura. I gas reali e il fattore di compressibilità.

I vapori e le tabelle dei vapori saturi. I diagrammi di stato per trasformazioni con cambiamento di fase. I diagrammi di stato. Il diagramma p-v, T-S, I-S.

Determinazione dello stato fisico nel caso di vapori, gas, liquidi e solidi.

#### **Fluidodinamica di base**

L'equazione di Bernoulli generalizzata, richiami dell'equazioni di continuità, della conservazione dell'energia e della quantità di moto. Moto isoentropico in condotti a sezione variabile: trattazione di Hugoniot. Il diffusore, l'iniettore e l'ugello. La velocità del suono e il numero di Mach. Moto isoentropico per gas perfetti all'interno di ugelli. Stima delle proprietà termodinamica nella sezione critica. Comportamento di un ugello di De Laval.

Il moto nei condotti a velocità moderata. Le perdite di carico nei condotti: lineari and concentrate.

Il moto turbolento e il moto laminare, il caso dei condotti e la trattazione di Poiseuille. Il fattore di attrito e la sua determinazione attraverso la trattazione adimensionale (Numero di Reynolds e rugosità relativa). Il diagramma di Moody e Rouse.

#### **I processi ciclici per le macchine termiche**

I processi ciclici. L'uso del ciclo di Carnot come ciclo comparativo. I cicli ad aria di motori a combustione interna di tipo alternativo: il ciclo Otto. Calcolo del rendimento.

Il Ciclo Diesel. Calcolo del rendimento termodinamico e confronti con il ciclo Otto. Il ciclo Sabathè.

Il ciclo Brayton come ciclo ideale per i cicli con turbine a gas. Metodi per aumentare il rendimento di un ciclo Brayton: la rigenerazione di calore, la compressione e l'espansione frazionata. Effetti delle irreversibilità. I cicli dei motori a reazione.

Il ciclo di Carnot nei vapori saturi. Il ciclo di Rankine: calcolo del rendimento ed utilizzo sia del diagramma che delle tabelle. Il ciclo di Hirn di base, con spillamento e con surriscaldamento.

Le macchine frigorifere e le pompe di calore. Il ciclo di Carnot inverso, il Brayton inverso, il ciclo Joule umido e asciutto: calcolo del COP.

#### **Trasmissione del calore**



## UNIVERSITÀ DI PISA

I tre modi di trasmissione del calore: Il postulato di Fourier, l'equazione di Newton e l'equazione di Stephan Boltzmann. L'equazione di Fourier-Kirchoff.

L'equazione per la parete piana in regime stazionario. La conducibilità termica. L'analogia elettrica, la resistenza elettrica e le reti elettriche equivalenti. La parete piana con generazione interna di calore. Sistemi in transitorio. Il metodo a parametri concentrati.

Meccanismo fisico della convezione. Il caso della parete piana. Lo strato limite dinamico e quello termico. Il moto turbolento e quello laminare. I gruppi adimensionali per la convezione forzata: il numero di Reynolds, il numero di Prandtl, il numero di Nusselt, il numero di Graetz. Alcune correlazioni sperimentali per la parete piana e per il flusso interno ai condotti. La convezione naturale. Il numero di Grashof e quello di Rayleigh.

Il corpo nero. Il potere emissivo monocromatico del corpo nero. La legge di Wien e quella di Stephan-Boltzmann. I corpi reali e i corpi grigi. L'emissività. Comportamento di un corpo alla radiazione incidente. I coefficienti di assorbimento, trasmissione e riflessione. La legge di Kirchoff. La potenza termica scambiata tra due corpi neri. Il fattore di vista e il teorema di reciprocità. Lo scambio termico tra corpi grigi e le reti resistive equivalenti.

### Bibliografia e materiale didattico

- J Moran, H.N. Shapiro, B.R. Munson, D.P. DeWitt, Elementi di Fisica Tecnica per l'ingegneria, McGraw-Hill, 2003.
- A. Cengel, Termodinamica e Trasmissione del Calore, McGraw-Hill, 1998.
- Latrofa, Fisica Tecnica - Termodinamica, Andrea Vallerini Editore, Pisa, 1994.
- Cavallini e L. Mattarolo, Termodinamica Applicata, CLEUP, Padova, 1992.
- Bonacina, A. Cavallini e L. Mattarolo, Trasmissione del calore, CLEUP, Padova, 1975.
- Latrofa, F. Fantozzi, A. Franco, Esercizi di termodinamica applicata, Andrea Vallerini Ed., Pisa, 2000.
- Boeche, A. Cavallini e S. Del Giudice, Problemi di Termodinamica Applicata, CLEUP, Padova, 1992.
- Schaum Electronic Book, Thermodynamics (un libro elettronico interattivo, scritto in Mathcad).
- Teaching materials supplied by the professor

### Indicazioni per non frequentanti

Contattate direttamente il professore

### Modalità d'esame

Orale

### Note

#### Istruzioni ed informazioni per Student stranieri Erasmus.

Il docente è disponibile a fornire materiale didattico, ricevimenti e supporto sia in lingua italiana che in lingua inglese.

Le lezioni sono in lingua italiana, tuttavia il docente è disponibile a fornire approfondimenti in lingua inglese anche durante le lezioni ordinarie se richieste dallo studente.

Le modalità di esame per gli studenti Erasmus saranno concordate con lo studente stesso. Nonostante che l'esame sia orale, il docente è disponibile a preparare un test a risposta multipla che sarà svolto dallo studente e commentato insieme al professore durante l'esame stesso.

Ultimo aggiornamento 02/11/2023 12:27