



# UNIVERSITÀ DI PISA

---

## TECNOLOGIE E LABORATORIO DI SIMULAZIONE DI IMPIANTI AERONAUTICI

**ROBERTO GALATOLO**

Anno accademico **2022/23**  
CdS **INGEGNERIA AEROSPAZIALE**  
Codice **981II**  
CFU **12**

Moduli	Settore/i	Tipo	Ore	Docente/i
LABORATORIO DI SIMULAZIONE DEGLI IMPIANTI AERONAUTICI	ING-IND/05	LABORATORI	60	GIANPIETRO DI RITO
TECNOLOGIE DEGLI IMPIANTI AERONAUTICI	ING-IND/05	LEZIONI	60	ROBERTO GALATOLO

### Obiettivi di apprendimento

#### *Conoscenze*

L'obiettivo del corso è di fornire strumenti e metodi di base per la comprensione e l'analisi del funzionamento dei principali sistemi utilizzati a bordo dei velivoli per la generazione, la trasformazione, la regolazione, il trasporto e l'impiego di energia e informazioni. Tutti i sistemi oggetto di studio vengono illustrati in termini di architettura tipica e principio di funzionamento, e per alcuni di essi vengono presentate tecniche di dimensionamento preliminare, mediante modelli analitici di ordine ridotto. Parti specifiche del corso sono inoltre dedicate all'analisi di affidabilità/sicurezza degli impianti, nonché allo sviluppo di codici numerici di simulazione per lo studio della dinamica dei sistemi.

#### *Modalità di verifica delle conoscenze*

Le conoscenze acquisite dallo studente saranno verificate mediante una prova orale, nella quale sarà valutata la capacità di discutere i contenuti principali del corso utilizzando la terminologia tecnica appropriata, nonché di presentare ed illustrare architetture e principi di funzionamento dei sistemi.

Nel corso della prova orale, lo studente potrà (facoltativamente) presentare una breve relazione tecnica sullo sviluppo di un codice numerico di simulazione dinamica di un impianto.

#### *Capacità*

Alla fine del corso lo studente sarà in grado di:

- descrivere ed analizzare il funzionamento dei principali sistemi di bordo dei velivoli;
- valutare il livello di affidabilità/sicurezza di un sistema;
- sviluppare codici numerici per la simulazione di sistemi dinamici

#### *Modalità di verifica delle capacità*

Durante il corso, verranno svolte esercitazioni pratiche e di laboratorio con PC mirate all'applicazione di metodi e tecniche per:

- l'analisi di funzionamento e il dimensionamento preliminare di sistemi di bordo
- la definizione di architettura di sistemi con componenti ridondanti
- il calcolo della probabilità di guasto (funzionamento) dei sistemi
- lo sviluppo di codici numerici per la simulazione di sistemi dinamici

#### *Comportamenti*

Alla fine del corso lo studente sarà in grado di:

- affrontare problematiche di progetto in ottica multidisciplinare;
- confrontare diverse soluzioni tecnologiche nel progetto di un sistema;
- valutare l'impatto dei requisiti di affidabilità/sicurezza sull'architettura di un sistema;
- lavorare in un team di progetto.

#### *Modalità di verifica dei comportamenti*



## UNIVERSITÀ DI PISA

Il corretto approccio alla materia verrà verificato soprattutto nel corso delle esercitazioni pratiche e, con particolare riferimento alle esercitazioni di laboratorio con PC, verrà inoltre valutata la propensione degli studenti al lavoro di gruppo: verranno infatti proposti, a gruppi di 3-5 studenti, una serie di problemi di dimensionamento preliminare di impianti, da risolvere mediante lo sviluppo di codici numerici di simulazione dinamica. Al termine del lavoro (il cui svolgimento è facoltativo), gli studenti elaboreranno una breve relazione tecnica da discutere nel corso della prova orale finale.

### Prerequisiti (conoscenze iniziali)

Per una efficace fruizione dei contenuti del corso, sono richieste conoscenze di base di

- Analisi Matematica
- Disegno Tecnico Industriale
- Fisica (Meccanica, Termodinamica ed Elettromagnetismo)

### Programma (contenuti dell'insegnamento)

Il corso è strutturato in due moduli: il primo (Tecnologie degli Impianti Aeronautici) è maggiormente dedicato a lezioni teoriche, mentre il secondo (Laboratorio di Simulazione di Impianti Aeronautici) prevede anche esercitazioni in laboratorio con PC, nelle quali sono presentati ed applicati metodi, strumenti e tecniche per lo sviluppo di codici numerici di simulazione dinamica.

#### Modulo: TECNOLOGIE DEGLI IMPIANTI AERONAUTICI

##### NOZIONI INTRODUTTIVE

**Meccanica dei fluidi:** definizioni, fluido viscoso e fluido non viscoso. Impostazione del problema aerodinamico. Concetto di strato limite. Numero di Reynolds. Altezza dello strato limite. Moto unidimensionale: equazione di conservazione della massa, equazione di bilancio dell'energia. Aerodinamica dei profili: meccanismi di generazione della portanza. Principali fonti di generazione della resistenza aerodinamica. Separazione dello strato limite. Forma e nomenclatura dei profili aerodinamici. Effetti dell'incidenza. Caratteristiche aerodinamiche dei profili: coefficiente di portanza e di resistenza. Fenomeno dello stallo.

**Meccanica del Volo:** architettura e nomenclatura dei velivoli convenzionali da trasporto civile. Volo livellato stazionario: condizioni di equilibrio e di stabilità. Equilibrio in beccheggio. Stabilità in beccheggio. Disposizione delle superfici portanti per configurazioni stabili in beccheggio: velivolo con due superfici portanti (ala e coda orizzontale). Superfici mobili dei comandi primari di volo. Manovra di cabrata e salita.

**Controlli Automatici:** definizione di sistema, segnali di ingresso e di uscita, segnali di disturbo. Rappresentazione simbolica dei sistemi. Controllo in ciclo aperto e in ciclo chiuso.

##### AFFIDABILITA' E SICUREZZA

Definizioni. Funzioni di distribuzione della densità dei guasti. Schematizzazione a blocchi dei sistemi per la valutazione della affidabilità. Teoremi della probabilità composta, della probabilità totale, di Bayes. Modelli affidabilistici *Stand-By*. Effetto combinato di avarie casuali e per usura. Sicurezza. Test di significatività e di bontà del *best-fit*. Albero dei guasti.

##### STRUMENTI DI VOLO

**Strumenti a capsula.** Altimetro: principio di funzionamento, errori di pressione e di temperatura, regolazioni QFE, QNH e QNE. Anemometro: funzionamento ed errori, velocità IAS, CAS, EAS e TAS. Variometro: funzionamento ed errori.

**Strumenti magnetici.** Magnetismo terrestre, declinazione e inclinazione magnetica. Errori della bussola. Effetto dei ferri di bordo e relativa compensazione.

**Strumenti giroscopici.** Proprietà del giroscopio meccanico. Precessione apparente e da trasporto. Direzionale e orizzonte artificiale.

##### IMPIANTO ANTIGHIACCIO

Meccanismi di formazione del ghiaccio e conseguenze sulla sicurezza del volo. Analisi della normativa. Antighiaccio aerotermico, elettrico e pneumatico a membrane pulsanti. Controllo dei sistemi antighiaccio.

##### IMPIANTI PER LA CONVERSIONE E LA DISTRIBUZIONE DI ENERGIA

**Impianto elettrico:** requisiti generali, impianti a corrente continua e alternata, utilizzatori. Principio di funzionamento dell'alternatore e della dinamo. Regolazione. Parallelo di dinamo. Generatori Brushless. Gruppi inverter e raddrizzatori. Distribuzione dell'energia elettrica a bordo, schemi tipici.

**Impianto oleodinamico:** principi di funzionamento, pompe idrauliche, distribuzione. Attuatori lineari e rotanti. Perdite di carico distribuite e concentrate. Valvole di distribuzione, di sequenza, fusibili, di non ritorno, regolatrici di pressione, regolatrici di portata. Accumulatori idraulici. Simbologia unificata.

##### SISTEMI DI ATTUAZIONE

**Attuazione potenziata:** schemi per tipi reversibile e irreversibile; principio di funzionamento dei trim tab, sensibilità di manovra e pilotabilità.

**Attuazione servoidraulica:** componenti essenziali e principio di funzionamento del controllo del moto con "feedback elettrico".

**Sistemi Fly-By-Wire:** Architettura generale e vantaggi rispetto ai sistemi tradizionali. Funzioni di protezione dell'involuppo di volo e di aumento prestazioni. Ruolo dei sensori dati-aria e dei sensori inerziali.

#### Modulo: LABORATORIO DI SIMULAZIONE DI IMPIANTI AERONAUTICI

##### IMPIANTI PER LA CONVERSIONE E LA DISTRIBUZIONE DI ENERGIA

**Fondamenti di idrodinamica:** equazione di stato dei fluidi idraulici; bulk modulus, viscosità dinamica e viscosità cinematica; bilancio di massa; equazioni di orifizio e perdite di carico distribuite; bilancio dell'energia (casi notevoli di applicazione: pompe, attuatori, valvole, tubazioni).

**Impianto oleodinamico:** Definizione dell'architettura; analisi in fase stazionaria e quasi-dinamica (dimensionamento/selezione martinetti, tubazioni, valvole; verifica prestazioni, dimensionamento/selezione di accumulatori idraulici); analisi in fase transitoria e modellazione dinamica; transitori di pressione nei condotti ("colpo d'ariete").

##### SISTEMI DI ATTUAZIONE

**Attuazione servoidraulica:** Modulazione della velocità di attuatori idraulici: attuazione a velocità costante; problematiche di regolazione della velocità di movimentazione in impianti con più attuatori; valvole regolatrici di portata proporzionali e servovalvole. Servovalvola "flapper-nozzle" (Electro-Hydraulic servoValves, EHV) senza retrazione meccanica: funzionamento dello stadio elettrico (*torque-motor*); descrizione del funzionamento e modellazione dinamica del circuito idraulico d'attuazione del cassetto di distribuzione (modello ridotto e modello dettagliato); esempio di risposta dinamica del sistema ad un comando a gradino di corrente. EHV con retrazione meccanica: descrizione del funzionamento

## UNIVERSITÀ DI PISA

del circuito idraulico di attuazione del cassetto di distribuzione. Servovalvola ad azionamento diretto (Direct-Drive Valve, DDV): principio di funzionamento; vantaggi e svantaggi rispetto alle EHV. Trafilamenti in servovalvole a quattro vie; modulazione di potenza idraulica nella servovalvola: guadagno di pressione e guadagno di portata; dinamica del martinetto; attriti e perdite di portata; curve pressione-portata di un attuatore servoidraulico; bilancio dell'energia e dissipazione di potenza; leakage flow di servovalvola.

### **AFFIDABILITÀ E SICUREZZA**

**Diagramma a Blocchi d'Affidabilità e Albero dei Guasti:** analisi RBD e FTA di sistemi a molteplice ridondanza; ridondanza "attiva", "passiva" (componenti in stand-by e pezzi di ricambio) e "anomala"; applicazione teoremi di base (probabilità composta e totale), teorema di Bayes, modello binomiale, distribuzione di Poisson; calcolo probabilità di guasto di sistema mediante FTA; problemi derivanti da modi comuni di guasto; metodo dei tagli.

**Affidabilità di Sistemi Safety-Critical:** Monitoraggio di stato di un sistema; diagnosi e compensazione dei guasti in FCS-FBW (guasti rilevabili in modo diretto, guasti rilevabili per confronto, guasti non rilevabili); attuatori servoidraulici fault-tolerant con ridondanza elettrica ed idraulica: architettura FTA; albero dei guasti di un FCS-FBW.

### **CARRELLI E SISTEMI D'ATTEGGIO**

**Carrelli:** Funzioni, architetture e componenti principali; articolazioni e cinematismi di movimentazione gamba carrello; confronto fra configurazioni con carrello ausiliario anteriore e posteriore; carichi in fase di decollo, atterraggio e rullaggio.

**Ammortizzatori:** Generalità e definizioni di base; soluzioni tecnologiche; curva carico-corsa ed efficienza energetica; strategie per il miglioramento delle prestazioni (strozzatura variabile con spina calibrata, strozzatura differenziale e doppio pistone flottante); modellazione dinamica di un ammortizzatore oleopneumatico; dimensionamento preliminare per condizioni statiche; analisi della dinamica del sistema.

**Freni:** funzioni, architetture e componenti principali; fattori di incertezza nel progetto; dissipazione energetica ed aumento di temperatura; coppia frenante in un pacco dischi; freni in acciaio e freni in carbonio; sistemi anti-skid MARK I, II, III, IV e V (componenti principali e principio di funzionamento; modulazione di pressione in una servovalvola freno); dimensionamento preliminare di un pacco dischi.

### **SIMULAZIONE NUMERICA DELLA DINAMICA DI SISTEMI**

**Generalità: definizione problemi ODE; metodi di integrazione numerica; sviluppo di un codice di simulazione.**

**Introduzione a MATLAB:** interfaccia utente; generazione dati e grafici; operazioni matematiche di base; costrutti logici e cicli iterativi di calcolo.

**Laboratorio di Simulazione:** esempi applicativi mediante l'uso di MATLAB per la simulazione numerica della dinamica di impianti (effetto dei parametri di simulazione sull'accuratezza dei risultati; stima degli errori numerici; uso della simulazione numerica per il progetto di componenti/sistemi).

### **Bibliografia e materiale didattico**

- Materiale didattico fornito dai docenti (<https://elearn.ing.unipi.it/>)
- "Affidabilità, sicurezza e manutenzione nel progetto dei sistemi", Chiesa S., CLUT, 1990
- "Impianti di bordo per aeromobili", Vol. 1: Impianto idraulico; Vol. 2: Impianto elettrico; Vol. 4: Impianti pneumatico, condizionamento, anti-ghiaccio e APU, Chiesa S., CLUT, 1987-1993.
- "Strumenti e navigazione: corso per la preparazione alle licenze di pilota commerciale, al diploma di perito aeronautico", Trebbi R., Aviabooks, 1995
- "Impianti aeronautici", Vol. 1/I: Impianti di bordo Vol. 3: Impianti per l'assistenza al volo Vol. 4: Elementi di affidabilità e controllo di qualità, Vagnarelli F., Istituto Bibliografico Napoleone, 1991-1992
- "Hydraulic Control Systems", Merritt H.E., Wiley, 1967
- "Practical Reliability Engineering", O'Connor, P. D. T., Wiley, 1985
- "Aircraft hydraulic systems: an introduction to the analysis of systems and components", Green Chichester et al., Wiley, 1985
- "L'oleodinamica: principi, componenti, circuiti" Speich H., Bucciarelli A., Tecniche nuove, 1988
- "Aircraft landing gear design: principles and practices", Currey N. S., AIAA, 1988
- "Aircraft Electrical Systems", Pallet E. H. J., Prentice Hall
- "Aircraft Electricity and Electronics", Eismann et al., Mc Graw Hill

### **Modalità d'esame**

L'esame consiste in una prova orale finale da sostenere col docente del corso e con i suoi collaboratori, durante la quale vengono formulate allo studente una serie di domande volte a verificare le conoscenze maturate, le capacità acquisite e l'approccio alle problematiche della materia.

Facoltativamente, lo studente potrà presentare una breve relazione tecnica sullo sviluppo di un codice numerico di simulazione dinamica di un impianto, ottenuta come risultato del lavoro di gruppo assegnato nel corso delle esercitazioni in laboratorio con PC.

La durata dell'esame è mediamente di un'ora.

L'esame è superato positivamente se lo studente risponde positivamente a tutte le domande formulate.

La votazione è espressa in trentesimi (18 è il punteggio minimo per superare l'esame).