

**Guide ai programmi  
dei corsi 1995/96**

**POLITECNICO DI TORINO**



**Ingegneria nucleare**

Le *Guide* sono predisposte sulla base dei testi forniti dai Consigli di settore, di corso di laurea o di facoltà.

## I Facoltà di ingegneria

*Preside:* prof. Pietro Appendino

### *Corso di laurea*

Ingegneria aeronautica  
Ingegneria per l'ambiente e il territorio  
Ingegneria chimica  
*Settore civile/edile:*  
    Ingegneria civile  
    Ingegneria edile  
Ingegneria elettrica  
Ingegneria gestionale  
*Settore dell'informazione:*  
    Ingegneria delle telecomunicazioni  
    Ingegneria elettronica  
    Ingegneria informatica  
Ingegneria dei materiali  
Ingegneria meccanica  
Ingegneria nucleare

### *Presidente (coordinatore)*

Prof. Gianfranco Chiocchia  
Prof. Antonio Di Molfetta  
Prof. Vito Specchia  
Prof. Giovanni Barla  
    Prof. Giovanni Barla  
    Prof. Secondino Coppo  
Prof. Roberto Napoli  
Prof. Agostino Villa  
Prof. Paolo Prinetto  
    Prof. Mario Pent  
    Prof. Carlo Naldi  
    Prof. Paolo Prinetto  
Prof. Carlo Gianoglio  
Prof. Rosolino Ippolito  
Prof. Evasio Lavagno

## II Facoltà di ingegneria (sede di Vercelli)

*Preside:* prof. Antonio Gugliotta

### *Corso di laurea*

Ingegneria civile  
Ingegneria elettronica  
Ingegneria meccanica

### *Coordinatore*

Prof. Riccardo Nelva  
Prof. Luigi Ciminiera  
Prof. Maurizio Orlando

**L'edizione 1995/96 delle *Guide ai programmi*.** Per esplicita richiesta del *Comitato paritetico per la didattica*, questa edizione si basa su una pressoché completa riscrittura dei testi da parte dei docenti, nell'intento di dare maggiori dettagli sui contenuti e lo svolgimento dei singoli insegnamenti. L'insieme delle *Guide* assomma ora ad oltre 2000 pagine, costituendo una ricca fonte d'informazione sull'offerta didattica; nonostante la massima cura posta nell'edizione, inevitabili sono sviste ed errori residui, ed il CIDEM è fin d'ora grato a docenti e studenti che vorranno segnalargli.

Edito a cura del CIDEM

Centro Interdipartimentale di Documentazione e Museo del Politecnico di Torino

Corso Duca degli Abruzzi 24 – 10129 Torino  
Tel. 011.564'6601 – Fax 011.564'6609 – e-mail cid@polito.it

Stampato nel mese di novembre 1995

Litografia Geda – Via Villa Glori 6 – Torino

## Indice

5	Presentazione
	Programmi degli insegnamenti
13	obbligatoria
57	d'orientamento
103	Tavola alfabetica dei docenti
107	Tavola alfabetica degli insegnamenti

**Le Guide ai programmi dei corsi di laurea in ingegneria.** Scopo fondamentale dei presenti opuscoli è quello di orientare gli studenti nella scelta dei piani di studio. In un momento particolarmente arduo di riforma e di scelte di sviluppo dell'assetto universitario, gli studenti devono poter decidere con il massimo della chiarezza, per potersi adeguare alle innovazioni, ed eventualmente anno per anno farsi ragione e modificare le scelte a seguito delle più specifiche verifiche attitudinali.

Nel 1995/96 sono attivati a Torino tredici corsi di laurea (elenco alla pagina a fronte). Per permettere l'approfondimento di competenze metodologiche e di tecniche progettuali realizzative e di gestione in particolari campi, i corsi di laurea possono essere articolati in indirizzi ed orientamenti. Dell'*indirizzo* eventualmente seguito viene fatta menzione nel certificato di laurea, mentre gli *orientamenti* corrispondono a differenziazioni culturali, di cui invece non si fa menzione nel certificato di laurea; gli orientamenti vengono definiti annualmente dai competenti *Consigli dei corsi di laurea*, e ne viene data informazione ufficiale mediante il *Manifesto degli studi*. Nelle pagine di queste *Guide*, di ciascun corso di laurea viene data una breve descrizione, e viene illustrato il programma di attuazione degli orientamenti previsti per ogni indirizzo.

**Gli insegnamenti.** Il nuovo ordinamento didattico<sup>1</sup> prevede diversi tipi di insegnamenti, distinti in monodisciplinari, monodisciplinari a durata ridotta (nel seguito indicati come corsi ridotti), e integrati. Un *insegnamento monodisciplinare* è costituito da 80-120 ore di attività didattiche (lezioni, esercitazioni, laboratori, seminari ecc.) e corrisponde ad una unità didattica o annualità. Un *corso ridotto* è costituito da 40-60 ore di attività didattiche e corrisponde a mezza annualità. Un corso integrato è costituito da 80-120 ore di attività didattiche e corrisponde ad una annualità; esso è svolto - in moduli coordinati di almeno 20 ore ciascuno - da due o, al massimo, tre professori che fanno tutti parte della commissione d'esame.

Ogni corso di laurea corrisponde a 29 annualità complessive, ripartite, in ognuno dei cinque anni di corso, su due *periodi didattici* (detti anche impropriamente semestri); ogni periodo didattico è di durata pari ad almeno 13 settimane effettive di attività.

<sup>1</sup> Decreto rettorale 1096 del 1989-10-31, pubblicato sulla *Gazzetta ufficiale* n. 45 del 1990-02-23.

Un'altra novità introdotta dal DPR 20 maggio 1989<sup>2</sup> è costituita dal fatto che non sono prescritti specifici insegnamenti (almeno a livello nazionale) per il conseguimento della laurea in un determinato corso di laurea in Ingegneria, ma sono prescritti i numeri minimi di unità didattiche da scegliere in determinati raggruppamenti disciplinari consistenti in *gruppi*<sup>3</sup> di discipline affini. Lo stesso nuovo Statuto stabilisce l'articolazione dei vari corsi di laurea in termini di *gruppi* e di *unità didattiche*, cosicché ogni Consiglio di corso di laurea può più facilmente adeguare annualmente il piano degli studi alle nuove esigenze richieste dal rapido evolversi delle conoscenze e degli sviluppi tecnologici. Perciò ogni anno i vari Consigli dei corsi di laurea stabiliscono gli insegnamenti ufficiali, obbligatori e non obbligatori, che costituiscono le singole annualità, e le norme per l'inserimento degli insegnamenti non obbligatori, eventualmente organizzati in orientamenti.

Tutte queste informazioni e norme vengono pubblicate ogni anno nel *Manifesto degli Studi* (v. *Guida dello studente*, pubblicata a cura del Servizio studenti).

**Finalità e organizzazione didattica dei vari corsi di laurea.** Le pagine di queste *Guide* illustrano per ognuno dei corsi di laurea attivati – ed eventualmente per ognuno dei rispettivi indirizzi attivati – le professionalità acquisibili dai laureati, nonché il concetto ispiratore dell'organizzazione didattica, fornendo tracce schematiche di articolazione delle discipline obbligatorie ed esemplificazioni relative ai corsi facoltativi, organicamente inquadrabili nei vari *curricula* accademici.

Ogni corso di laurea (tranne rarissime eccezioni) ha previsto in prima attuazione l'organizzazione di tutti i corsi in periodi didattici. Per quanto concerne l'organizzazione didattica e l'attribuzione dei docenti agli insegnamenti, si segnala ancora che:

- alcuni corsi di laurea introducono già al terzo anno una scelta di corsi di indirizzo o di orientamento, che richiedono la formulazione di un'opzione fra le scelte segnalate: tali opzioni vanno esercitate all'atto dell'iscrizione;
- in relazione a talune difficoltà, che possono verificarsi all'atto dell'accorpamento di taluni CL per le discipline di carattere propedeutico (del primo e secondo anno), non è assicurata la corrispondenza dei docenti indicati con gli effettivi titolari di dette discipline. In alcuni casi, non essendo noto al momento della stampa delle *Guide*, il nome del docente è stato lasciato indeterminato ("Docente da nominare").

**L'edizione 1995/96 delle *Guide ai programmi*.** Per esplicita richiesta del *Comitato paritetico per la didattica*, questa edizione si basa su una pressoché completa riscrittura dei testi da parte dei docenti, nell'intento di dare maggiori dettagli sui contenuti e lo svolgimento dei singoli insegnamenti. L'insieme delle *Guide* assomma ora ad oltre 2000 pagine, costituendo una ricca fonte d'informazione sull'offerta didattica; nonostante la massima cura posta nell'edizione, inevitabili sono sviste ed errori residui, ed il CIDEM è fin d'ora grato a docenti e studenti che vorranno segnalarli.

<sup>2</sup> Pubblicato sulla *Gazzetta ufficiale* n. 186 del 1989-08-10.

<sup>3</sup> Questi *gruppi* coincidono con quelli dei raggruppamenti concorsuali per i professori universitari.

Corso di laurea in

# Ingegneria nucleare

## Profilo professionale

La laurea in ingegneria nucleare fa riferimento a tutte le applicazioni pacifiche dei processi nucleari, in particolare alla produzione di energia ottenuta con reazioni nucleari di fissione o di fusione. Si tratta di fenomeni fisici complessi che richiedono sistemi adeguati per essere sfruttati in modo sicuro ed economicamente competitivo. Pertanto la formazione dell'ingegnere nucleare richiede l'approfondita conoscenza di numerose discipline, dalla matematica, dalla fisica e dalla scienza dei materiali, alla neutronica, alla termodraulica e termomeccanica e alla progettazione di componenti e impianti.

Il corso di laurea in Ingegneria nucleare si caratterizza quindi, nell'ambito del settore industriale a cui appartiene, per una spiccata interdisciplinarietà e per l'enfasi posta su metodologie e tecniche sofisticate. L'area culturale dell'ingegneria nucleare è inoltre in profonda trasformazione e contraddistinta da continue innovazioni tecnologiche: si pensi alla fusione nucleare o ai reattori nucleari a maggiore sicurezza. Si richiede quindi all'ingegnere nucleare anche una buona propensione alla ricerca e allo sviluppo di soluzioni nuove o che non siano state esplorate sotto tutti gli aspetti.

Nel bagaglio culturale e tecnico dell'ingegnere nucleare devono rientrare metodologie e strumenti forniti dalla fisica nucleare, dei reattori nucleari, e dei plasmi, dalla termodinamica monofase e bifase, dall'impiantistica e dalle tecnologie nucleari. Sono inoltre trattate le problematiche connesse con la valutazione dell'impatto ambientale dei sistemi di produzione di energia. Data l'importanza dell'affidabilità e della sicurezza nelle applicazioni nucleari, particolare rilevanza viene data alle tecniche di analisi affidabilistica e di valutazione del rischio, che trovano impiego, in generale, in tutte le tecnologie caratterizzate da rischi rilevanti.

Il profilo professionale dell'ingegnere nucleare è pertanto caratterizzato da una solida formazione fisico-matematica e ingegneristica di base, unita a conoscenze di tipo specialistico, articolate nei vari orientamenti previsti. Vengono privilegiati gli aspetti metodologici con un approccio interdisciplinare utilizzabile anche in altri campi dell'ingegneria, al fine di un inserimento sia in attività produttive che in strutture in cui venga svolta prevalentemente attività di ricerca applicata.

## Insegnamenti obbligatori

Il piano ufficiale degli studi per gli studenti di ingegneria nucleare prevede un certo numero di insegnamenti obbligatori, che comprendono quelli comuni a tutti i corsi di laurea in ingegneria, quelli specifici del settore industriale, e quelli caratterizzanti il corso di laurea in Ingegneria nucleare.

La formazione matematica deve essere sufficientemente approfondita, per cui agli strumenti matematici, necessari ad ogni ingegnere, forniti negli insegnamenti di *Analisi matematica* e *Geometria*, occorre aggiungere, ad esempio metodi per la trattazione delle equazioni differenziali alle derivate parziali e nelle funzioni di variabile complessa (*Metodi matematici per l'ingegneria*) e fornire le principali tecniche di calcolo numerico (una semi-annualità di *Calcolo numerico*) per un totale di 4,5 unità didattiche. Ad esse si aggiunge una semi-annualità di *Meccanica analitica*, che sviluppa i metodi lagrangiani e hamiltoniani, fornendo altresì i fondamenti di calcolo delle probabilità.

Per quanto riguarda la *Fisica*, tre insegnamenti forniscono, oltre alle basi generali per la comprensione dei fenomeni fisici classici, nozioni di struttura della materia, con elementi di meccanica quantistica, di fisica nucleare, con elementi di fisica dello stato condensato e dei plasmi, per un totale di tre unità didattiche. Due insegnamenti trattano i fondamenti generali della *Chimica*, e le applicazioni, di *Scienza e tecnologia dei materiali nucleari*, per un totale di due unità didattiche. Un insegnamento di *Disegno tecnico industriale* permette la comprensione dei disegni di componenti meccanici, fornendo altresì le principali tecniche di rappresentazione, comprese quelle assistite dal computer (una unità didattica).

La cultura ingegneristica di base richiede cinque insegnamenti nelle aree del calcolo delle strutture (*Scienza delle costruzioni*), della meccanica applicata (*Meccanica applicata alle macchine*), dell'*Elettrotecnica*, con cenni di macchine elettriche, dell'*Elettronica applicata* e della *Termodinamica applicata*, per un totale di cinque unità didattiche. Completano la formazione ingegneristica gli insegnamenti di *Macchine e Costruzione di macchine* (che dedica ampia parte del corso al calcolo strutturale di componenti soggetti a sforzi termomeccanici), nonché gli insegnamenti di *Istituzioni di economia* (dedicata in parte alla gestione dell'impresa e all'economia delle fonti di energia) e di *Fondamenti di informatica*, che affronta le problematiche relative ai sistemi di elaborazione e alla loro programmazione, per un totale di cinque unità didattiche.

La preparazione professionale specifica nel campo dell'ingegneria nucleare richiede quattro insegnamenti di base, che trattano i seguenti argomenti: *Fisica dei reattori*, *Impianti nucleari*, *Strumentazione e misure per gli impianti nucleari* e *Termofluidodinamica*, per un totale di quattro unità didattiche.

Il corso di *Fisica del reattore* è di tipo integrato e si articola in due moduli di *Fisica dei reattori a fissione* e *Fisica dei reattori a fusione*, che hanno lo scopo, rispettivamente, di analizzare i principali metodi fisico-matematici della neutronica applicata, e di fornire gli elementi della teoria fisico-matematica che sta alla base del funzionamento delle macchine per lo studio della fusione nucleare. Il corso di *Impianti nucleari* è di tipo integrato e, accanto ad un modulo che illustra le caratteristiche e il funzionamento degli impianti a fissione comprende un modulo di *Ingegneria dei reattori nucleari a fusione I*, che analizza dal punto di vista ingegneristico le principali macchine per lo studio della fusione nucleare controllata. Il corso di *Strumentazione e misure per gli impianti nucleari*, partendo dalla teoria della misura, affronta le problematiche inerenti alla strumentazione usata negli impianti nucleari per la misura di grandezze sia nucleari che non nucleari. Il corso di *Termofluidodinamica degli impianti nucleari I* approfondisce la fluidodinamica e la termocinetica, fornendo le metodologie e gli strumenti di calcolo della meccanica dei fluidi e della trasmissione del calore.

Il quadro didattico proposto comprende quindi discipline rapportabili a 27 insegnamenti, raggruppate in 24 unità didattiche, come è mostrato nella tabella riassuntiva seguente. Il curriculum dell'ingegnere nucleare viene completato da cinque unità didattiche caratterizzanti gli orientamenti in cui si articola il corso di laurea.

## Quadro riassuntivo degli insegnamenti obbligatori

1:1	(1. anno, 1. periodo didattico) Q0231 : Analisi matematica 1 Q0620 : Chimica
1:2	Q2300 : Geometria Q1901 : Fisica 1 Q1430 : Disegno tecnico industriale
2:1	Q0232 : Analisi matematica 2 Q1902 : Fisica 2 Q2170 : Fondamenti di informatica
2:2	Q3480 : Metodi matematici per l'ingegneria Q3204 : Meccanica analitica (ridotto) Q4670 : Scienza e tecnologia dei materiali nucleari Q0514 : Calcolo numerico (ridotto)
3:1	Q4600 : Scienza delle costruzioni Q2040 : Fisica nucleare Q5950 : Termodinamica applicata
3:2	Q1790 : Elettrotecnica Q3210 : Meccanica applicata alle macchine Q1965 : Fisica dei reattori a fissione + Fisica dei reattori a fusione (integrato)
4:1	Q1710 : Elettronica applicata Q2775 : Impianti nucleari + Ingegneria dei reattori nucleari a fusione (integrato) Q5991 : Termofluidodinamica negli impianti nucleari 1
4:2	Q3110 : Macchine Q0940 : Costruzione di macchine Y.1 Insegnamento d'orientamento Y.2 Insegnamento d'orientamento
5:1	Q5270 : Strumentazione e misure per gli impianti nucleari Y.3 Insegnamento d'orientamento Y.4 Insegnamento d'orientamento Y.5 Insegnamento d'orientamento
5:2	Q3040 : Istituzioni di economia Y.6 Insegnamento d'orientamento Y.7 Insegnamento d'orientamento Y.8 Insegnamento d'orientamento

## Professionalità e orientamenti

I corsi previsti negli orientamenti in cui si articola il corso di laurea in Ingegneria nucleare approfondiscono le principali problematiche delle aree culturali di maggiore importanza del settore e rispondono alla esigenze di professionalità richieste.

### *Orientamento impiantistico*

L'orientamento è finalizzato alla analisi, modellistica e progettazione, degli impianti nucleari a fissione e fusione.

Le conoscenze di meccanica dei fluidi, termodinamica, e scienza dei materiali vengono ulteriormente sviluppate e poste alla base dello studio dei reattori a fissione termici e veloci, e dei reattori a fusione.

I principali componenti dell'impianto vengono analizzati dal punto di vista funzionale, termomeccanico e dell'affidabilità, in condizioni di esercizio e di incidente.

L'orientamento è pertanto caratterizzato anzitutto da corsi rivolti:

- alla analisi di sicurezza degli impianti nucleari a fissione e fusione con metodologie deterministiche e probabilistiche (*Impianti nucleari 2*);
- all'analisi dei fenomeni termofluidodinamici in regime multifase (*Termofluidodinamica degli impianti nucleari 2*);
- alla progettazione termoidraulica di componenti e sistemi attinenti all'impiantistica nucleare (*Termotecnica del reattore*);
- all'approfondimento delle problematiche del ciclo del combustibile e delle tecnologie dei materiali per la fissione e la fusione (*Tecnologie ed applicazioni nucleari*);
- all'approfondimento della fisica e dell'ingegneria dei reattori nucleari a fusione (*Fisica e ingegneria dei plasmi + Ingegneria di reattori a fusione 2*);
- al calcolo strutturale di componenti soggetti a sforzi meccanici e termici (*Progetti e costruzioni nucleari*);
- all'analisi delle problematiche di radioprotezione e alla progettazione delle relative salvaguardie (*Protezione e sicurezza negli impianti nucleari*);
- all'approfondimento dei diversi aspetti del rischio tecnologico e all'applicazione dell'analisi affidabilistica al progetto di componenti e sistemi ingegneristici complessi (*Sicurezza e analisi di rischio*).

L'orientamento è volto a preparare sia ad una attività professionale nell'industria nucleare o comunque a tecnologia avanzata, che ad una attività di ricerca applicata.

### *Orientamento energetico*

L'orientamento fornisce le conoscenze e gli strumenti metodologici per l'analisi, la modellistica e la valutazione tecnica, economica e ambientale dei sistemi industriali, principalmente, ma non solo, nucleari, finalizzati alla produzione di energia.

L'orientamento è pertanto caratterizzato da corsi rivolti:

- all'analisi dei fenomeni termofluidodinamici in regime multifase che si realizzano negli impianti di potenza (*Termofluidodinamica negli impianti nucleari 2*);
- all'analisi e alla valutazione dei sistemi energetici (*Energetica e sistemi nucleari*);
- alla valutazione di impatto ambientale per l'inserimento nel territorio dei sistemi energetici (*Localizzazione dei sistemi energetici*);

- alla analisi di sicurezza degli impianti nucleari a fissione e fusione con metodologie deterministiche e probabilistiche (*Impianti nucleari 2*);
- al controllo e alla regolazione degli impianti nucleari di potenza, inseriti in un sistema energetico complesso (*Dinamica e controllo degli impianti nucleari*);
- all'analisi delle problematiche di radioprotezione e alla progettazione delle relative salvaguardie (*Protezione e sicurezza degli impianti nucleari*);
- all'approfondimento dei diversi aspetti del rischio tecnologico e all'applicazione dell'analisi affidabilistica al progetto di componenti e sistemi ingegneristici complessi (*Sicurezza e analisi di rischio*);
- alla progettazione termoidraulica di componenti e sistemi attinenti all'impianistica nucleare (*Termotecnica del reattore*);

L'orientamento è volto a preparare sia ad una attività professionale nell'industria nucleare, che ad una attività finalizzata all'analisi di sistemi energetici complessi.

#### *Orientamento Fisica dei reattori e controllo*

L'orientamento approfondisce i fenomeni fisici peculiari dei reattori a fissione e delle macchine per la fusione nucleare, al fine di preparare ad un'attività di ricerca ed alla progettazione nel campo della neutronica, della dinamica e controllo degli impianti nucleari e della fisica dei plasmi.

A tale scopo, sono previsti corsi che trattano gli aspetti fisico-matematici delle applicazioni ingegneristiche. Altri approfondiscono invece i metodi matematici e di calcolo necessari.

Vengono inoltre analizzati i problemi di stabilità, regolazione e controllo degli impianti per la produzione di energia elettrica e le metodologie per lo studio del comportamento dinamico dei sistemi complessi.

L'orientamento è caratterizzato da corsi destinati a:

- approfondire la teoria cinetica che sta alla base dello studio statistico della dinamica di sistemi fisici costituiti da un numero elevatissimo di particelle (*Trasporto di particelle e di radiazione*);
- approfondire gli aspetti fisico-matematici del trasporto per i neutroni e affrontare il progetto neutronico dei reattori nucleari (*Reattori nucleari avanzati*);
- sviluppare le metodologie di calcolo e di simulazione numerica in problemi di interesse per la fisica dei reattori nucleari (*Metodi matematici per i reattori nucleari*);
- studiare il controllo e la regolazione degli impianti nucleari (*Dinamica e controllo degli impianti nucleari*);
- acquisire strumenti fisico-matematici non trattati nei corsi di base (*Fisica matematica*);
- approfondire la fisica dei plasmi e l'ingegneria dei reattori nucleari a fusione (*Fisica e ingegneria dei plasmi + Ingegneria dei reattori nucleari a fusione 2*);
- completare la conoscenza sugli impianti nucleari con particolare riguardo ai problemi di sicurezza (*Impianti nucleari 2, Sicurezza e analisi di rischio*).

Questo orientamento si prefigge sia di fornire strumenti per l'analisi e la progettazione nel settore neutronico che di familiarizzare lo studente con metodologie scientifiche caratteristiche della ricerca tecnologica in vasti settori dell'ingegneria.

La preparazione è finalizzata non solo allo svolgimento di attività professionale nell'industria nucleare, ma anche ad un inserimento presso industrie a tecnologia avanzata e laboratori di ricerca.

### *Orientamento fisico-strumentale*

L'orientamento è indirizzato alla formazione di tecnici e ricercatori in vari settori della fisica applicata e in particolare della fisica del nucleo e degli stati aggregati della materia. Fornisce inoltre una preparazione specialistica nel campo delle radiazioni e della strumentazione nucleare. Vengono approfondite le problematiche fisiche dell'energia nucleare da fissione e da fusione e della struttura dei materiali rilevanti nelle applicazioni tecnologiche avanzate.

L'orientamento è pertanto caratterizzato da corsi rivolti:

- ad approfondire la preparazione fisico-matematica con argomenti non trattati nei corsi di base (*Fisica matematica, Meccanica statistica*);
- alla utilizzazione della strumentazione basata sulle tecniche della fisica sperimentale (*Strumentazione fisica*);
- allo studio di macchine acceleratrici sia dal punto di vista costruttivo che applicativo (*Acceleratori di particelle*);
- all'approfondimento della fisica dei plasmi dell'ingegneria delle macchine per lo studio della fusione nucleare (*Fisica e ingegneria dei plasmi + Ingegneria dei reattori nucleari a fusione 2*);
- all'approfondimento della fisica e della tecnologia dei materiali utilizzati negli impianti nucleari (*Tecnologie e applicazioni nucleari, Radioattività + Superconduttività*);
- approfondire la teoria cinetica che sta alla base dello studio statistico della dinamica di sistemi fisici costituiti da un numero elevatissimo di particelle (*Trasporto di particelle e di radiazione*);

L'orientamento fornisce una preparazione adatta a un inserimento professionale nell'industria nucleare, in laboratori industriali e medici e in laboratori di ricerca sia di base che applicata.

### **Inquadramento delle discipline negli orientamenti**

Seguono le tabelle dei corsi dei quattro orientamenti, che presentano ognuno le discipline caratterizzanti e quelle che consentono scelte orientate a sviluppare particolari sottosectori.

## Orientamento fisico-strumentale

---

4:2 Q2030 : Fisica matematica  
Q5310 : Strumentazione fisica

---

5:1 Q3390 : Meccanica statistica  
Q0010 : Acceleratori di particelle

---

### Una annualità a scelta tra:

---

5:1 Q5680 : Tecnologie e applicazioni nucleari

---

5:2 Q2024 : Fisica e ingegneria dei plasmi (ridotto) (Con Q2934)  
Q2934 : Ingegneria dei reattori nucleari a fusione 2 (ridotto) (Con Q2024)  
Q4434 : Radioattività (ridotto) (Con Q5404)  
Q5404 : Superconduttività (ridotto) (Con Q4434)  
Q6050 : Trasporto di particelle e di radiazioni

---

## Orientamento Fisica dei reattori e controllo

---

4:2 Q6050 : Trasporto di particelle e di radiazioni

---

5:1 Q4460 : Reattori nucleari avanzati  
Q3470 : Metodi matematici per i reattori nucleari

---

5:2 Q1290 : Dinamica e controllo degli impianti nucleari

---

### Una annualità a scelta tra:

---

4,5:2 Q4740 : Sicurezza e analisi di rischio  
Q2030 : Fisica matematica  
Q2024 : Fisica e ingegneria dei plasmi (ridotto) (Con Q2934)  
Q2934 : Ingegneria dei reattori nucleari a fusione 2 (ridotto) (Con Q2024)

---

5:1 Q2772 : Impianti nucleari 2

---

## Orientamento impiantistico

---

4.2 Q5992 : Termofluidodinamica negli impianti nucleari 2

---

5.1 Q2772 : Impianti nucleari 2  
Q5680 : Tecnologie e applicazioni nucleari

---

5.2 Q6010 : Termotecnica del reattore

---

### *Una annualità a scelta tra:*

---

4.5.2 Q4240 : Progetti e costruzioni nucleari  
Q4740 : Sicurezza e analisi di rischio  
Q2024 : Fisica e ingegneria dei plasmi (ridotto) (Con Q2934)  
Q2934 : Ingegneria dei reattori nucleari a fusione 2 (ridotto) (Con Q2024)

---

5.1 Q4410 : Protezione e sicurezza negli impianti nucleari

---

## Orientamento energetico

---

4.2 Q1830 : Energetica e sistemi nucleari  
Q5992 : Termofluidodinamica negli impianti nucleari 2

---

5.1 Q3090 : Localizzazione dei sistemi energetici  
Q2772 : Impianti nucleari 2

---

### *Un insegnamento a scelta tra:*

---

5.1 Q4410 : Protezione e sicurezza negli impianti nucleari

---

5.2 Q4740 : Sicurezza e analisi di rischio  
Q6010 : Termotecnica del reattore  
Q1290 : Dinamica e controllo degli impianti nucleari

---

# Programmi degli insegnamenti

(insegnamenti obbligatori)

*I programmi sono riportati nello stesso ordine (anno e periodo didattico) in cui compaiono nel quadro generale. A questa sezione seguono i programmi dei corsi d'orientamento (p. 57). Al termine del volume (p. 103) le tavole alfabetiche generali, per nomi dei docenti e per titoli degli insegnamenti.*

## Q0231      **Analisi matematica 1**

Anno: periodo 1:1    Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+4 (ore settimanali)

Docente: Dina Giublesi

Il corso sviluppa gli argomenti di base dell'analisi matematica sulla retta reale quali il concetto di funzione, di continuità, di derivabilità e di integrale. Nella parte introduttiva si danno nozioni di logica e di teoria degli insiemi. Gli argomenti sono sviluppati sottolineando le concatenazioni logiche e le deduzioni. I contenuti di questo corso, oltre ad essere propedeutici ai corsi successivi e applicativi, hanno una funzione formativa di base abituando lo studente a ragionamenti rigorosi e svincolati da singole applicazioni.

**REQUISITI.** Nozioni di base di algebra, elementi di trigonometria, proprietà dei logaritmi, grafici di alcune funzioni elementari.

### PROGRAMMA

1. Nozioni di logica, proposizioni, connettivi logici, predicati, quantificatori. Elementi di teoria degli insiemi. Relazioni. Funzioni, dominio, codominio e immagine. Funzione composta, iniettività, suriettività. Numeri naturali, calcolo combinatorio. I numeri reali. Estremi inferiori e superiori, completezza. Topologia della retta reale. Limitatezza, massimi e minimi. [12 ore]
2. Definizione di limite. Unicità del limite, permanenza segno e limitatezza locale. Teoremi del confronto. Algebra dei limiti. Forme di indecisione. Limite di funzione composta. Simboli di Landau, comportamenti asintotici. Errore assoluto ed errore relativo. Infiniti, infinitesimi e loro confronti. [12 ore]
3. Successioni. Teoremi sulle successioni. Limiti fondamentali. Successioni monotone e legami tra estremo inferiore e superiore e i limiti. [4 ore]
4. Definizione di continuità. Algebra delle funzioni continue. Esistenza zeri, valori intermedi e risultati su continuità globale. Continuità della funzione inversa. [4 ore]
5. Definizione di derivata. Differenziale. Algebra delle derivate e derivata delle funzioni composte. Derivata di inversa funzionale. Proprietà locali delle funzioni derivabili. Proprietà globali delle funzioni derivabili. Conseguenze e applicazioni del teorema di Lagrange. Primitive. Regole di calcolo delle primitive. Regola di de L'Hôpital. Formule di Taylor e di McLaurin. Principali sviluppi accorciati. Convessità. Criteri di convessità. [24 ore]

6. Somme superiori e inferiori, integrale di Riemann. Integrabilità delle funzioni continue. Integrabilità delle funzioni monotone. Integrabilità delle funzioni limitate e continue eccetto un numero finito di punti. Teorema fondamentale del calcolo integrale. Integrazione numerica: metodo dei trapezi. [6 ore]
7. Integrali impropri. Criterio di convergenza del confronto, criterio del valore assoluto e criterio del confronto con infiniti o infinitesimi campione. [6 ore]
8. Equazioni differenziali del primo ordine: autonome, a variabili separabili lineari e omogenee. Equazioni differenziali del secondo ordine a coefficienti costanti. [6 ore]

#### ESERCITAZIONI

1. Grafici di funzioni elementari. Funzioni inverse. Funzioni composte. Operazioni sugli insiemi. Disequazioni ed equazioni. Estremo superiore, punti di accumulazione, limitatezza, massimi e minimi. [10 ore]
2. Calcolo di limiti, forme indeterminate, limite di funzione composta. Infiniti, infinitesimi, parti principali, limiti notevoli. [6 ore]
3. Esercizi di derivazione. Derivabilità di funzioni definite a tratti. Funzioni iperboliche. Determinazione del numero di radici di un polinomio. [8 ore]
4. Studi di funzione. Asintoti. Funzioni pari e dispari. [6 ore]
5. Primitive di funzioni continue e primitive generalizzate. Tecniche di integrazione per parti e per sostituzione. Integrazione delle funzioni razionali. Scomposizione in fratti semplici. Alcuni integrali di funzioni irrazionali. Integrali per parti ricorsivi. [8 ore]
6. Formula di Taylor. Criteri per i punti critici e per i flessi. [4 ore]
7. Integrali impropri su intervalli non limitati e su intervalli limitati, applicazione dei criteri. [4 ore]

#### BIBLIOGRAFIA

Testo di riferimento:

A. Bacciotti, F. Ricci, *Analisi matematica. Vol. I.*, Liguori, Napoli, 1994

Testi ausiliari:

G. Geymonat, *Lezioni di Analisi matematica I*, Levrotto e Bella, Torino, 1981.

P. Boieri, G. Chiti, *Precorso di Matematica I*, Zanichelli, Bologna, 1994.

P. Marcellini, C. Sbordone, *Esercitazioni di Matematica I*, Liguori, Napoli, 1992.

M. Pavone, *Temi di esame svolti di Analisi matematica I*, Aracne, Roma, 1993.

M. Pavone, *Integrali impropri e funzioni integrali*, Aracne, Roma 1992.

#### ESAME

L'esame si svolge con una prova scritta della durata di due ore. Alla prova scritta si possono consultare i testi di lezione ed esercitazione e gli appunti. È vietato l'uso di calcolatori di ogni tipo. Dalla prova scritta è possibile ritirarsi senza che avvengano registrazioni negative. Successivamente si svolge un colloquio orale.

## Q0620 Chimica

Anno: periodo I:1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+4 (ore settimanali)

Docente: Antonio Iannibello (collab.: Enrica Vernè)

Il corso si propone di fornire le basi necessarie per la comprensione e l'interpretazione dei fenomeni chimici e di dare una breve rassegna delle proprietà degli elementi comuni e dei loro principali composti. Esso si articola di conseguenza in tre parti: una di chimica generale, una di chimica inorganica ed una di chimica organica.

REQUISITI. Per seguire il corso sono sufficienti le nozioni di base relative alle leggi fondamentali della chimica, alla simbologia ed alla nomenclatura.

### PROGRAMMA

#### *Struttura della materia.* [5 ore]

Stati di aggregazione della materia. Sistemi omogenei ed eterogenei. Fasi. Leggi fondamentali della chimica. Principio di Avogadro. Ipotesi atomica. Determinazione dei pesi atomici: metodo di Cannizzaro, regola di Dulong e Petit. Determinazione della formula e calcolo della composizione dei composti. Composizione di sistemi omogenei.

#### *Lo stato gassoso.* [8 ore]

Proprietà e leggi dei gas perfetti. Equazione di stato di van der Waals. Determinazione dei pesi molecolari delle sostanze gassose. Dissociazione termica. Teoria cinetica dei gas. Distribuzione delle energie e delle velocità (curve di Maxwell-Boltzmann). Legge di Graham. Capacità termica e calore specifico dei gas a pressione e a volume costante. Rapporto tra calori specifici a pressione ed a volume costante. Determinazione del peso atomico dei gas nobili.

#### *Termodinamica chimica.* [3 ore]

Energia interna ed entalpia; loro variazione nelle reazioni chimiche: calcolo relativo e legge di Hess. Variazione dell'entalpia di reazione con la temperatura e lo stato fisico delle sostanze. Entropia ed energia libera di Gibbs.

#### *La struttura dell'atomo ed il legame chimico.* [20 ore]

Il modello atomico di Bohr e sua applicazione all'atomo di idrogeno. Transizioni tra livelli energetici. Inadeguatezza del modello di Bohr. Numeri quantici. Modello ondulatorio dell'elettrone: principi di De Broglie e di indeterminazione. Distribuzione degli elettroni negli orbitali atomici: principio di esclusione di Pauli. Sistema periodico degli elementi e configurazioni elettroniche. Raggi X: produzione e caratteristiche; spettri di emissione dei raggi X; legge di Moseley. Radioattività naturale. Periodo di semitrasformazione, legge dello spostamento di gruppo. Fenomeni di fissione e di fusione. Il legame ionico. Il legame covalente. Il legame covalente omeopolare ed eteropolare. Formazione di legami sigma e pi-greco. Energia di legame. Ibridazione di orbitali atomici: *sp*, *sp<sup>2</sup>*, *sp<sup>3</sup>*, *sp<sup>3d</sup>2*: esempi di molecole. Il legame dativo. La regola pratica dell'ottetto, formule di Lewis. Strutture di risonanza in molecole e ioni. Elettro negatività degli elementi. Grado di ossidazione; reazioni di ossido-riduzione e loro bilanciamento. Legame idrogeno. Forze di van der Waals.

#### *Cinetica chimica e equilibri chimici.* [10 ore]

Velocità di una reazione chimica. I fattori che influenzano la velocità: fattore sterico, energia di attivazione, concentrazione dei reagenti, temperatura. I catalizzatori. Concetto di equilibrio chimico. Equilibri omogenei ed eterogenei. Legge dell'azione di

massa. Relazione tra  $K_c$  e  $K_p$ . Applicazione della legge dell'azione di massa agli equilibri eterogenei. Influenza della temperatura sulla costante di equilibrio. Principio dell'equilibrio mobile. Legge di Henry. Regola delle fasi e sua applicazione agli equilibri eterogenei ed ai diagrammi di stato. Diagrammi di stato dell'acqua e dello zolfo. Cenni sui diagrammi di stato a due componenti.

*Lo stato liquido e le soluzioni.* [14 ore]

Tensione di vapore: equazione di Clausius-Clapeyron. Soluzioni diluite. Legge di Raoult. Crioscopia ed ebullioscopia. Pressione osmotica e membrane semipermeabili. Gli elettroliti deboli, forti e le loro soluzioni acquose. Acidi e basi deboli: costante e grado di ionizzazione; formula di Ostwald. Prodotto di solubilità. Prodotto ionico dell'acqua e  $pH$ . Indicatori. Idrolisi. Conducibilità elettrica delle soluzioni di elettroliti. Legge di Kohlrausch. Elettrolisi e leggi di Faraday. Doppio strato elettrico e potenziale di elettrodo. Equazione di Nerst. Serie elettrochimica. Pile ed accumulatori. Misura potenziometrica del  $pH$ . Elettrolisi e scarica preferenziale in funzione del potenziale di elettrodo. Sovratensioni di elettrodo ed inversione della scarica. Tensione di decomposizione. Elettrolisi dell'acqua e di soluzioni concentrate di  $NaCl$ . Raffinazione elettrolitica del rame. Accoppiamento di semireazioni e costituzione di un sistema *redox*.

*Lo stato solido.* [3 ore]

Tipi di solidi. I solidi metallici e la loro formazione; cenni sulla teoria delle bande: conduttori, semiconduttori, isolanti. Reticoli cristallini. I solidi cristallini e la diffrazione dei raggi X; l'esperienza di von Laue e la legge di Bragg. Soluzioni solide. Difetti nei solidi cristallini.

*Chimica inorganica.* [9 ore]

Schemi generali di reattività di metalli con acqua, acidi ossidanti e non ossidanti; passivazione di alluminio e cromo. Schemi generali di reattività di non metalli e metalli anfoteri con le basi. Idrogeno: proprietà chimiche, preparazione industriale e di laboratorio. Preparazione industriale di  $Na$  e  $NaOH$ . Metallurgia dello zinco. Preparazione industriale dell'allumina Bayer e metallurgia dell'alluminio. Reazioni di combustione. Preparazioni industriali dell'ammoniaca, della soda Solvay, dell'acido nitrico, dell'acqua ossigenata e dell'acido solforico. Il dicromato ed il permanganato di potassio come agenti ossidanti.

*Chimica organica.* [6 ore]

Isomeria di funzione, di struttura e geometrica. Caratteristiche funzionali e reattività di: alcani, alcheni, alchini, idrocarburi aromatici, alogenoderivati, alcoli, eteri, aldeidi, chetoni, acidi carbossilici, esteri, anidridi degli acidi, ammine alifatiche ed aromatiche, ammidi, nitrili. Polimeri e meccanismi di polimerizzazione: poliaddizione e policondensazione.

**ESERCITAZIONI**

Esercitazioni "numeriche" condotte in aula da un ricercatore (2 ore settimanali) e da un coadiutore (2 ore settimanali) su:

Nomenclatura chimica [4 ore]. Leggi dei gas [4 ore]. Calcoli stechiometrici [8 ore]. Termochimica [4 ore]. Bilanciamento delle reazioni [4 ore]. Equilibri chimici [8 ore]. Calcoli sulle soluzioni: crioscopia, ebullioscopia, pressione osmotica [8 ore];  $pH$ , conduttanze [8 ore]; elettrochimica [4 ore].

**BIBLIOGRAFIA**

Brisi, Cirilli, *Chimica generale e inorganica*, Levrotto e Bella, Torino.  
Fine, Beall, *Chimica per Scienze ed Ingegneria*, EdiSES, Napoli.

Silvestroni, *Fondamenti di chimica*, Masson, Milano.  
 Corradini, *Chimica generale*, Casa Ed. Ambrosiana, Milano.  
 Brisi, *Esercizi di chimica*, Levrotto e Bella, Torino.  
 Montorsi, *Appunti di chimica organica*, CELID, Torino.

## ESAME

L'esame si articola in due prove, scritta e orale.

L'esame è valido con il superamento di entrambe le prove. L'insufficienza conseguita nella prima prova comporta automaticamente il fallimento dell'esame e la conseguente registrazione della bocciatura. La sufficienza conseguita nella prima prova non assicura una votazione minima né tantomeno il superamento dell'esame.

La prova scritta avrà la durata di due ore e consisterà in 30 quesiti, alcuni di natura teorica ed altri (a cui sarà riconosciuto un punteggio maggiorato) che richiederanno l'impostazione di un calcolo. Durante l'esecuzione della prova scritta gli studenti potranno avere unicamente una calcolatrice tascabile e quanto necessario per scrivere. Il punteggio massimo raggiungibile allo scritto è 30/30. Tutti coloro che hanno conseguito una votazione minima di 18/30 si presenteranno alla prova orale, che si articolerà su tutto il programma del corso, esercitazioni comprese.

## Q2300 Geometria

Anno: periodo 1:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+4 (ore settimanali)

Docente: Carla Massaza

Il corso si propone di fornire agli studenti una preparazione di base per lo studio di problemi geometrici nel piano e nello spazio con l'uso di coordinate e di problemi di algebra lineare con l'uso del calcolo matriciale.

REQUISITI. Elementi di geometria euclidea e di trigonometria; proprietà dei numeri reali, operazioni di derivazione e di integrazione.

### PROGRAMMA

1. *Vettori del piano e dello spazio.* [5 ore]

Vettori applicati e liberi, operazioni, componenti.

2. *Numeri complessi ed equazioni algebriche.* [5 ore]

Definizione di numero complesso, operazioni, rappresentazione. Principio di identità dei polinomi. Teorema fondamentale dell'algebra.

3. *Spazi vettoriali.* [10 ore]

Proprietà elementari, sottospazi, dipendenza lineare, basi. Spazi di matrici, calcolo matriciale.

4. *Sistemi lineari e determinanti.* [9 ore]

Compatibilità e metodi di risoluzione di un sistema. Sistemi ad incognite vettoriali e matrice inversa. Definizione e proprietà dei determinanti.

5. *Applicazioni lineari.* [14 ore]

Definizione e proprietà. Applicazioni lineari e matrici. Cambiamenti di base e matrici simili. Autovalori e autovettori: polinomio caratteristico, diagonalizzazione di una matrice, cenni sulla forma canonica di Jordan. Cenni su equazioni e sistemi differenziali lineari di ordine  $n$ .

6. *Spazi vettoriali con prodotto scalare.* [2 ore]

Matrici ortogonali. Matrici simmetriche. Forme quadratiche.

7. *Geometria analitica del piano.* [9 ore]

Coordinate cartesiane e polari. La retta: rappresentazioni cartesiana e parametrica, parallelismo, angoli, fasci di rette. Distanze. Circonferenza: rappresentazioni, fasci di circonferenze. Coniche: forma generale e canonica, classificazione; tangente ad una conica in un suo punto. Cenni sulla polarità.

8. *Geometria analitica dello spazio.* [14 ore]

Coordinate cartesiane, cilindriche, polari. Rette e piani: rappresentazioni, parallelismo, angoli, perpendicolarità, complanarità di due rette. Distanze. Superfici sferiche e circonferenze. Coni, cilindri, superfici di rotazione. Quadriche: equazioni canoniche e classificazione; piano tangente.

9. *Geometria differenziale delle curve.* [6 ore]

Curve regolari e biregolari. Triedro fondamentale. Ascissa curvilinea. Curvatura e torsione. Cerchio osculatore. Formule di Frenet.

### ESERCITAZIONI

1. Operazioni tra vettori. [3 ore]

2. Esercizi su numeri complessi ed equazioni algebriche. [3 ore]

3. Esempi di spazi e sottospazi vettoriali. Esercizi sulla dipendenza lineare. Determinazione di generatori e di basi. Operazioni tra matrici. [6 ore]

4. Risoluzione e discussione sulla compatibilità di sistemi lineari. Calcolo dell'inversa di una matrice. [4 ore]

5. Applicazioni lineari e matrici associate. Cambiamenti di base. Calcolo di autovalori e determinazione di autospazi. Esempi di diagonalizzazione e di forma canonica di Jordan per una matrice quadrata. [8 ore]

6. Basi ortonormali. Matrici simmetriche e forma canonica di una forma quadratica. [2 ore]

7. Rette, circonferenze e coniche del piano. [6 ore]

8. Curve e superfici dello spazio: rette, piani, circonferenze, sfere, quadriche, coni, cilindri, superfici di rotazione. [10 ore]

9. Proprietà differenziali di una curva: tangente, piano osculatore, cerchio osculatore, curvatura, torsione. Studio dell'elica circolare. [4 ore]

### BIBLIOGRAFIA

Testo di riferimento:

S. Greco, P. Valabrega, *Lezioni di algebra lineare e geometria. Vol. I-II*, Levrotto & Bella, Torino, 1994.

Testi ausiliari:

S. Greco, P. Valabrega, *Esercizi risolti di algebra lineare, geometria analitica differenziale*. Levrotto & Bella, Torino, 1994.

G. Beccari, N. Catellani, D. Ferraris, D. Giublesi, L. Mascarello, *Esercizi di algebra lineare e geometria analitica*, CELID, Torino, 1983.

E. Sernesi, *Geometria I*, Bollati Boringhieri, Torino, 1990.

A. Sanini, *Lezioni di geometria*, Levrotto & Bella, Torino, 1994.

**ESAME**

L'esame si svolge in due prove, una scritta e una orale. Per lo scritto sono previste due modalità.

- a) Due prove durante il semestre, la prima in forma di *test*, della durata di un'ora, riguardante l'algebra lineare; la seconda, della durata di un'ora e mezza, composta da esercizi di geometria analitica piana e spaziale. Durante le prove non è consentita la consultazione di testi.
- b) Una prova della durata di due ore, in uno degli appelli previsti dal calendario, composta da esercizi sugli argomenti del corso, nella quale è consentito consultare testi.

Il superamento delle due prove di a) con voto medio non inferiore a 15/30 consente allo studente di sostenere la prova orale nel periodo compreso tra giugno e ottobre, mentre lo studente che superi la prova di tipo b) con voto non inferiore a 15/30 deve sostenere la prova orale nello stesso appello.

**Q1901      Fisica 1**

Anno/periodo 1:2    Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+2 (ore settimanali)

Docente: Riccardo D'Auria (collab.: Vittorio Penna)

**PROGRAMMA****1. Misure.** [2 ore]

Grandezze fisiche. Misurazioni. Grandezze fondamentali e derivate. Equazioni dimensionali. Sistemi di misura e unità. Errori di misura. Propagazione degli errori. Cenni di teoria dell'errore e metodo dei minimi quadrati. (Di regola questi argomenti vengono svolti in parte nelle ore di esercitazione).

**2. Richiami di calcolo vettoriale.** [1 ora]

Vettori e scalari. Componenti. Vettori unitari. Cenni di calcolo vettoriale.

**3. Cinematica.** [8 ore]

Moto rettilineo: posizione, velocità e accelerazione. Caduta libera. Moti piani: posizione, velocità e accelerazione. Moto circolare uniforme. Moto dei proiettili. Moti relativi: velocità e accelerazione relative. Trasformazioni di Galileo. Sistemi in rotazione.

**4. Dinamica del punto materiale.** [8 ore]

Sistemi inerziali. Conservazione della quantità di moto per un sistema isolato. Forza e massa. Leggi di Newton. Leggi di forza. Applicazioni. Forze di attrito (radente e viscoso). Sistemi a massa variabile. Momento angolare e sua conservazione.

**5. Conservazione dell'energia.** [4 ore]

Lavoro ed energia potenziale. Forze conservative e non conservative. Teorema di conservazione dell'energia meccanica. Curve di energia potenziale. Moto sotto l'azione di forze centrali.

**6. Sistemi di punti materiali.** [4 ore]

Centro di massa. Quantità di moto di una particella e di un sistema di particelle. Momento angolare di un sistema di particelle. Massa ridotta. Quantità meccaniche nel sistema del centro di massa. Soluzione completa del moto di due corpi soggetti all'interazione gravitazionale.

7. *Urti*. [2 ore]

Impulso e quantità di moto. Urti elastici e anelastici in una dimensione. Cenni agli urti in due dimensioni. Sistema di riferimento del centro di massa.

8. *Dinamica di un corpo rigido*. [6 ore]

Moto rotatorio. Variabili rotazionali. Energia cinetica di rotazione. Momento d'inerzia. Momento di una forza. Dinamica rotazionale del corpo rigido. Rotolamento. Momento angolare. Momento angolare di un sistema di particelle e di un corpo rigido in rotazione attorno a un asse fisso. Assi principali d'inerzia. Conservazione del momento angolare ed esempi. Giroscopi. Equilibrio dei corpi rigidi.

9. *Oscillazioni*. [6 ore]

Oscillatore armonico semplice. Considerazioni energetiche. Moto armonico semplice e moto circolare uniforme. Moto armonico smorzato. Oscillazioni forzate e risonanza. Composizione di moti armonici.

10. *Fluidi*. [4 ore]

Densità e pressione. Principi di Pascal e Archimede. Linee di flusso ed equazione di continuità. Equazione di Bernoulli ed applicazioni.

11. *Gravitazione*. [4 ore]

Legge della gravitazione universale. Energia potenziale gravitazionale. Campo e potenziale gravitazionale. Leggi di Keplero. Principio di equivalenza e applicazione.

12. *Relatività ristretta*. [6 ore]

Principio della costanza della velocità della luce. Trasformazione di Lorentz. Dilatazione dei tempi e contrazione delle lunghezze. Addizione relativistica delle velocità. Quantità di moto relativistica. Equivalenza massa-energia. Applicazioni.

13. *Carica elettrica e campo elettrico statico*. [6 ore]

Legge di Coulomb. Conservazione della carica. Campo elettrico. Linee di forza. Campo elettrico di: una carica puntiforme; un dipolo elettrico; una distribuzione lineare di carica; un disco carico. Carica puntiforme e dipolo in un campo elettrico.

14. *Legge di Gauss*. [4 ore]

Flusso del campo elettrico. Legge di Gauss. Conduttore carico isolato. Applicazioni della legge di Gauss.

15. *Potenziale elettrico*. [4 ore]

Energia potenziale elettrica. Potenziale elettrico. Campo elettrico e potenziale. Potenziale di: una carica puntiforme; un insieme di cariche puntiformi; un dipolo elettrico; una distribuzione continua di cariche. Superfici equipotenziali.

16. *Condensatori*. [4 ore]

Condensatori. Capacità elettrica. Calcolo della capacità. Condensatori in serie e in parallelo. Energia immagazzinata in un campo elettrico.

17. *Elementi di ottica geometrica*. [4 ore]

Riflessione e rifrazione della luce. Specchi piani e sferici. Superfici rifrangenti sferiche. Lenti sottili.

## LABORATORIO

1. Misurazione di spostamenti, velocità e accelerazione di gravità per un corpo in caduta libera.

2. Misurazione del periodo di oscillazione del pendolo semplice in funzione della lunghezza del filo e dell'ampiezza di oscillazione.
3. Misurazione dell'indice di rifrazione del vetro con il metodo del prisma in condizione di deviazione minima.

#### BIBLIOGRAFIA

Alonso, Finn, *Elementi di fisica per l'università. Vol. 1* (e vol. 2 per la parte di elettrostatica e ottica), Masson - Addison-Wesley.

#### ESAME

L'esame consta delle seguenti tre prove:

- a) Una prova preliminare di accesso consistente in domande, *tests* ed esercizi di carattere elementare volta ad accertare se lo studente ha una preparazione di base minimale per sostenere l'esame vero e proprio.
- b) Una prova scritta che prevede di regola tre problemi dello stesso grado di difficoltà di quelli svolti durante le esercitazioni in classe, più alcune domande su argomenti di teoria.
- c) Una prova orale.

Per quanto riguarda gli scritti lo studente ha la facoltà di ritirare il compito una volta che sia stata eseguita la correzione alla lavagna. Superata la prova scritta l'esame orale può essere sostenuto in qualsiasi appello dell'anno accademico.

## Q1430 Disegno tecnico industriale

Anno: periodo 1:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 52+26+26 (ore, nell'intero periodo)

Docente: Giovanni Podda

Il corso si propone di fornire agli allievi ingegneri meccanici e nucleari nozioni e strumenti

- per rappresentare graficamente gli organi di macchine, secondo la normativa tecnica;
- per interpretare i disegni tecnici, riconoscendo la geometria e la funzione dei vari componenti;
- per dimensionare con quote e tolleranze gli elementi rappresentati ai fini costruttivi e funzionali;
- per conoscere ed applicare curve e superfici per interpolazione ed approssimazione;
- per gestire un *software* di disegno automatico bidimensionale e tridimensionale.

REQUISITI. Non ci sono prerequisiti per il corso. Una conoscenza di informatica di base sarebbe comunque auspicabile per la parte assistita.

#### PROGRAMMA

*Prima parte: le basi del disegno tecnico industriale.* [8 ore]

##### 1. Introduzione al disegno. [2 ore]

Il disegno come linguaggio grafico per la comunicazione di informazioni tecniche. La collocazione del disegno nel ciclo di vita del prodotto. Il disegno assistito dal calcolatore. L'unificazione dei disegni ed il formato dei fogli.

2. *Le proiezioni ortogonali.* [4 ore]

Le proiezioni di punti, segmenti e figure. Le proiezioni di solidi. Le sezioni. Le norme di rappresentazione.

3. *Le proiezioni assonometriche.* [2 ore]

Il teorema di Pohlke. Le assonometrie ortogonali ed oblique.

*Seconda parte: il disegno meccanico.* [24 ore]

4. *Le lavorazioni meccaniche.* [4 ore]

La classificazione delle lavorazioni meccaniche. Le lavorazioni per asportazione di truciolo e per deformazione plastica.

5. *La quotatura.* [4 ore]

La quotatura funzionale e la quotatura tecnologica. La disposizione delle quote. I sistemi di quotatura.

6. *La rappresentazione degli errori.* [8 ore]

Le tolleranze dimensionali. Il sistema unificato ISO di tolleranze. I collegamenti foro-base ed albero-base. La misura della rugosità. Le tolleranze geometriche. Il principio del massimo materiale.

7. *I collegamenti filettati.* [4 ore]

Gli elementi filettati: definizioni. I profili delle filettature ed i loro usi. I dispositivi antisvitamento.

8. *I collegamenti meccanici.* [4 ore]

Le chiavette e le linguette. I profili scanalati. Le spine e gli anelli elastici. Le chiodature e le saldature.

*Terza parte: elementi di grafica assistita.* [14 ore]

9. *Le trasformazioni prospettiche.* [6 ore]

Le trasformazioni nel piano e nello spazio. Gli algoritmi per la prospettiva centrale e parallela.

10. *L'interpolazione e l'approssimazione.* [6 ore]

Le curve parametriche cubiche e di Bezier. Le superfici parametriche bicubiche e di Bezier.

11. *Le applicazioni grafiche per la comunicazione.* [2 ore]

I diagrammi, i nomogrammi e gli istogrammi. I fogli di calcolo ed il plottaggio dei dati.

*Quarta parte: il disegno assistito.* [6 ore]

12. *I software grafici bidimensionali e tridimensionali.*

Le primitive bidimensionali. *L'editing.* I blocchi ed i tratteggi. La quotatura. Le primitive tridimensionali. La modellazione solida.

ESERCITAZIONI. [26 ore, 2 squadre]

Le esercitazioni consistono nella rappresentazione, in assonometria ed in proiezione quotata, di elementi meccanici presentati singolarmente o estratti da complessivi. Esse verranno eseguite sotto forma di schizzi a mano libera e con controllo del tempo di esecuzione.

LABORATORIO. [26 ore, 4 squadre]

Alcune delle esercitazioni in aula verranno eseguite su un *software* grafico dedicato, con possibilità di calcolo e di rappresentazione tridimensionale di curve e superfici parametriche.

**BIBLIOGRAFIA**

Testi di riferimento:

Parte 1 e 2: *Appunti di disegno tecnico industriale*, o equivalente.Parte 3: M. Orlando, G. Podda, *Lineamenti di disegno automatico. Parte II*, CLUT, Torino, 1994.Parte 4: A.J. Kalameja, *The AutoCAD tutor*, Delmar, Albany, 1989, o equivalente.

Testi ausiliari:

M.E. Mortenson, *Modelli geometrici*, McGraw-Hill, Milano, 1989.**ESAME**

L'esame consiste in una prova grafica (1 ora), una prova teorica (45'), una prova di disegno assistito (1 ora) ed una valutazione delle esercitazioni (tavole) svolte durante il corso. È previsto un esonero dalla prova grafica e dalla prova di disegno assistito mediante accertamenti eseguiti durante il corso.

**Q0232      Analisi matematica 2**

Anno: periodo 2:1    Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+4 (ore settimanali)

Docente: Maria Mascarello

Il corso si propone di completare la formazione matematica di base dello studente, con particolare riferimento al calcolo differenziale e integrale in più variabili, alla risoluzione delle equazioni e dei sistemi differenziali e ai metodi di sviluppo in serie.

**REQUISITI.** Sono propedeutici i corsi di *Analisi matematica 1* e *Geometria*.

**PROGRAMMA**

1. *Funzioni di più variabili.* [4 ore lezione, 3 ore esercitazioni]

Nozioni di topologia negli spazi  $n$ -dimensionali. Limite. Continuità.

2. *Calcolo differenziale per funzioni di più variabili.* [7 ore lez., 7 ore es.]

Funzioni scalari: derivate parziali. Derivate direzionali. Differenziale; piano tangente. Gradiente. Formula di Taylor. Matrice hessiana. Punti stazionari: loro classificazione. Funzioni vettoriali: derivate parziali. Derivate direzionali. Matrice jacobiana. Differenziale. Derivazione di una funzione composta: regola della catena.

3. *Calcolo differenziale su curve e superfici.* [5 ore lez., 4 ore es.]

Curve. Superfici regolari nello spazio. Funzioni implicite e varietà. Massimi e minimi vincolati, moltiplicatori di Lagrange.

4. *Integrali multipli.* [10 ore lez., 12 ore es.]

Integrali multipli e loro trasformazioni nello spazio  $n$ -dimensionale. Primo teorema di Guldino. Cenni sugli integrali impropri. Funzioni definite mediante integrali, teorema di derivazione sotto il segno di integrale.

5. *Integrali su curve e superfici.* [8 ore lez., 6 ore es.]

Integrale curvilineo. Area di una superficie. Secondo teorema di Guldino. Superfici orientate. Integrale di flusso. Teorema della divergenza. Forma differenziale lineare. Integrale di linea di un campo. Teorema di Green. Teorema di Stokes. Forma differenziale esatta. Teorema fondamentale. Potenziale.

6. *Serie numeriche e serie di funzioni.* [10 ore lez., 4 ore es.]

Serie numeriche, generalità. Serie a termini positivi. Serie a termini di segno alterno. Assoluta convergenza. Serie negli spazi normati. Serie di funzioni; convergenza puntuale e assoluta, in media quadratica, uniforme. Teorema di Weierstrass. Teorema di integrazione e derivazione per serie.

7. *Serie di Fourier.* [6 ore lez., 2 ore es.]

Funzioni periodiche. Famiglie ortogonali di funzioni. Polinomi trigonometrici. Polinomio di Fourier di una funzione a quadrato integrabile. Serie di Fourier, sua convergenza in media quadratica. Identità di Parseval. Convergenza puntuale ed uniforme della serie di Fourier.

8. *Serie di potenze.* [8 ore lez., 6 ore es.]

Serie di potenze, raggio di convergenza. Sviluppo in serie di Taylor. Sviluppi notevoli. Funzioni definite mediante integrali non elementari. Applicazioni numeriche. Matrice esponenziale.

9. *Sistemi di equazioni differenziali.* [14 ore lez., 6 ore es.]

Sistemi di equazioni differenziali del primo ordine. Problema di Cauchy. Equazioni differenziali di ordine  $n$ . Sistemi differenziali del primo ordine lineari in forma normale. Sistema omogeneo. Sistema completo, metodo di Lagrange. Equazioni differenziali di ordine  $n$  lineari. Integrazione per serie di equazioni differenziali lineari del secondo ordine. Sistemi differenziali lineari a coefficienti costanti del primo ordine. Sistemi omogenei soluzioni e loro soluzioni tramite la matrice esponenziale. Sistemi lineari non omogenei di tipo particolare. Equazioni differenziali lineari di ordine  $n$  a coefficienti costanti.

## BIBLIOGRAFIA

Testo di riferimento:

A. Bacciotti, F. Ricci, *Lezioni di Analisi matematica II*, Levrotto & Bella, Torino, 1991.

Eventuali testi ausiliari:

S. Salsa, A. Squellati, *Esercizi di Analisi matematica II*, Masson, Milano, 1994.

H.B. Dwight, *Tables of integrals and other mathematical data*, MacMillan.

Leschiutta, Moroni, Vacca, *Esercizi di matematica*, Levrotto & Bella, Torino, 1982.

## ESAME

L'esame consiste in una prova scritta ed una orale, che devono essere sostenute nello stesso appello. Lo studente può presentarsi alla prova scritta una volta per sessione. È necessario prenotarsi preventivamente all'appello, consegnando lo statino presso la segreteria didattica del dipartimento di Matematica, entro la data che verrà di volta in volta comunicata. Se la prenotazione non viene disdetta, lo studente viene considerato come presente.

Durante le prove scritte è vietato l'uso di qualsiasi tipo di macchina calcolatrice e di *computer*; lo studente può utilizzare gli appunti del corso, il libro di testo e le tavole. Se la prova scritta non viene ritirata dallo studente dopo la presentazione delle soluzioni da parte del docente effettuata al termine della prova scritta, l'esito dell'esame verrà comunque registrato. L'orale non può essere sostenuto se la prova scritta risulta insufficiente. L'eventuale esito negativo della prova orale comporta la ripetizione anche della prova scritta in una successiva sessione.

## Q1902      Fisica 2

Anno: periodo 2:1

Docente: Enrica Mezzetti

Il corso riguarda la trattazione dell'elettromagnetismo classico fino all'enunciazione delle equazioni di Maxwell, alla deduzione e soluzione dell'equazione di D'Alembert per la propagazione di onde piane. Comprende una trattazione a livello elementare dei fenomeni di interferenza, diffrazione, e propagazione dell'onda in mezzi anisotropi.

A seguito di un rapido cenno all'analisi di Fourier, viene dedotto il concetto di pacchetto d'onda, sua ampiezza e durata e da qui viene tratto spunto per l'enunciazione dei principi di indeterminazione di Heisenberg. Seguirà una descrizione dei fondamenti sperimentali su cui si basa la dualità onda - corpuscolo.

Si enunciano i principi fondamentali della termodinamica classica, e il significato dei principali potenziali termodinamici. Attraverso il concetto di probabilità termodinamica e di funzione di partizione si arriva alla definizione statistica dei potenziali termodinamici fondamentali.

*Per orientarsi sul programma.* È stato consegnato a lezione, ai rappresentanti del corso, un programma "preventivo", suddiviso in possibili argomenti d'esame e con i riferimenti ai testi. A fine corso, questo programma "preventivo" da considerarsi di appoggio e di orientamento, sarà sostituito da un programma "consuntivo".

### PROGRAMMA

Questo programma non è organizzato per argomenti successivi ma è strutturato in argomenti o "tesi", ciascuna delle quali può essere oggetto di una domanda d'esame nella disciplina specifica).

#### *Elettromagnetismo.*

1. Campo elettrico e potenziale elettrico. Energia potenziale e lavoro del campo. Relazione tra campo e potenziale nel vuoto e nella materia. [Rif.: Amaldi et al., 3 e 4].
2. Il teorema di Gauss. Forma integrale e forma differenziale nel vuoto [3.11], nella materia [4.12].
3. Dipolo elettrico statico; definizione di momento di dipolo [3.17] solo definizione; potenziale e campo generati da un dipolo [3.16]; energia di un dipolo in un campo esterno [3.16, 3.19]; azioni meccaniche su di un dipolo nel caso di campo uniforme e non [3.19]. Dipolo elettrico "dinamico" [12.3].
4. Dielettrici [4.11]. Vettore intensità di polarizzazione  $\mathbf{P}$ ; cariche legate e campo elettrico risultante nello *slab*. Relazione tra densità di carica legata e  $\mathbf{P}$  in sostanze uniformemente polarizzate e non. Significato della *div P*.
5. Relazione tra  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{D}$  [4.12]. Prima equazione di Maxwell. Costante dielettrica e suscettività dielettrica [4.13].
6. Passaggio da un dielettrico ad un altro [4.16]. Misurazioni dei vettori  $\mathbf{E}$  e  $\mathbf{D}$  [4.17]. Esempio del condensatore piano con due dielettrici [4.18]. Rigidità dielettrica [4.18].
7. Energia elettrostatica di un condensatore e densità di energia del campo elettrico (verifica della validità della formula) [3.30]. Misura della  $\epsilon_{\text{r}}$  [4.19].

8. La corrente elettrica [5.1]. Intensità di corrente [5.1]. Vettore densità di corrente  $\mathbf{J}$ , sua relazione con la velocità media dei portatori [5.1]. Legge di Ohm microscopica [5.5]. Equazione di continuità della carica nei casi stazionari e non [5.2].
9. Resistenza ohmica [5.3]. Forza elettromotrice [5.8]. Resistenza in serie e parallelo. Inserzione di voltmetro e amperometro. Legge di Ohm generalizzata. Resistenza interna di un generatore. Ponte di Wheatstone. Sensibilità di uno strumento. Errore di una misurazione diretta e indiretta [da laboratorio].
10. Il vettore  $\mathbf{B}$  [6.4]. Forza di Lorentz su una carica in moto [6.5]. Forza su un elemento di circuito percorso da corrente [6.4]. Passaggio dall'una all'altra espressione della forza [6.5]. Seconda legge di Laplace [6.4].
11. Azioni meccaniche di un campo su una spira [6.20.1]. Momento magnetico di una spira. Energia del dipolo magnetico. Dipolo magnetico in campo magnetico non uniforme.
12. Campo generato da una corrente. Prima legge di Laplace [6.7]. Legge della circuitazione di Ampere [6.12]. Esempificazione della loro equivalenza (caso del filo rettilineo indefinito). Campo generato da una spira [6.9]. La divergenza di  $\mathbf{B}$ : seconda equazione di Maxwell [6.11]. Introduzione formale di  $\mathbf{H}_0$  [6.13].
13. Quarta equazione di Maxwell nel caso stazionario nel vuoto [6.12]. Quarta equazione di Maxwell nel caso non stazionario. Corrente di spostamento [9.1]. Interazione tra correnti rettilinee: definizione dell'Ampere [6.10].
14. Correnti atomiche e momento magnetico di un atomo [7.5]. Magnetone di Bohr. Teorema di Larmor [7.6]. Aspetti microscopici di para-, dia- e ferromagnetici [7.3]. La polarizzazione magnetica [7.2].
15. Aspetti macroscopici di dia- e paramagnetici [7.9]. Il vettore  $\mathbf{M}$  [7.10]. Il vettore  $\mathbf{H}$  nella materia. Teorema della circuitazione di Ampère nel caso delle "correnti legate". Relazioni tra  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{B}$ . Suscettività e permeabilità,  $\mu_r$ , nei para- e diamagnetici [7.12].
16. Il ferromagnetismo [7.12.3]. Aspetti microscopici e macroscopici. Relazione tra  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{H}$  e  $\mathbf{M}$ . Dipendenza della suscettività magnetica e permeabilità magnetica dal campo magnetizzante. Ciclo di magnetizzazione; elementi per il progetto di un elettromagnete [7.15-17].
17. La legge dell'induzione magnetica [8.2]. Enunciazione secondo Faraday-Neumann [8.3]. Deduzione della legge dall'esistenza della forza di Lorentz. Terza equazione di Maxwell. *F.e.m.* come lavoro di un campo elettromotore. Flusso tagliato e flusso concatenato [8.4].
18. Autoinduzione [8.6]. Mutua induzione. Extra-correnti di chiusura e apertura in un circuito induttivo. Carica e scarica di un condensatore.
19. Energia del campo magnetico [8.7]. Densità di energia. Dimostrazione della validità della formula nel caso particolare del filo coassiale. Bilancio energetico in circuiti RC e RL.
20. Circuiti R, L, C in alternata [8.9-10]. Oscillazioni forzate. Oscillazioni smorzate. Risonanza [appunti distribuiti].

21. Le quattro equazioni di Maxwell [9.2]. Il teorema di Poynting [9.5]. Vettore di Poynting: suo significato e sua definizione come grandezza dimensionata.
22. Onda piana polarizzata linearmente [9.3, 1 e 2]. Equazione dell'onda di D'Alembert: sua deduzione dalle equazioni di Maxwell. Soluzione generale dell'equazione: onda progressiva e regressiva. Rapporto tra i moduli di  $\mathbf{E}$  e  $\mathbf{H}$ . Velocità della luce nel vuoto.
23. Onda piana polarizzata linearmente e sinusoidale [9.3.3]. Sua importanza in rapporto all'analisi di Fourier [8.1]. Relazione di dispersione. Intensità di una radiazione [9.3.4].
24. Battimenti tra due oscillazioni di eguale ampiezza e frequenze vicine; somme di due onde con pulsazioni e numeri d'onda prossimi [appunti distribuiti]. Velocità di modulazione. Velocità di gruppo e velocità di fase. Pacchetti d'onda; spettro di Fourier di un pacchetto d'onda; principio di indeterminazione tempo – energia [12.7.8].
25. Interazione onda – materia: indice di rifrazione complesso, costante  $\epsilon_r$  e polarizzabilità atomica: legame [12.3]. Assorbimento nei dielettrici.
26. Assorbimento nei metalli [12.6]. Caso delle basse frequenze. Caso delle alte frequenze.
27. Il sistema internazionale da elaborazione personale (sulla base degli argomenti precedentemente trattati).  $\epsilon_0$ : sua equazione dimensionale.  $\mu_0$ : sua equazione dimensionale. Velocità della luce.
28. Dalle equazioni di Maxwell al teorema di Poynting, alle equazioni di D'Alembert (da elaborazione personale sulla base degli argomenti precedentemente trattati) da elaborazione personale. Enunciazione dei contenuti delle equazioni di Maxwell.
29. Corda continua [appunti distribuiti]. Dipendenza della velocità dalla tensione della fune e dalla densità lineare della fune. Quantizzazione delle lunghezze d'onda.

#### Ottica.

30. Interferenza: definizione generale [14]. Sorgenti coerenti e incoerenti. Interferenza tra onde prodotte da due sorgenti coerenti: *a*) intensità media dell'onda risultante quando le sorgenti non sono coerenti, *b*) interferenza costruttiva e distruttiva.
31. Metodo per osservare l'interferenza [14.1]. Interferenza in lamine sottili [14.2].
32. Principio di Huyghens – Fresnel. Diffrazione: definizione generale. Diffrazione da una fenditura rettangolare indefinita e interpretazione fenomeno diffrazione [appunti distribuiti].
33. Reticolo di diffrazione [appunti distribuiti]. Diffrattometro. Misura della lunghezza d'onda. Collimatore. Cannocchiale. Errore nella misurazione di  $\lambda$  [laboratorio].
34. Propagazione della luce nei mezzi anisotropi [16.1]. Ellissoide degli indici [16.2-3]. Prisma di Nicol [16.4]. Lamina a quarto d'onda [16.4].

#### Termodinamica.

35. Termoscopio, termometro, scala centigrada, termometro a gas, temperatura assoluta, temperatura termodinamica [Rif.: Lovera et al., I, II].

36. Il calore: suo significato fisico e sua misura [III]. Propagazione del calore. conduzione e convezione [III.5]. Capacità termica e calore specifico. Calorimetro isoterma e adiabatico.
38. Gas perfetti [II.4]. Teoria cinetica dei gas [II.5, II.7]. Gas reali [II.10]. Cambiamenti di stato [II.14].
39. Trasformazioni termodinamiche [III.6,-8]. Enunciazione del primo principio della termodinamica in forma differenziale.
40. Dimostrazione sperimentale dell'equivalenza tra lavoro e calore ed espressione integrale del primo principio [III.9-10, III.12]. Energia interna.
41. Calori specifici a volume costante e a pressione costante: loro relazione [III.12-13].  $C_p$ ,  $C_v$  per gas "perfetti" monoatomici e biatomici.
42. Ciclo di Carnot [IV.1-8]. Rendimento ciclo di Carnot. Enunciazione del secondo principio della termodinamica. Enunciazione del teorema di Carnot. Temperatura termodinamica.
43. Enunciazione del secondo principio della termodinamica: enunciati di Clausius e di Kelvin, loro equivalenza. Teorema di Carnot [IV.4].
44. Enunciazione del teorema di Clausius in trasformazioni reversibili. Variazione di entropia: sistema isolato. Universo termodinamico [IV.7-9]. Entropia e reversibilità. Entropia e irreversibilità. Variazioni di entropia dell'universo in seguito a trasformazioni naturali [IV.13].

#### *Meccanica statistica.*

45. Discretizzazione dei livelli in un sistema confinato. Probabilità termodinamica e distribuzione di equilibrio: funzione di partizione. Equipartizione dell'energia; interpretazione statistica di lavoro e calore. Entropia e disordine. Entropia e informazione [appunti distribuiti].

#### BIBLIOGRAFIA

E. Amaldi, R. Bizzarri, G. Pizzella, *Fisica generale (elettromagnetismo, relatività, ottica)*, Zanichelli.  
 Lovera, Malvano, Minetti, Pasquarelli, *Calore e termodinamica*, Levrotto & Bella, Torino.

#### ESAME

La prova d'esame consta di una prova scritta e una orale. Le due prove debbono considerarsi un tutto unico e si integrano a vicenda.

La prova scritta ha validità solo se superata con almeno 15 punti su 30.

Immediatamente dopo la fine del corso avrà luogo una prova scritta "di esonero" con validità un anno accademico.

In ogni appello d'esame verrà proposta una prova scritta che potrà talvolta essere individuale o a piccoli gruppi (nelle sessioni in cui si presentino particolari difficoltà nel reperimento spazi per esami).

In un dato appello la prova orale può seguire immediatamente nel tempo la prova scritta, senza soluzione di continuità. Se uno studente desidera separare nel tempo prova scritta e prova orale può farlo nel senso che la validità della prova scritta, una volta superata, è estesa a tutta la sessione.

*Avviso importante.* Non è richiesta prenotazione per l'esame, ma chiunque voglia sostenere l'esame scritto o orale in corrispondenza di un dato appello d'esame deve presentare lo statino all'ora fissata per l'appello stesso e cioè prima dell'inizio della prova scritta, anche se il candidato è da questa esonerato.

Per evidenti esigenze organizzative, chi non avrà presentato lo statino al momento fissato in bacheca per l'inizio dell'appello o comunque al massimo entro la prima mezz'ora (in caso di ritardi indipendenti dalla volontà del candidato) non potrà essere ammesso a sostenere le prove.

## Q2170 Fondamenti di informatica

Anno: periodo 2:1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+2+2 (ore settimanali)

Docente: Giuseppe Amongero

Il corso intende presentare i fondamenti dell'informatica, con lo scopo di chiarirne i principi teorici per permettere una corretta valutazione delle possibilità applicative degli elaborati elettronici. Ci si prefigge inoltre di fare acquisire agli allievi una discreta "manualità" nell'uso degli elaboratori, attraverso l'impiego di strumenti di produttività individuali e di un linguaggio di programmazione. Il corso è propedeutico ai corsi specialistici di informatica; inoltre fornisce le basi per molti corsi di carattere matematico-fisico che richiedono l'uso del calcolatore per le esercitazioni e lo sviluppo di casi di studio.

**REQUISITI.** Non esiste nessuna propedeuticità specifica in termini di esami, ma è utile avere buone basi matematiche ed attitudine al ragionamento.

### PROGRAMMA

#### *Cenni storici* [2 ore]

Evoluzione del calcolo automatico: breve storia dei calcolatori meccanici, elettromeccanici ed elettronici.

#### *Codifica dell'informazione* [10 ore]

Sistemi di numerazione (in particolare il sistema binario); numeri relativi (codifica in modulo e segno ed in complemento a due); numeri frazionari (problemi di approssimazione; codifica *fixed point* e *floating point*; lo *standard* IEEE-754); codifica BCD; operazioni aritmetiche in binario puro ed in complemento a due; errori di *overflow* e di *underflow*; informazioni non numeriche (codici binari, codice ASCII); protezione dell'informazione dagli errori casuali (codici a rivelazione ed a correzione d'errore).

#### *Logica booleana* [4 ore]

Variabili booleane, operatori logici (*and*, *or*, *not*, *xor*), tavola di verità, teoremi booleani, minimizzazione di espressioni logiche.

**Tecnologia elettronica** [4 ore]

Transistori, porte logiche, circuiti combinatori, *flip-flop*. Circuiti sequenziali, registri; tecnologie elettroniche (MOS, bipolari, circuiti integrati).

**Architettura degli elaboratori elettronici** [8 ore]

Unità di *input* (*buffer*, ADC; tastiera, *mouse*, *scanner*, tavoletta grafica); unità di *output* (*buffer*; video, stampanti, *plotter*); unità operativa (ALU, registri, *flag*); memoria (indirizzamento, RAM, ROM; *floppy disk*, *hard disk*, CD-ROM; nastri magnetici, QIC, DAT); unità di controllo (*program counter*, *instruction register*, esecuzione di un'istruzione)

**Il software** [4 ore]

Il sistema operativo (funzionalità; sistemi *batch*, *multitask*, *time-sharing*, *real-time*, *fault tolerant*); gli strumenti per lo sviluppo dei programmi (interprete, compilatore, *linker*, librerie statiche e dinamiche, *debugger*, *profiler*); linguaggi di programmazione (codice macchina, linguaggio *assembler*, linguaggi ad alto livello).

**Il sistema operativo MS-DOS** [4 ore]

Organizzazione interna, interfaccia utente, *file* di comandi, istruzioni di configurazione.

**Strumenti di produttività individuale** [8 ore]

Elaborazione di testi e tabelle in formato elettronico; *database*.

**Il linguaggio C** [20 ore]

Tipi di dato, istruzioni di assegnazione, operazioni aritmetiche e logiche, istruzioni di controllo, sottoprogrammi e passaggio dei parametri, libreria di I/O, libreria matematica, *file* di testo.

**Telematica** [12 ore]

Tipologie di comunicazione (seriale, parallela; sincrona, asincrona; a commutazione di circuito e di pacchetto); reti di calcolatori (topologia a stella, ad anello ed a *bus*; LAN, MAN e WAN; esempi: lo *standard* IEEE 802.3, la rete Internet); strumenti di comunicazione in rete (posta elettronica, trasferimento di dati, terminale virtuale; il ciber spazio: *gopher*, *veronica*, *wais*, *www*); sistemi *client-server*.

**ESERCITAZIONI**

- Codifica dell'informazione: conversioni tra basi diverse, codifica di numeri relativi e razionali, codifica di informazioni generiche, rivelazione e correzione di errori casuali; [2 ore]
- operazioni aritmetiche: addizioni e sottrazioni in binario puro ed in complemento a due; [2 ore]
- logica booleana: verifica di espressioni logiche, costruzione e minimizzazione di funzioni logiche; [2 ore]
- architettura degli elaboratori elettronici: dimensionamento di componenti e calcolo di prestazioni; [2 ore]
- i *personal computer* MS-DOS: configurazione *software* di un PC, scrittura di *file* di comandi; [4 ore]
- programmazione in linguaggio C: interfacce a menù, applicazione di formule matematiche, riduzione di dati numerici, analisi di testi. [16 ore]

**LABORATORIO**

- uso dei *personal computer* MS-DOS; [4 ore]
- programmazione in linguaggio C; [14 ore]
- uso di strumenti di produttività individuale; [4 ore]
- uso di strumenti per la navigazione in rete. [2 ore]

**BIBLIOGRAFIA**

Testi di riferimento:

Dispense delle lezioni ed esercitazioni (presso le cooperative del Politecnico).

P. Tosoratti, G. Collinassi, *Introduzione all'informatica*, Ambrosiana.

B. Kernigham, D. Ritchie. *Il linguaggio C*, Jackson.

Testo per approfondimenti:

Peter Bishop, *Informatica*, Jackson.

**ESAME**

L'esame si articola su due prove scritte (una di teoria ed una di programmazione) da superare entrambe nel medesimo appello. Il voto finale è la media aritmetica (arrotondata per eccesso) dei voti riportati nelle due prove scritte.

Per gli allievi regolari è prevista verso la fine di maggio una prova speciale di teoria che, in caso di superamento, esonera per un anno dalla relativa prova scritta permettendo così all'allievo di sostenere negli appelli successivi solo più la prova di programmazione. La prova di esonero resta valida anche in caso di insufficienza in una prova di programmazione. Nel caso che l'allievo si presenti ad una prova di teoria, il voto dell'eventuale prova di esonero viene automaticamente cancellato, indipendentemente dal risultato della prova di teoria.

**Q3480 Metodi matematici per l'ingegneria**

Anno: periodo 2:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 80+40 (ore, nell'intero periodo)

Docente: da nominare

**REQUISITI**

Il corso si rivolge agli studenti del corso di laurea di Ingegneria nucleare e vuol presentare alcuni argomenti di analisi matematica utilizzati nelle applicazioni. Per questo, sono prerequisiti gli argomenti trattati nei precedenti corsi di *Analisi 1*, *Analisi 2* e *Geometria*. Più precisamente devono essere padroneggiati i concetti di limite, continuità e derivata; gli integrali anche curvilinei e gli elementi di algebra lineare.

**PROGRAMMA**

Il corso si divide in due parti, di circa 40 ore ciascuna. Lo studio delle proprietà delle funzioni olomorfe di una variabile complessa, ivi compresi cenni sulle funzioni armoniche, sul problema di Dirichlet per l'equazione di Laplace e sulle trasformate di Laplace e Fourier occuperà circa la metà del corso. L'altra metà del corso sarà occupata principalmente da cenni di analisi funzionale (spazi di Banach e di Hilbert; operatori lineari); sistemi di polinomi ortogonali; funzioni di Bessel; equazioni delle onde e del calore.

**ESAME.** L'esame consta di una prova scritta e di una prova orale, da sostenersi nel medesimo appello. Non ci sono altre regole (prenotazioni ecc.) oltre quella decisa dalla Facoltà, di limitare a 5 volte il numero dei tentativi in un anno.

## Q 3204      **Meccanica analitica** (Corso ridotto)

Anno/periodo 2:2    Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+2 (ore settimanali); 44+12 (nell'intero periodo)  
Docente: Franco Piazzese

Approfondendo alcuni argomenti fondamentali di fisica classica, il corso (1) fornisce alcuni strumenti fisico-matematici fondamentali di vasta applicabilità, e (2) introduce concetti indispensabili nello studio della fisica moderna, in particolare della meccanica statistica e della meccanica quantistica. Sono impiegati a tal fine strumenti matematici appropriati, in parte noti da altri corsi (quali il calcolo differenziale ed integrale e l'algebra lineare) ed in parte introdotti in questo corso (in particolare il calcolo delle variazioni, di interesse anche in altre applicazioni). Per il carattere culturale, il corso offre argomenti preziosi in un mondo lavorativo tecnico-scientifico in rapida evoluzione.

### PROGRAMMA

Richiami sulla meccanica della particella e dei sistemi di particelle. Vincoli. Gradi di libertà. Sistemi olonomi. Energia cinetica di un sistema olonomo. Spostamenti virtuali. Principio dei lavori virtuali. Equazioni di Lagrange. Estensione delle equazioni di Lagrange ai casi in cui il potenziale dipende dalle velocità e sono presenti forze dissipative descritte dalla funzione di dissipazione di Rayleigh.  
[Rif. bibl.: Goldstein, cap. 1; tempo richiesto (lezioni + esercitazioni): circa 14 ore]

Elementi del calcolo delle variazioni. Principio di Hamilton. Deduzione delle equazioni di Lagrange dal principio di Hamilton. Estensione del principio di Hamilton a sistemi non conservativi e non olonomi. Vantaggi della formulazione variazionale. Analogie fisiche. Teoremi di conservazione e proprietà di simmetria. [Rif. cap. 2; 6 ore]

Problema dei due corpi. Riduzione ad un problema equivalente ad un corpo. Conduzione alle quadrature. [Rif. cap. 3; 4 ore]

Cinematica del corpo rigido. Angoli di Eulero. Parametri di Cayley-Klein. Teorema di Eulero sul moto di un corpo rigido con un punto fisso. Rotazioni infinitesime. Dinamica relativa. [Rif. cap. 4; 6 ore]

Dinamica del corpo rigido. Momento angolare ed energia cinetica. Ellissoide d'inerzia. Equazioni del moto di Eulero. Costruzione di Poincot. Moto di una trottola pesante: quadrature e cenni sulla soluzione. [Rif. cap. 5; 6 ore]

Trasformazioni di Legendre ed equazioni del moto di Hamilton. Teoremi di conservazione e significato fisico dell'hamiltoniana. Deduzione delle equazioni di Hamilton da un principio variazionale (principio di Hamilton modificato). Principio di minima azione di Maupertuis. Analogia formale con il principio di Fermat dell'ottica geometrica. [Rif. cap. 8; 6 ore]

Trasformazioni canoniche. Parentesi di Poisson. Invarianza canonica delle parentesi di Poisson. Identità di Jacobi. Equazioni del moto nella formulazione con le parentesi di Poisson. Trasformazioni canoniche infinitesime e leggi di conservazione nel formalismo delle parentesi di Poisson. Trasformazioni canoniche finite come prodotto di infinite trasformazioni infinitesime; esempi: rotazioni spaziali e moto. Invarianza canonica dell'estensione in fase. Approccio probabilistico: il concetto di *ensemble* e il teorema di Liouville. [Rif. cap. 9; 10 ore]

Cenni sulla teoria di Hamilton–Jacobi per la funzione caratteristica. Analogia fra l'ottica–meccanica e la meccanica ondulatoria. [Rif. cap. 10; 4 ore]

#### BIBLIOGRAFIA

H. Goldstein, *Classical mechanics*, 2nd ed., Addison-Wesley, 1980.

Esiste anche l'edizione italiana (Zanichelli, Bologna, 1971), che, essendo la traduzione della prima edizione americana (1950) è meno consigliata.

Altri eventuali testi consigliati:

A. Fasano, S. Marmi, *Meccanica analitica*, Bollati Boringhieri, 1994.

C. Cercignani, *Spazio, tempo, movimento*, Zanichelli, Bologna, 1976.

#### ESAME

Agli studenti che hanno seguito regolarmente il corso si consiglia di:

1. sostenere una prova scritta al termine del corso, comprendente tanto esercizi quanto domande sulla teoria, riguardante l'intero programma svolto;
  2. presentare, in forma seminariale, un argomento a scelta concordato con il docente.
- La valutazione d'esame, effettuata in base alle prove di cui sopra, sarà registrata nel corso delle regolari sessioni d'esame.

Esiste in ogni caso la possibilità di sostenere l'esame – consistente usualmente in una prova orale sugli argomenti del programma – presentandosi agli appelli d'esame.

## Q4670      **Scienza e tecnologia dei materiali nucleari**

Anno:periodo 2:2    Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+2 (ore settimanali)

Docente: Margherita Appendino Montorsi

Obiettivo principale del corso è quello di impartire le nozioni fondamentali della scienza dei materiali di uso ingegneristico in generale e in particolare di quelli impiegati in campo nucleare. Secondo obiettivo è quello di illustrare alcuni metodi di elaborazione, proprietà e caratteristiche di impiego di detti materiali.

#### REQUISITI

È indispensabile la conoscenza della chimica generale e inorganica, nonché di alcuni concetti fondamentali di fisica e matematica. Sarebbe sufficiente aver ben assimilato e presente quanto costituisce i programmi ministeriali del liceo classico per le suddette materie.

#### PROGRAMMA

Classificazione e proprietà dei materiali di interesse ingegneristico. [2 ore]

Acque per uso industriale. Approvvigionamento e trattamenti preliminari; gas disciolti e degasaggio chimico e fisico; analisi e calcolo della durezza dai dati analitici; metodi di abbattimento della durezza: a) calce-soda, b) fosfati, c) resine scambiatrici sodiche. Metodi di ottenimento di acqua demineralizzata: con resine scambiatrici anioniche e cationiche, per distillazione, con evaporatori a multiplo effetto, per termocompressione. parziale dissalazione dell'acqua per elettrodialisi, osmosi inversa, congelamento. [6 ore]

Produzione di deuterio e acqua pesante a partire dall'acqua demineralizzata: con il metodo elettrolitico, per distillazione frazionata dell'acqua o dell'idrogeno liquido, per scambio isotopico produzione del trizio. Attivazione neutronica e radiolisi dell'acqua. [2 ore]

Nucleo atomico e sua stabilità; radioattività naturale e artificiale; nuclidi; nucleoni e loro energia di legame; reazioni di fissione nucleare; reazioni di fusione nucleare; elementi moderatori sezione di cattura neutronica; attivazione neutronica. [4 ore]

Combustibili e loro classificazione; reazioni di combustione; entalpia di reazione e potere calorifico; potere calorifico superiore e inferiore; aria teorica di combustione; volume e composizione dei fumi; temperatura teorica di combustione; perdite al camino; temperatura di accensione; limiti di infiammabilità; potenziale termico. [5 ore]

Combustibili solidi: litantrace e coke metallurgico.

Combustibili liquidi: petrolio e suoi derivati; legge di Raoult e distillazione frazionata; benzine e numero di ottano; oli diesel e numero di cetano; inquinanti e loro abbattimento.

Combustibili gassosi: gas naturale, gas di gasogeno, gassificazione di prodotti petroliferi.

Combustibili nucleari: calcolo dell'energia sviluppata nelle reazioni di fissione e di fusione nucleare neutroni veloci e neutroni termici. [5 ore]

Legami atomici e proprietà della materia; energia e lunghezza di legame; strutture cristalline perfette; cella elementare; numero di coordinazione.

Difetti reticolari:

di punto, *a*) di tipo chimico, come soluzioni solide o solidi non stechiometrici, e *b*)

di tipo fisico, come vacanze, interstiziali, difetti Schottky e Frenkel, irraggiamento neutronico, diffusione allo stato solido;

di linea: dislocazioni a vite e a cuneo; deformazioni meccaniche;

di superficie: bordi di grano e

di volume: solidi amorfi. [4 ore]

Proprietà termiche dei materiali: capacità termica massica e molare, dilatazione termica e suo coefficiente, conducibilità termica, *shock* termico. [2 ore]

Proprietà meccaniche dei materiali: resistenza a trazione e modulo di Young, resistenza a compressione, durezza, resilienza, scorrimento viscoso a caldo, resistenza a fatica e a flessione. [3 ore]

Proprietà elettriche dei materiali: conduttori, isolanti, semiconduttori, superconduttori; conducibilità elettrica e temperatura; resistenza elettrica e elementi di lega. [2 ore]

Diagrammi di stato a uno e a due componenti; curve di riscaldamento e di raffreddamento eutettici, peritettici, composti intermedi; lettura di diagrammi di stato ternari. [4 ore]

Materiali ceramici: ceramiche, *grès* e laterizi. [1 ora]

Materiali refrattari: definizione, classificazione e prove di refrattarietà libera, sotto carico, porosità, densità; refrattari argillosi, alluminosi, silicei, magnesiaci, dolomitici, cromitici e magnesiocromitici, a base di zirconia; refrattari non tradizionali per usi nucleari: grafite e refrattari a base di carbonio, carburo di silicio e di boro, nitruro di silicio e di boro; ossidi carburi e nitrucci di uranio refrattari usati come combustibili nucleari. [7 ore]

Leganti aerei e idraulici: gesso e cementi Portland, pozzolanico, d'alto forno; idratazione del cemento; calcestruzzo e sue cause di degrado nucleare. [5 ore]

Prodotti siderurgici: produzione della ghisa; marcia dell'alto forno; diagramma di Boudouard e di Chaudron; diagramma di stato ferro-carbonio e ferro-cementite; affinazione della ghisa e produzione dell'acciaio; curve TTT e CCT; tempra e rinvenimento; ricottura, normalizzazione, indurimento per lavorazioni meccaniche; danneggiamento degli acciai per irraggiamento neutronico; acciai inossidabili; diagrammi di stato Fe-Ni e Fe-Cr. [10 ore]

Uranio: minerali e metallurgia dell'uranio; proprietà dell'uranio metallico; composti dell'uranio impiegati nei reattori nucleari. [3 ore]

Torio e plutonio: metallurgia del torio; ciclo dei combustibili nucleari; riprocessamento; plutonio ottenuto con il metodo di estrazione con solventi. [4 ore]

Materiali per incamicciamento dei combustibili nucleari: leghe di alluminio e di magnesio; leghe di zirconio. [3 ore]

Scorie radioattive e loro sistemazione. [2 ore]

#### ESERCITAZIONI

Calcoli sulla durezza delle acque. Calcoli sull'abbattimento della durezza delle acque.

Calcoli per il degassaggio chimico e la dolcificazione con resine delle acque. [3 ore]

Calcoli sulla combustione. [3 ore]

Calcoli sull'energia sviluppata nelle reazioni di fissione e fusione nucleare. [2 ore]

Calcoli sui moduli dei cementi. [2 ore]

Illustrazione delle apparecchiature più usate e normalizzate per la determinazione delle proprietà termiche, elettriche e meccaniche dei materiali. [4 ore]

#### LABORATORIO

Dolcificazione di un'acqua per mezzo di resine scambiatrici sodiche; determinazione della durezza totale, permanente, temporanea di un'acqua; determinazione del potere calorifico superiore e inferiore per un combustibile solido e gassoso; prove di resistenza a trazione e di resilienza su materiali polimerici e metallici; prove di durezza; dilatometro.

#### BIBLIOGRAFIA

C. Brisi, *Chimica applicata*, Levrotto e Bella, Torino, 1988.

J.F. Shackelford, *Materials science for engineers*, McMillan, 1992.

W. Gerasimov, A. Monakhov, *Nuclear engineering materials*, 1983.

C.K. Gupta, *Materials in nuclear energy applications*, CRC Press, 1989.

#### ESAME

L'esame consta di un esonero scritto e di una parte orale. Lo scritto verte su un esercizio di calcolo sulle acque, di uno di calcolo sui combustibili tradizionali, di uno di calcolo sulle reazioni nucleari e di una domanda relativa a acque, combustibili e nucleo. Se l'esonero scritto non viene superato può essere ripetuto ad ogni appello prima di sostenere la prova orale. L'esonero ha validità annuale. L'esame orale verterà ovviamente su tutto il programma svolto a lezione, con esclusione della parte superata in sede di esonero scritto.

## Q0514      **Calcolo numerico**

(Corso ridotto)

Anno: periodo 2:2    Lezioni, esercitazioni, laboratori: 3+1 (ore settimanali)

Docente: Giovanni Monegato

Il corso ha lo scopo di illustrare i metodi numerici di base e le loro caratteristiche (condizioni di applicabilità, efficienza sia in termini di complessità computazionale che di occupazione di memoria) e di mettere gli studenti in grado di utilizzare librerie scientifiche (IMSL, NAG) per la risoluzione di problemi numerici.

REQUISITI. *Analisi 1, Geometria, Fondamenti di informatica.*

### PROGRAMMA

1. *Aritmetica del calcolatore e algoritmi numerici.* [3 ore]

Errori di arrotondamento, operazioni di macchina.

Cancellazione numerica.

Condizionamento di un problema, stabilità di un algoritmo.

2. *Sistemi lineari.* [8 ore]

Metodo di eliminazione di Gauss.

Decomposizione di Gauss e fattorizzazione LU.

Determinazione matrice inversa.

Metodi iterativi: Jacobi, Gauss-Seidel, SOR.

3. *Autovalori di matrici.* [4 ore]

Metodo delle potenze.

Metodo delle potenze inverse.

Cenni sul metodo QR.

4. *Approssimazione di dati e di funzioni.* [8 ore]

Interpolazione polinomiale: formule di Lagrange e di Newton.

Interpolazione con funzioni polinomiali a tratti.

Funzioni *spline*.

Metodo dei minimi quadrati.

5. *Equazioni non lineari.* [3 ore]

Radici di equazioni non lineari: metodi di bisezione, secanti, tangenti; metodi iterativi in generale.

Sistemi di equazioni non lineari: metodo di Newton e sue varianti; metodi iterativi in generale.

6. *Calcolo di integrali.* [4 ore]

Formule di quadratura di tipo interpolatorio: formule di Newton-Cotes e formule gaussiane.

Formule composte.

7. *Equazioni differenziali ordinarie.* [4 ore]

Metodi *one-step* espliciti. Metodi Runge-Kutta.

Metodi *multistep* lineari. Metodi di Adams.

Convergenza e stabilità dei metodi numerici.

**ESERCITAZIONI**

Vengono sottolineati, con esempi, aspetti particolarmente importanti degli argomenti trattati nelle lezioni, svolti esercizi che contribuiscono ad una miglior comprensione della teoria e costruiti algoritmi di calcolo. Vengono infine proposte allo studente delle esercitazioni al calcolatore da svolgere a casa o presso i LAIB del Politecnico.

**BIBLIOGRAFIA**

G. Monegato, *Elementi di calcolo numerico*, Levrotto & Bella, Torino, 1995.

**ESAME**

1. Per i soli iscritti al corso è prevista una prova scritta finale, su tutto il programma svolto, sostitutiva dell'esame orale. Tale prova è da considerarsi alternativa al primo appello d'esame. Nel corso della prova non è ammessa la consultazione di testi. L'eventuale ritiro durante la prova di esonero non comporta alcuna conseguenza.
2. Negli appelli previsti dal calendario l'esame è solo orale.

**Q4600 Scienza delle costruzioni**

Anno/periodo 3:1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 4+4+2 (ore settimanali)

Docente: Franco Algotino (collab.: Giorgio Faraggiana, Guglielmo Guglielmi)

Il corso pone le basi per lo studio del corpo deformabile.

Imposta il problema del corpo elastico e presenta la soluzione del problema di Saint Venant. Vengono studiate principalmente strutture monodimensionali (travi e sistemi di travi. Si imposta il problema dell'instabilità e della non linearità, con trattazione della teoria di Eulero.

Oltre all'impostazione teorica ed analitica dei problemi strutturali, particolare riguardo viene dato alle soluzioni ottenute mediante procedimenti numerici.

**REQUISITI.** Statica nel piano e nello spazio, geometria delle aree, analisi matematica, calcolo numerico.

**PROGRAMMA**

*Richiami di statica e geometria delle aree.* [4 ore]

*Analisi dello stato di deformazione.* [4 ore]

Deduzione delle componenti del tensore di deformazione in un riferimento cartesiano ortogonale, deformazioni principali, equazioni di congruenza.

*Analisi dello stato di tensione.* [6 ore]

Equazioni indefinite di equilibrio, componenti del tensore di tensione in diverse direzioni, cerchi di Mohr, tensioni principali.

*Equazione dei lavori virtuali.* [6 ore]

Applicazione al corpo deformabile.

*Leggi costitutive del materiale.* [4 ore]

Il corpo elastico, la legge di Hooke, il corpo isotropo, tensioni ideali e limiti di resistenza.

*Teoremi energetici.* [4 ore]

Lavoro di deformazione, condizioni di minimo.

*Il solido di Saint Venant.* [10 ore]

Definizione e impostazione generale del problema. Flessione deviata. Taglio: teoria approssimata. Torsione: sezione circolare, sezione cava e sezione sottile aperta.

*Travi e travature.* [8 ore]

Travature piane caricate nel loro piano e trasversalmente. Travature spaziali. Calcolo delle sollecitazioni degli spostamenti in travature isostatiche ed iperstatiche.

*Fenomeni di instabilità.* [4 ore]

l'asta caricata di punta, teoria di Eulero. L'asta oltre il limite elastico. Fenomeni del secondo ordine.

## ESERCITAZIONI

Equilibrio di sistemi di forze. [2 ore]

Geometria delle aree. [2 ore]

Vincoli nel piano e nello spazio. [2 ore]

Travature reticolari piane. [4 ore]

Travature piane isostatiche grado di vincolo, reazioni vincolari, diagrammi delle caratteristiche di sollecitazione, calcolo di spostamenti. [10 ore]

Travature piane iperstatiche. [10 ore]

Linea elastica di travi diritte. [4 ore]

Flessione deviata: determinazione dell'asse neutro e delle tensioni. [4 ore]

Taglio: determinazione del centro di taglio. [4 ore]

Torsione: determinazione delle tensioni e della deformazione per sezione chiusa e aperta. [4 ore]

Instabilità: l'asta caricata di punta con diverse condizioni di vincolo in regime elastico e plastico. [4 ore]

## LABORATORIO

Misura degli spostamenti in una trave. [1 ora]

Visita del laboratorio del dipartimento di Ingegneria strutturale. [1 ora]

## BIBLIOGRAFIA

P. Cicala, *Scienza delle costruzioni, Vol. 1 e 2*, Levrotto & Bella, Torino.

G. Faraggiana, A.M. Sassi Perino, *Applicazioni di scienza delle costruzioni*, Levrotto & Bella, Torino.

## ESAME

L'esame è articolato in una prova scritta e una prova orale.

A metà semestre viene effettuata una prova scritta che esonera dallo scritto d'esame.

## Q2040 Fisica nucleare

Anno: periodo 3:1

Docente: Piero Quarati

### PROGRAMMA

#### A. Meccanica quantistica e fisica atomica.

1. *Fenomenologia.* [12 ore]  
Spettro del corpo nero. Effetti Compton e fotoelettrico. Spettroscopia.
2. *Il sistema quantistico.* [12 ore]  
Funzione d'onda. Principio di sovrapposizione degli effetti. Onde piane e particelle libere. Evoluzione dello stato. Equazione di Schrödinger. Equazione di continuità per la probabilità. Principio d'indeterminazione.
3. *Le osservabili fisiche.* [6 ore]  
Operatori quantistici relativi alle grandezze fisiche. Valore medio di una grandezza fisica. Misura di una grandezza in meccanica quantistica. Stati puri e non puri. Significato fisico degli autovalori. Commutazione tra operatori.
4. *Spazi delle configurazioni e degli impulsi.* [12 ore]  
Rappresentazione nei due spazi degli operatori posizione, impulso, energia cinetica, energia totale, momento angolare, Determinazione degli autovalori e autostati di alcuni operatori quantistici come  $p$ ,  $L_z$ ,  $L^2$ , ecc. Funzioni sferiche.
5. *Problemi unidimensionali.* [6 ore]  
Gradino di potenziale e barriera impenetrabile. Barriera rettangolare di altezza finita o infinita. Coefficiente di riflessione e trasmissione.
6. *Meccanica quantistica con il formalismo di Dirac.* [12 ore]  
Stati e grandezze fisiche. Il principio di indeterminazione. Descrizioni di Schrödinger e di Heisenberg. Equazione di evoluzione. Equazione di Schrödinger. Oscillatore armonico. Operatori di creazione e distruzione.
7. *Simmetrie e leggi di conservazione.* [10 ore]  
Teorema di Noether. Invarianza per traslazioni spaziali e temporali, invarianza per rotazioni spaziali. Invarianza per trasformazioni globali di *gauge*. Simmetrie interne. Leggi di conservazione e numeri quantici.
8. *Campi centrali e atomi idrogenoidi.* [10 ore]  
Interazione a due corpi. Forze a simmetria centrale. Campi coulombiani. Numeri quantici atomici.

#### B. Fisica nucleare.

1. *Fenomenologia nucleare.* [4 ore]  
Sistematica nucleare. Massa, carica, energia di legame, spin isotopico, momento angolare del nucleo.
2. *Modelli nucleari.* [6 ore]  
Modello a goccia liquida. Formula semiempirica delle masse. Linea di stabilità. Modello a *shell*. Accoppiamento *spin* – orbita.
3. *Decadimento radioattivo.* [12 ore]  
Decadimento alfa, effetto *tunnel*. Decadimento beta e cattura elettronica. Decadimento gamma.
4. *Forze nucleari.* [4 ore]  
Modello del deutone. Interazione protone – neutrone. Stato virtuale. Teoria mesonica delle forze nucleari.

5. *Reazioni nucleari*. [8 ore]  
Sezioni d'urto. Teoria dello *scattering*. Reazioni dirette e indirette. Reazioni indotte da neutroni e da raggi gamma.
6. *Fissione e fusione nucleare*. [4 ore]  
Modelli macroscopici. Energia rilasciata.
7. *Classificazione delle particelle elementari*. [2 ore]  
Leptoni ed adroni. Interazioni elettrodeboli e forti. Mesoni intermedi. *Quarks* e gluoni. Struttura interna degli adroni (barioni e mesoni).

#### BIBLIOGRAFIA

H. Haken, H. Wolf, *Fisica atomica e quantistica*, Boringhieri.  
 C. Rossetti, *Lezioni di Istituzioni di fisica teorica*, Levrotto e Bella.  
 W. Meyerhof, *Elements of nuclear physics*, McGraw-Hill (oppure Dunod, franc.).  
 W.E. Burcham, Lobbs, *Nuclear and subnuclear physics*, Longman.  
 Dispense di *Istituzioni di fisica teorica*, a cura del docente.

ESAME. Orale. Il primo argomento è scelto dal candidato. La commissione propone altri due argomenti. All'inizio vengono anche sottoposti due esercizi elementari.

## Q5950 Termodinamica applicata

Anno: periodo 3:1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 4+4 (ore settimanali); 56+56+8 (nell'intero periodo)

Docente: Paolo Gregorio

Il contenuto del corso è ripreso dal capitolo sulla termodinamica dell'insegnamento tradizionale della fisica tecnica presso questa Facoltà, opportunamente ampliato ed adattato alle esigenze del corso di laurea in Ingegneria nucleare.

Gli argomenti trattati stabiliscono tutti i fondamenti della termodinamica di base ed alcuni elementi delle applicazioni ingegneristiche della termodinamica avanzata ed hanno inoltre funzione propedeutica ai corsi successivi del triennio (in particolare *Macchine*, *Termocinetica*, *Termofluidodinamica degli impianti nucleari 1 e 2*, ecc.).

REQUISITI. *Analisi matematica 2, Fisica 2.*

#### PROGRAMMA

*Introduzione*. [3 ore]

Natura della termodinamica, relazione con la meccanica classica, temperatura, calore e legge zero, scale di temperatura, il principio di stato, lavoro, proprietà termodinamiche, leggi fondamentali della termodinamica, gas ideale.

*Richiami ed applicazioni del primo principio della termodinamica*. [6 ore]

Sostanze pure e cambiamenti di stato: proprietà delle sostanze pure, evaporazione, proprietà del vapore umido (regioni di saturazione), stati metastabili, rappresentazioni grafiche (diagrammi di Clapeyron, Gibbs e Mollier).

*Analisi energetica dei sistemi aperti*. [4 ore]

Bilanci energetici e convenzioni di segno, il sistema chiuso, il sistema aperto, il volume di controllo, sommario dei casi speciali di sistemi aperti, il coefficiente di Joule-Thomson.

*Richiami alle nozioni di base sul secondo principio della termodinamica.* [7 ore]

Secondo principio, enunciato secondo Kelvin-Planck e secondo Clausius, processi reversibili e cicli, temperatura termodinamica, equazioni di Clausius, definizione macroscopica dell'entropia, principio dell'incremento di entropia, entropia di una sostanza pura, variazione di entropia per un gas ideale, il ciclo di Carnot, il secondo principio per i sistemi aperti, interpretazione microscopica dell'entropia.

*Lavoro disponibile ed analisi dei processi.* [6 ore]

Concetto generale, sistemi aperti interagenti con una o più capacità termiche in condizioni di moto stazionario, sistemi chiusi soggetti a trasformazioni finite e cicliche, analisi dei processi per sistemi aperti e sistemi chiusi, rappresentazioni grafiche.

*Equazioni di stato e relazioni generali.* [3 ore]

Preliminari matematici, funzioni di Helmholtz e Gibbs, l'equazione dell'energia, le relazioni di Maxwell, entalpia, energia interna ed entropia, relazioni tra calori specifici, l'equazione di Clausius-Calpeyron, equazioni di stato, proprietà dei gas reali.

*Miscele di aria e vapor d'acqua.* [5 ore]

La legge di Gibbs-Dalton, proprietà energetiche delle miscele, saturazione adiabatica, la carta psicrometrica, processi di condizionamento dell'aria, torri di refrigerazione.

*Cicli.* [8 ore]

Considerazioni generali, cicli a vapore, deviazioni dai cicli teorici, analisi dei cicli, compressori di gas, cicli delle macchine a combustione interna (Otto, Diesel, Stirling), cicli delle macchine con turbine a gas, analisi exergetica dei cicli, cicli inversi a vapore, la pompa di calore, cicli inversi ed assorbimento.

*Termodinamica dei processi irreversibili.* [8 ore]

Leggi fenomenologiche e loro applicabilità, relazioni di reciprocità di Onsager, flusso termico e generazione entropica, fenomeni termoelettrici (effetti Seebeck, Peltier, Thomson), circuiti termoelettrici.

*Conversione diretta dell'energia.*

Celle a combustibile, dispositivi termoelettrici e termoionici, generatori magnetoidrodinamici.

*Efflusso degli aeriformi.* [6 ore]

Termodinamica dell'efflusso. Equazioni fondamentali. Velocità del suono, leggi di Newton e Laplace. Efflusso degli aeriformi in condotti a regime variabile. Parametri critici. Regime trans-sonico. Ugelli supersonici.

**ESERCITAZIONI.** Esercizi di calcolo su tutti gli argomenti trattati, esercitazioni di calcolo e grafiche sui cicli, con particolare riferimento a quelli utilizzati negli impianti nucleari, alcune esercitazioni di laboratorio.

**BIBLIOGRAFIA**

C. Boffa, P. Gregorio, *Elementi di fisica tecnica. Vol. 2*, Levrotto & Bella, Torino, 1981.

P. Gregorio, *Esercizi di fisica tecnica*, 2 vol., Levrotto & Bella, Torino, 1990.

P. Gregorio, *Fisica tecnica: temi d'esame svolti*, Levrotto & Bella, Torino, 1990.

**ESAME**

L'esame consiste in una prova scritta e in una prova orale; la prima è costituita dalla soluzione di tre esercizi (in due ore), mentre la seconda è puramente teorica, sulla base degli argomenti svolti a lezione. Si è ammessi alla prova orale solo dopo il superamento di quella scritta (che ha validità illimitata), ed il voto finale tiene conto dei risultati di entrambe le prove.

## Q1790 Elettrotecnica

Anno/periodo 3:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+2+2 (ore settimanali); 80+20+20 (nell'intero periodo)  
 Docente: Edoardo Barbisio

Scopo del corso è fornire una metodologia per una corretta utilizzazione di macchine ed impianti elettrici, che tenga conto dei problemi di sicurezza dell'operatore e dell'impianto. A tal fine, dopo aver esposto i fondamenti dell'analisi delle reti di bipoli (con accenni ai tripoli e ai doppi bipoli di più frequente impiego) e della teoria dei campi, evidenziando le interconnessioni metodologiche d'approccio, se ne mostra l'impiego nei modelli delle principali macchine e degli impianti di distribuzione dell'energia elettrica. Tali argomenti sono integrati da notizie riguardanti le basilari apparecchiature di comando e di protezione.

REQUISITI. *Analisi 1 e 2, Fisica 1 e 2, Geometria.*

### PROGRAMMA

Reti elettriche a costanti concentrate (reti di multipoli): teoremi generali di vincolo per tensioni e correnti. Teorema di Tellegen. [6 ore; rif.: BCD]

Caratteristica grafica di un bipolo. Punto di lavoro. Composizioni grafiche di caratteristiche per reti di bipoli in serie / parallelo. Diodo ideale. [3 ore; rif.: CDCh]

Bipoli ideali elementari attivi e passivi. Generatori pilotati. Trasformatore ideale. Partitore di tensione e di corrente. Potenza ed energia. Adattamento di carico. Dualità. [5 ore; rif.: BCDCh]

Modelli elementari di bipoli reali attivi e passivi. [2 ore; rif.: C]

Soluzione analitica di reti lineari serie / parallelo in regime stazionario: principio di sovrapposizione degli effetti, teoremi di Thévenin e Norton, teorema di Millman. Reti a ponte. Trasformazione stella / triangolo. [7 ore; rif.: BCD]

Circuiti RC ed RL ad una costante di tempo. [4 ore; rif.: Ch]

Grandezze periodiche. Grandezze ad andamento sinusoidale permanente. Operazioni algebriche ed integro-differenziali su grandezze sinusoidali: spazio vettoriale associato. Operatori: impedenza e ammettenza. Potenza in regime sinusoidale. [6 ore; rif.: BCDCh]

Studio analitico e grafico di reti lineari serie / parallelo in regime sinusoidale permanente. Circuiti risonanti. Diagrammi di Nyquist e di Bode. Rifasamento monofase. [5 ore; rif.: BCDCh]

Sistemi trifasi simmetrici ed equilibrati. Misure di potenza con inserzione Aron. Rifasamento trifase. [2 ore; rif.: CD]

Confronto tra sistemi monofasi e trifasi per il trasporto dell'energia. Carichi squilibrati. Cenni alle deformazioni di tensioni / correnti nei sistemi simmetrici con carichi non lineari. [2 ore; rif.: CCpD]

Reti lineari in regime transitorio d'ordine superiore al primo. Calcolo rapido delle pulsazioni proprie. Relazioni tra pulsazioni proprie e componenti di una rete. Calcolo del termine forzante. Caso della risonanza. [4 ore; rif.: BCDCh]

Campi stazionari di corrente: uniforme, cilindrico, sferico. Proprietà integrali e locali. Potenza volumica. Rifrazione delle linee di campo. Impianti di messa a terra: indicazioni sul progetto ed il collaudo. Dimensionamento e protezione dei conduttori. Interruttori magnetotermici e differenziali. [4 ore; rif.: CKNSCa]

Campi stazionari nei dielettrici: uniforme, cilindrico, sferico. Proprietà integrali e locali. Energia volumica. Rifrazione delle linee di campo. Rigidità dielettrica. [2 ore; rif.: CKNS]

Campo magnetico stazionario e quasi stazionario. Proprietà integrali e locali. Energia volumica. Campo provocato da conduttori rettilinei indefiniti percorsi da corrente. Campo in un toroide. Ciclo d'isteresi. Perdite per isteresi. Energia magnetica volumica. Rifrazione delle linee di campo. [4 ore; rif.: CKNS]

Analogie tra campi magnetici e di corrente: circuiti magnetici. Induttori con traferro. Induttori saturabili. Circuiti con magneti permanenti. [4 ore; rif.: CDKS]

Legge d'induzione elettromagnetica. Circuiti mutuamente accoppiati. [2 ore; rif.: CDS]

Trasformatore / autotrasformatore monofase e trifase: cenni costruttivi e circuito equivalente completo. Prova a vuoto e in corto circuito. Dati di targa. Variazione di tensione sotto carico. [4 ore; rif.: CDS]

Azioni elettromeccaniche. Strumenti di misura magnetoelettrici, elettromagnetici ed elettrodinamici. Relè polarizzati. Forze tra conduttori di linea trifase in regime sinodale. [3 ore; rif.: CK]

Campo magnetico rotante. Macchina ad induzione trifase e monofase: cenni costruttivi e circuiti elettrici equivalenti. Caratteristiche meccanica ed elettromeccanica. Metodi di avviamento dei motori asincroni trifasi e monofasi. Diagramma circolare. [4 ore; rif.: CChD]

Macchine a corrente continua: schema costruttivo e circuito equivalente generale. Vari tipi di eccitazione e corrispondenti caratteristiche elettriche e meccaniche. [3 ore; rif.: CChD]

## ESERCITAZIONI E LABORATORI

Le esercitazioni teoriche si svolgeranno a squadre riunite (complessive: 20 ore/allievo). Per quelle pratiche con impiego di *personal computer* si formeranno due squadre (complessive: 16 ore/allievo).

Sono previste dimostrazioni sulle macchine in laboratorio a squadre riunite (4 ore, eventualmente aumentabili a spese delle precedenti).

## BIBLIOGRAFIA

Testo di riferimento:

C P.P. Civalleri, *Elettrotecnica*, Levrotto & Bella, Torino.

Testi consigliati per integrazioni ed approfondimenti:

B G. Biorci, *Fondamenti di elettrotecnica: circuiti*, UTET, Torino.

Ca V. Carrescia (cur.), *Impianti a norme CEI*, TuttoNormel, Torino.

Ch L. Chua, C. Desoer, E. Kuh, *Circuiti lineari e non lineari*, Jackson, Milano.

Cp S. Chapman, *Macchine elettriche*, Jackson, Milano.

D V. Daniele, A. Liberatore, R. Graglia, S. Manetti, *Elettrotecnica*, Monduzzi, Bologna.

K K. Kupfmüller, *Fondamenti di elettrotecnica*, UTET, Torino.

N M. Nayfeh, M. Brussel, *Electricity and magnetism*, Wiley, New York.

S G. Someda, *Elettrotecnica generale*, Pàtron, Padova.

Testi per esercitazioni:

S. Bobbio, *Esercizi di elettrotecnica*, CUEN, Napoli.

G. Fiorio, *Raccolta di esercizi di elettrotecnica*, CLUT, Torino.

A. Laurentini, A.R. Meo, R. Pomè, *Esercitazioni di elettrotecnica*, Levrotto & Bella.

## ESAME

L'esame consiste di una prova scritta seguita da una orale.

### *Modalità di partecipazione allo scritto.*

Il candidato dovrà depositare, in un'apposita cassetta presso il Dipartimento di Ingegneria Elettrica Industriale quattro fogli quadrettati tipo protocollo, compilati secondo le istruzioni affisse presso la cassetta, allegando lo *staino* di iscrizione all'esame. Il termine ultimo di consegna, per motivi organizzativi che coinvolgono anche altri corsi, è fissato alla fine del *penultimo giorno lavorativo* (con esclusione del sabato; si rispetti l'orario di segreteria) precedente la data della prova scritta. Il candidato riporterà inoltre il proprio cognome in un elenco a lato.

Il *giorno lavorativo antecedente* (sabato escluso) a quello dedicato allo svolgimento della prova scritta, alla *stessa ora* di questa, il candidato *dovrà* presentarsi presso il Dipartimento per ritirare una copia rimaneggiata del testo della prova da affrontare l'indomani, in modo che nelle ventiquattro ore successive possa prendere confidenza con gli argomenti oggetto della prova. Ovviamente gli effettivi quesiti non verranno palesati in questo preappello. Nel caso che l'appello sia fissato di lunedì, il preappello, di norma, si effettuerà il venerdì precedente nel pomeriggio, salvo diversa comunicazione affissa in bacheca; in questo caso la bozza consegnata sarà probabilmente più stringata.

A partire dal momento in cui il candidato ritira la bozza *non* sarà possibile *ritirarsi*. Questo, al fine di scoraggiare reiterati tentativi di affrontare l'esame con scarsa preparazione in attesa di imbattersi in problemi di proprio gradimento.

Queste modalità vogliono, da un lato, ridurre le probabilità di insuccesso legate ai tempi ridotti concessi per la prova scritta (3 ore) e favorire l'acquisizione degli ordini di grandezza delle grandezze in gioco; dall'altro, consentire lo studio di problemi di più ampio respiro, che non si riducano solo ad esercizi di tipo scolastico.

Talvolta potrà accadere che per un dato esercizio vengano forniti dati in soprannumero (ma non contraddittori) rispetto alle esigenze del problema. In genere ciò prelude ad una sua reiterazione, con ulteriori quesiti, in uno degli appelli successivi; ma è presente anche un intento educativo: nell'esercizio professionale l'ingegnere deve saper cercare e scegliere per conto suo le grandezze descrittive dei fenomeni in istudio.

Al termine della prova scritta il docente illustrerà uno dei (o qualcuno dei) possibili procedimenti adottabili per la soluzione dei quesiti, con particolare enfasi alla ricerca dei *metodi* che portino al risultato nel modo più semplice possibile. Difatti lo studio dell'elettrotecnica consiste nell'impraticarsi nell'uso di parecchi *strumenti* (metodi di soluzione, ecc.), tra i quali *scegliere il più funzionale* allo studio di un problema; il che può comportare, in pratica, una riduzione, spesso consistente, della mole di calcoli da effettuare, riducendo conseguentemente le possibilità di sbagliare.

I problemi proposti sono quasi sempre riconducibili ad applicazioni pratiche. Sarà motivo di soddisfazione, per lo studente, constatare di aver acquisito un bagaglio teorico che gli permette di affrontare con successo problematiche insolite.

### *Prova orale.*

A distanza di qualche giorno dallo scritto avverrà il completamento dell'esame con una prova orale, durante la quale si discuterà col candidato lo svolgimento dello scritto e si amplierà l'accertamento sul suo grado di preparazione su argomenti addizionali. In questa sede, approfittando dell'interazione studente - docente, si potrà valutare lo spirito critico, oltre al bagaglio culturale, del candidato.

## Q3210 Meccanica applicata alle macchine

Anno: periodo 3:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 76+44 (ore, nell'intero periodo)

Docente: Giovanni Jacazio

Il corso consiste in una presentazione iniziale delle proprietà fondamentali della meccanica dei corpi rigidi, seguita da una trattazione di tutti gli aspetti principali della trasmissione della potenza meccanica da un elemento generatore della potenza ad un elemento utilizzatore della stessa. In questa trattazione vengono descritti i componenti impiegati nella trasmissione della potenza e vengono esaminati i principali aspetti dinamici ad essa collegati, quali vibrazioni meccaniche e regolazione.

### PROGRAMMA

#### 1. *Principi generali di meccanica.*

Moto di un corpo puntiforme e di un corpo rigido rispetto a sistemi fissi e mobili di coordinate. Proprietà di inerzia dei corpi rigidi. Forze di massa e di superficie agenti sui corpi. Vincoli, reazioni vincolari, gradi di libertà, equazioni di equilibrio statico dei corpi rigidi. Quantità di moto e momento della quantità di moto. Lavoro ed energia. Equazioni di equilibrio della dinamica. Urto fra corpi rigidi.

#### 2. *La trasmissione del moto.*

Giunti: giunto di Cardano, giunto di Oldahm, giunti omocineticici.

Flessibili: argani di sollevamento, trasmissioni a cinghie, trasmissioni con catene.

Ingranaggi: caratteristiche generali delle ruote dentate, ingranaggi cilindrici, ingranaggi conici, ingranaggi ad assi sghembi.

Rotismi: rotismi ordinari ed epicicloidali; riduttori, differenziale, riduttori armonici.

Viti: trasmissioni a vite / madrevite, viti differenziali e multiple, viti a circolazione di sfere.

Meccanismi articolati: procedimento generale per il calcolo cinematico dei meccanismi articolati; manovellismo, quadrilatero articolato, meccanismo a braccio oscillante.

Freni ed arresti: freni a fluido, freni ad attrito (a tamburo, a dischi, a nastro), dissipazione dell'energia cinetica in un freno, arresti meccanici.

Innesti: innesti a denti, frizioni a dischi, frizioni coniche, frizioni a forza centrifuga, ruote libere.

Trasmissioni a fluido: trasmissioni idrostatiche, giunti idraulici, convertitori di coppia.

Cuscinetti: cuscinetti a rotolamento, cuscinetti portanti e di spinta con lubrificazione idrodinamica, cuscinetti con lubrificazione idrostatica.

#### 3. *Vibrazioni meccaniche.*

Metodologie di studio delle vibrazioni meccaniche. Risposta impulsiva e ad una eccitazione sinusoidale di sistemi a uno e a molti gradi di libertà, modi di vibrazione, battimenti, trasmissibilità ed isolamento delle vibrazioni. Vibrazioni di sistemi a parametri distribuiti: vibrazioni flessionali e torsionali degli alberi, velocità critiche degli alberi. Vibrazioni di sistemi non lineari: oscillazioni autoeccitate.

#### 4. *Servomeccanismi.*

Principi fondamentali di regolazione applicata ai sistemi meccanici: tipi di sistemi, risposta a comandi a gradino e a rampa, risposta in frequenza. Studio della stabilità: criteri di Routh e Nyquist. Servomeccanismi elettromeccanici, servomeccanismi idromeccanici, servomeccanismi elettroidraulici.

ESERCITAZIONI. Le esercitazioni consistono nella presentazione e risoluzione di problemi di meccanica relativi agli argomenti svolti a lezione.

## BIBLIOGRAFIA

G. Jacazio, B. Piombo, *Meccanica applicata alle macchine*, Levrotto & Bella, Torino, 1991.

G. Jacazio, B. Piombo, *Esercizi di meccanica applicata alle macchine*, Levrotto & Bella, Torino, 1982.

ESAME. L'esame è costituito da una prova scritta, della durata di 4 ore, consistente nella risoluzione di quattro problemi sulle diverse parti del corso.

**Q 1965**      **Fisica dei reattori a fissione +  
Fisica dei reattori a fusione**  
(Corso integrato)

Anno: periodo 3:2

Docente: da nominare

[Testo del programma da "Guida 1994/95"]

La *Fisica dei reattori a fissione* si prefigge di chiarire i principi di funzionamento di tali macchine dal punto di vista del bilancio neutronico e della distribuzione spaziale della potenza, sia in condizioni statiche che dinamiche. I principali metodi fisico-matematici della neutronica applicata vengono analizzati con l'intento di evidenziare il loro effettivo significato fisico e di rendere comprensibili le implicazioni ingegneristiche della teoria nel progetto delle centrali a fissione.

La *Fisica dei reattori a fusione* si propone di fornire la propedeutica essenziale e i più semplici elementi della teoria fisico-matematica che sta alla base del funzionamento delle macchine con cui si tenta di ottenere la fusione nucleare controllata. L'enfasi è posta sui fondamenti dell'elettrodinamica classica e della fluidodinamica dei continui ionizzati, analizzando le orbite delle particelle cariche in campo magnetico e la propagazione delle onde nei plasmi.

L'approccio metodologico vuole essere formativo più che informativo: ciò al fine di permettere che l'allievo sia messo in grado di affrontare autonomamente tutta una vasta gamma di problemi fisico-matematici che si incontrano anche in altri svariati campi della ricerca applicata. Gli argomenti trattati fanno parte del patrimonio culturale strettamente caratteristico dell'ingegnere nucleare.

## PROGRAMMA

**Fisica dei reattori a fissione**

1. Fissione dei nuclei pesanti: bilancio energetico; fondamenti concettuali della teoria di una generica reazione a catena; i neutroni come portatori della catena; classificazione dei reattori.
2. Diffusione e rallentamento dei neutroni nei mezzi materiali: equazione di diffusione monocinetica; moderatori; rallentamento continuo; metodi a multigruppi energetici; cenni al collegamento tra teorie di tipo diffusivo e trasportistico.
3. Teoria della criticità delle strutture moltiplicanti: interazione tra sorgenti neutroniche e mezzi moltiplicanti; equazione critica dei reattori omogenei nudi e riflessi, in diverse approssimazioni; teoria dell'età alla Fermi; cenni ai teoremi fondamentali della fisica dei reattori.
4. Reattori eterogenei: necessità ed effetto dell'eterogeneità; catture in risonanza, mol-

- tipicazioni veloci, utilizzazione dei neutroni termici nei reticoli.
5. Cinetica delle strutture moltiplicanti: influenza dei neutroni ritardati; soluzione delle equazioni dinamiche in diverse approssimazioni; cenni alle retroazioni di temperatura e di densità del combustibile e del moderatore.
  6. Metodi perturbativi nella statica e nella dinamica: funzione importanza dei neutroni; applicazioni ad uno e due gruppi energetici.
  7. Controllo della reazione a catena: teoria elementare delle barre di controllo; nozioni elementari sulla stabilità; aspetti neutronici della sicurezza intrinseca nei reattori a fissione.

### Fisica dei reattori a fusione

1. Fusione dei nuclei leggeri: tipi di reazioni sfruttabili nell'energetica industriale; bilanci energetici; criteri di ignizione di un plasma.
2. Descrizione delle principali macchine per la fusione nucleare ad alta temperatura.
3. Fondamenti di elettrodinamica classica: equazioni di Maxwell; potenziali elettrodinamici; teoremi di conservazione; propagazione dell'energia raggianti.
4. Orbite di particelle cariche in presenza di campo elettromagnetico esterno.
5. Descrizione dielettrica di un plasma: onde nei plasmi.
6. Formulazione delle equazioni di base della magnetofluidodinamica ideale.
7. Cenni ai problemi del riscaldamento dei plasmi ed alla dissipazione di energia radiante.

ESERCITAZIONI. Le esercitazioni prevedono applicazioni teoriche e numeriche.

### BIBLIOGRAFIA.

- B. Montagnini, *Lezioni di fisica del reattore nucleare*, Univ. di Pisa, 1983.  
 A.F. Henry, *Nuclear reactor analysis*, MIT Press, Cambridge (Mass.), 1975.  
 R.O. Dendy, *Plasma dynamics*, Oxford Science Publ., Oxford, 1990.  
 S.E. Corno, Appunti alle lezioni dei corsi di Fisica dei reattori a fissione e a fusione.

## Q1710 Elettronica applicata

Anno: periodo 4:1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+2 (ore settimanali); 70+20 (nell'intero periodo)  
 Docente: Maurizio Vallauri

Il corso intende presentare i fondamenti dell'elettronica a futuri ingegneri nucleari. Dopo una esposizione degli elementi necessari per comprendere la struttura e il funzionamento dei principali "sistemi elettronici" allo stato di sviluppo attuale, si pone l'accento sui circuiti e sulle apparecchiature elettroniche di maggiore interesse per la tecnica nucleare.

REQUISITI. Nozioni propedeutiche indispensabili sono quelle oggetto di un normale corso di *Elettrotecnica* generale.

### PROGRAMMA

*Richiami di nozioni generali.*

Definizioni (sistema, circuito, componente, etc.), sorgenti di tensioni e correnti, componenti (passivi e reattivi), leggi dei circuiti.

*Gli amplificatori operazionali.*

L'amplificatore operazionale ideale come sistema VO, in funzionamento lineare e non lineare. L'amplificatore operazionale reale. Il calcolatore analogico.

*Componenti a semiconduttori.*

Diodi a giunzione, transistori unipolari (FET), transistori bipolari (BJT), tiristori. Modelli circuitali dei diodi e dei transistori. Reazione positiva e negativa nei sistemi elettronici.

Oscillatori. Amplificatori per grandi e piccoli segnali. Risposta in frequenza degli amplificatori.

Elettronica digitale. Algebra di Boole, porte logiche, famiglie logiche. Applicazioni della elettronica digitale: multivibratori, demoltiplicatori (contatori), registri. Conversione analogica – digitale e digitale – analogica.

*Elettronica della tecnica nucleare.*

Elementi base di una catena di conteggio: amplificatori per impulsi, circuiti di coincidenza e anticoincidenza, discriminatori integrali e differenziali. Misuratori di cadenza di conteggio. Alcuni problemi della strumentazione degli impianti nucleari.

ESERCITAZIONI. Le esercitazioni consistono nella discussione in classe di problemi di carattere applicativo, svolti in classe o proposti per lo svolgimento a casa.

**BIBLIOGRAFIA**

Testo di riferimento:

All'inizio del corso viene messa a disposizione degli allievi una copia riproducibile di note manoscritte che coprono la maggior parte del programma. Gli argomenti non trattati nelle note vengono svolti in modo da consentire agli uditori di prendere appunti completi e autosufficienti.

Testi ausiliari, per approfondimenti:

R.J. Smith, R.C. Dorf, *Circuits, Devices and systems*, 5th ed., Wiley, 1992.

J. Millman, A. Grabel, *Microelectronics*, McGraw-Hill, 1988.

U. Tietze, C. Schenk, *Halbleiter-Schaltungstechnik*, Springer (una nuova edizione viene pubblicata a scadenze circa triennali).

**ESAME**

Gli esami consistono in una prova scritta – un tema di carattere teorico da sviluppare senza materiale di riferimento e, immediatamente dopo, uno o più problemi che possono essere svolti con libera consultazione di libri, note ecc. – e in eventuale successivo accertamento orale se il candidato lo desidera.

## Q2775 Impianti nucleari + Ingegneria dei reattori nucleari a fusione

(Corso integrato)

Anno; periodo 4:1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 7+2 (ore settimanali); 94+20+2 (nell'intero periodo)

Docenti: Bruno Panella, Roberto Zanino

Il corso intende fornire le conoscenze di base dell'ingegneria degli impianti nucleari a fissione a fusione, con particolare riferimento alle centrali per la produzione di energia elettrica.

Dopo aver descritto i principali tipi di reattori a fissione e giustificate le scelte di impianto e dei materiali verranno analizzati i metodi di progettazione dei componenti e i problemi di sicurezza.

Per i reattori a fusione, dopo aver fornito alcuni elementi di modellazione del plasma, vengono descritte le principali macchine sperimentali e presentati i componenti più importanti di un tokamak.

### PROGRAMMA

#### Impianti nucleari

1. L'energia nucleare nel contesto energetico mondiale: risorse, produzione e consumi di energia; impatto ambientale della produzione di energia; potenzialità. problematiche e ruolo futuro della fonte nucleare. [6 ore]
2. Richiami di fisica del reattore; calcoli energetici e consumo di combustibile; reattori termici e autofertilizzanti: confronto con i combustibili fossili. [6 ore]
3. Scelta dei materiali nei reattori nucleari sulla base delle proprietà nucleari, termofisiche, strutturali, chimiche; scelta del rapporto di moderazione in un reattore termico e stabilità intrinseca; effetto del boro, dell'arricchimento e del diametro della barretta; rateo di fissione; consumo di combustibile e utilizzazione della risorsa uranio; *burnup*; bilancio dei materiali; rapporto di conversione e di fertilizzazione; reattori veloci; coefficienti di reattività; *stretchout*; parametri di prestazione dei noccioli; componenti principali del nocciolo; schermi; recipienti in pressione; *layout* di una centrale di potenza; classificazione dei reattori nucleari. [10 ore]
4. Breve storia dell'energia nucleare; reattori ad acqua leggera: caratteristiche principali; proprietà dell'acqua; reattori ad acqua pressurizzata: descrizione dettagliata del *vessel*, degli *internals*, del nocciolo; circuito primario; pompe; generatori di vapore; pressurizzatore; sistemi di funzionamento normale e di emergenza; contenitore di sicurezza; circuito secondario e condensatore; reattori APWR. [12 ore]
5. Reattori ad acqua bollente: caratteristiche principali ed evoluzione della filiera; descrizione dei componenti principali; controllo di potenza; contenimento; circuiti di sicurezza; reattori ABWR. [4 ore]
6. Reattori ad acqua pesante: descrizione dei CANDU. Reattori a gas grafite: Magnox, AGR, HTGR. [4 ore]
7. Reattori veloci a metallo liquido: caratteristiche principali; descrizione del Superphenix. [4 ore]
8. Sicurezza degli impianti nucleari: approccio generale; difesa in profondità; ridondanza e diversificazione; classificazione degli incidenti; incidenti base di progetto; incidenti di reattività di mancato raffreddamento, di perdita di refrigerante; sistema di protezione del reattore; transitorio di grande LOCA nei PWR e nei BWR; criteri di sicurezza, termine di sorgente e diffusione atmosferica; fenomenologia e approccio probabilistico: albero degli eventi e albero dei guasti; concetto di rischio; valutazione probabilistica del rischio: tre livelli di PRA; rapporto Wash 1400; inci-

- denti nucleari: TMI; scala IAEA degli incidenti nucleari; cenni di radioprotezione; prevenzione e mitigazione degli incidenti: sfiato filtrato e progetti innovativi; meccanismi passivi di sicurezza; cenni ai reattori evolutivi. AP600 e SBWR e innovativi, PIUS e ISIS. [16 ore]
9. Metodologia di progettazione, normativa nucleare, garanzia della qualità, ingegneria dei circuiti. Classi sismiche. [2 ore]
  10. Ciclo del combustibile nucleare: a monte e a valle del reattore; confronto tra le varie tecniche di arricchimento dell'uranio; riprocessamento, vetrificazione; smaltimento dei rifiuti a alta, media e bassa attività; smantellamento degli impianti; tecniche di decontaminazione. [4 ore]
  11. Cenni al costo di produzione dell'energia elettronucleare: costo di impianto e del combustibile; attualizzazione dei costi di investimento. [2 ore]

### Ingegneria dei reattori nucleari a fusione

1. Introduzione: reazioni di fusione nucleare, bilancio energetico, criterio di Lawson, ignizione. [2 ore]
2. Descrizione di un plasma: orbite di singola particella, collisioni, equazioni dell'MHD ideale. [6 ore]
3. Confinamento magnetico: geometria lineare (specchio); geometria toroidale: il tokamak. [6 ore]
4. Introduzione all'ingegneria dei magneti e del *blanket*. [4 ore]
5. Riscaldamento del plasma: ohmico e per iniezione di neutri. [2 ore]
6. Introduzione alle interazioni plasma - parete: bilancio energetico (rivisitato) e di particelle, carico termico sui componenti affacciati al plasma, impurezze, *limiter* / divertore. [4 ore]
7. Descrizione di alcuni dei principali tokamak esistenti o progettati. Cenni agli stellarator. [2 ore]
8. Introduzione al confinamento inerziale. [2 ore]

### ESERCITAZIONI

- Calcolo strutturale di alcuni componenti di impianti nucleari. [6 ore]  
 Calcolo termoidraulico del circuito primario di un reattore ad acqua pressurizzata. [4 ore]  
 Calcolo di schermi. [10 ore]  
 Prova sperimentale di determinazione della caratteristica di una pompa centrifuga. [2 ore]  
 Calcolo del carico termico sul *limiter* di un tokamak.  
 Visita alla centrale nucleare "Enrico Fermi" a Trino Vercellese. [Un pomeriggio]

### BIBLIOGRAFIA

- Appunti dei docenti.  
 C. Lombardi, *Impianti nucleari*, CLUP, Milano, 1982.  
 M. Cumo, *Impianti nucleari*, UTET, Torino, 1976.  
 S. Glasstone, A. Sesonke, *Nuclear reactor engineering*, Van Nostrand, New York, 1981.  
 J. Weisman, *Elements of nuclear reactor design*, Elsevier, Amsterdam, 1977.  
 J. Raeder [et al.], *Controlled nuclear fusion*, Wiley, New York, 1986.  
 T.J. Dolan, *Fusion research*, Pergamon, New York, 1982.  
 W.M. Stacey jr., *Fusion*, Wiley, New York, 1984.  
 J. Wesson [et al.], *Tokamaks*, Clarendon, Oxford, 1987.

### ESAME

Sugli argomenti del modulo *Impianti nucleari* viene svolto un compito di esonero a metà corso; se l'esito è positivo l'esame finale si svolge sulla parte restante. Sugli argomenti del modulo *Ingegneria dei reattori nucleari a fusione 1* un compito può sostituire l'esame finale.

## Q599 1 **Termofluidodinamica negli impianti nucleari 1**

Anno: periodo 4:1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+2 (ore settimanali); 76+28 (nell'intero periodo)  
 Docente: Mario Malandrone

Col nuovo ordinamento si chiamerà *Termoidraulica 1*

Il corso ha il fine di fornire allo studente gli strumenti di base per poter affrontare in modo rigoroso l'analisi termoidraulica di impianti termici di potenza e di processo. In particolare verranno affrontati i problemi inerenti lo scambio termico e il moto dei fluidi di un impianto nucleare. A causa della generalità e del peso dato ai metodi per affrontare problemi di moto dei fluidi e di scambio termico, il corso può essere consigliato anche a studenti in Ingegneria meccanica, chimica e aeronautica.

Il programma comprende l'analisi dei processi di trasferimento di massa, di energia e di quantità di moto dei fluidi termovettori. Viene inoltre studiato in profondità il problema della conduzione nei solidi. È infine trattato lo scambio termico per irraggiamento.

REQUISITI. *Metodi matematici per l'ingegneria, Termodinamica applicata.*

### PROGRAMMA

Richiami sulle proprietà termodinamiche e di trasporto dei fluidi e dei solidi. [2 ore]

#### *Meccanica dei fluidi.*

Cenni di statica dei fluidi: campo di pressione e calcolo delle spinte su pareti. [3 ore]

Equazioni differenziali e integrali di conservazione della massa, dell'energia e della quantità di moto, equazioni di Navier-Stokes e di Eulero. [5 ore]

Moto di fluidi non viscosi, potenziale di velocità e linee di corrente; moto irrotazionale bidimensionale di fluidi incomprimibili; equazione di Bernoulli e sue applicazioni; estensione dell'equazione di Bernoulli ai fluidi reali. [5 ore]

Cenni di analisi dimensionale ed applicazione al moto dei fluidi. [3 ore]

Moto di fluidi viscosi: equazioni di Prandtl dello strato limite, strato limite laminare e turbolento. [4 ore]

Moto di fluidi viscosi in condotti: profilo di velocità e fattore d'attrito nel deflusso laminare; moto turbolento, equazioni di Reynolds, teoria della lunghezza di mescolamento di Prandtl; profili di velocità e fattore d'attrito nel deflusso turbolento; cadute di pressione nelle singolarità e nel deflusso su banchi di tubi; applicazione al calcolo di circuiti. [6 ore]

#### *Scambio termico nei fluidi.*

Meccanismi di trasferimento del calore; scambio termico per convezione, coefficiente di scambio termico, analisi dimensionale nella convezione. [2 ore]

Scambio termico nel moto laminare in condotti, modelli di Leveque, Graetz, Eckert. [3 ore]

Scambio termico nel moto turbolento in condotti, analogie di Reynolds, Prandtl, Von Karman e Martinelli. [5 ore]

Scambio termico in convezione naturale. [2 ore]

Correlazioni per il calcolo del coefficiente di scambio termico nel deflusso laminare e turbolento in condotti e su banchi di tubi. [4 ore]

*Conduzione del calore nei solidi.*

Legge fondamentale della conduzione, conduzione in stato stazionario senza generazione di calore; campo termico in un mezzo generante calore. [3 ore]

Scambio termico con superficie estese, barra sottile, alette e superficie alettate. [4 ore]

Conduzione del calore non monodimensionale in regime stazionario, soluzioni analitiche in geometria piana e cilindrica. [6 ore]

Conduzione del calore in regime transitorio, solido di conduttività infinita, soluzioni analitiche in geometria piana e cilindrica. [5 ore]

Conduzione del calore in regime stazionario e transitorio: metodi numerici alle differenze finite. [4 ore]

*Scambio termico per irraggiamento.*

Leggi fondamentali e corpo nero, fattori di forma, corpo grigio, analogia elettrica; cenni sull'irraggiamento di gas e vapori. [5 ore]

*Scambiatori di calore.*

Tipologie; calcolo di progetto e verifica con i metodi della differenza di temperatura logaritmica media e NUT. [5 ore]

**ESERCITAZIONI**

Le esercitazioni consistono nella risoluzione di problemi relativi agli argomenti trattati nell'ambito delle lezioni:

problemi di statica dei fluidi; [1 ora]

applicazioni delle equazioni integrali di conservazione; [4 ore]

moto di fluidi ideali; [1 ora]

moto dei fluidi reali in condotti e studio della circolazione in circuiti adiabatici; [3 ore]

scambio termico per convezione forzata in condotti e in moto laminare e turbolento e su banchi di tubi, scambio termico in regime di convezione naturale; [3 ore]

scambio termico per irraggiamento; [4 ore]

conduzione del calore nei solidi in regime stazionario; [2 ore]

calcolo di alettature; [2 ore]

conduzione del calore in regime transitorio, metodi numerici nella conduzione; [2 ore]

calcoli di dimensionamento e verifica di scambiatori di calore; [4 ore]

studio delle prestazioni di scambiatori di calore. [Esercitazione di laboratorio, 2 ore]

**BIBLIOGRAFIA**

B. Panella, *Lezioni di termocinetica*, CLUT, Torino, 1979.

C. Boffa, P. Gregorio, *Elementi di fisica tecnica*, Levrotto & Bella, Torino, 1976.

P. Gregorio, *Esercizi di fisica tecnica*, Levrotto & Bella, Torino, 1990.

Per approfondimenti:

J.G. Knudsen, D.L. Katz, *Fluid dynamics and heat transfer*, McGraw-Hill, New York, 1958.

E.R.G. Eckert, R.M. Drake jr, *Heat and mass transfer*, McGraw-Hill, New York, 1959.

H.S. Carslaw, J.C. Jaeger, *Conduction of heat in solids*, Clarendon, Oxford, 1959.

F.M. White, *Fluid mechanics*, McGraw-Hill, 1987.

J.P. Holman, *Heat transfer*, McGraw-Hill, 1986.

**ESAME.** L'esame viene svolto oralmente e comprende la presentazione degli elaborati di esercitazione.

## Q3110 **Macchine**

Anno: periodo 4:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+4 (ore settimanali); 78+42 (nell'intero periodo)

Docente: Paolo Campanaro

Nel corso sono esposti i principi termodinamici e fluidodinamici necessari ad una corretta comprensione del funzionamento delle macchine a fluido. Di queste viene poi sviluppata l'analisi del funzionamento nei tipi di più comune impiego (sia macchine motrici, sia macchine operatrici) con l'approfondimento richiesto dall'obiettivo di far diventare l'allievo nella sua futura attività professionale un accorto utilizzatore, sia nella scelta delle macchine stesse, sia nel loro esercizio. A questo scopo viene dato ampio spazio ai problemi di scelta, di installazione e di regolazione, sia in sede di lezione, sia in sede di esercitazione, dove vengono esemplificate le necessarie calcolazioni.

**REQUISITI.** Sono nozioni propedeutiche essenziali quelle presenti nel corso di *Termodinamica applicata* e, in parte, nel corso di *Meccanica applicata alle macchine*.

### PROGRAMMA

Considerazioni generali sulle macchine a fluido motrici ed operatrici. Classificazioni. Applicazione di concetti di termodinamica alle macchine. Primo principio della termodinamica in sistemi chiusi e aperti. Fluidodinamica nelle macchine. Effusori e diffusori, geometria dei condotti. [8 ore]

Cicli e schemi di impianti a vapore d'acqua; mezzi per migliorare il rendimento dell'impianto. Cicli rigenerativi. Impianti con produzione combinata di energia meccanica e calore. [8 ore]

Turbine a vapore. Triangoli di velocità. Stadi ad azione e a reazione, portate, potenze, condizioni di funzionamento con massimo rendimento termodinamico. Turbine assiali e radiali. Dimensionamento. Funzionamento fuori progetto della turbina. Regolazione degli impianti. La condensazione degli impianti a vapore. [12 ore]

Compressori di gas; classificazione, schemi di funzionamento. Generalità sui turbocompressori. Valutazione della caratteristica adimensionata d'un turbocompressore. Similitudine di funzionamento. Instabilità per stallo e pompaggio. La regolazione dei turbocompressori.

Compressori volumetrici (a stantuffo, rotativi del tipo a palette e Roots). Generalità, ciclo di lavoro, funzionamento, perdite caratteristiche, regolazione. [14 ore]

Turbine a gas: considerazioni termodinamiche sul ciclo, ciclo ideale e ciclo reale. Funzionamento in condizioni di massimo lavoro e massimo rendimento. Prestazioni, mezzi per migliorare il rendimento dell'impianto. Organizzazione meccanica dell'impianto, schema monoalbero e bialbero, funzionamento e regolazione degli impianti. Ciclo con aria e ciclo con elio: analisi comparata delle due soluzioni. [12 ore]

Macchine idrauliche motrici e operatrici; turbine Pelton, Francis, Kaplan, loro funzionamento in condizioni di massimo rendimento, regolazione dell'impianto di potenza.

Le turbopompe, loro regolazione. Pompe volumetriche. La cavitazione nelle turbomacchine idrauliche. Le pompe-turbine. [12 ore]

Motori alternativi a combustione interna: classificazione, cicli di lavoro. Ciclo ideale, ciclo limite, ciclo indicato dei motori ad accensione comandata e ad accensione per compressione. Motore a quattro tempi e a due tempi. Funzionamento, riempimento dei

motori, caratteristica meccanica del motore. Perdite caratteristiche, rendimenti, prestazioni. Alimentazione e regolazione di tali motori.

Cenni sulla sovralimentazione. [12 ore]

**ESERCITAZIONI.** Il corso delle esercitazioni prevede applicazioni specifiche di calcolo sulle macchine trattate a lezione, con particolare attenzione a temi relativi all'impianto nucleotermoelettrico.

#### BIBLIOGRAFIA

Appunti delle lezioni sono messi a disposizione degli allievi.

A.E. Catania, *Complementi di esercizi di macchine*, Levrotto & Bella, Torino, 1979.

A. Beccari, *Macchine. Vol. 1*, CLUT, Torino, 1980.

F. Montevocchi, *Turbine a gas*, CLUP, Milano, 1977.

#### ESAME

L'esame prevede una prova scritta utile a definire la capacità dell'allievo a risolvere problemi di tipo applicativo sulle macchine a fluido integrata da un colloquio orale sul corso. La prova ed il colloquio sono svolte all'interno dello stesso appello d'esame.

## Q0940 Costruzione di macchine

Anno: periodo 4:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+4 (ore settimanali); 74+46 (nell'intero periodo)

Docente: Graziano Curti

Il corso ha l'obiettivo di riprendere e approfondire gli argomenti della scienza delle costruzioni, con particolare riferimento a quelli che costituiscono il fondamento della progettazione delle macchine e dei loro componenti. In esso vengono presentati gli elementi tipici che influenzano il comportamento e la resistenza degli organi delle macchine come l'effetto d'intaglio, la fatica, lo scorrimento a caldo e lo smorzamento interno dei materiali. Di questi elementi vengono forniti i dati caratteristici (metodi, formule, diagrammi) che ne consentono l'applicazione pratica.

Vengono inoltre descritti e illustrati i principali organi delle macchine e i mezzi di collegamento e di accoppiamento. Il corso si propone in definitiva di fornire agli allievi le metodologie della progettazione delle macchine e dei relativi organi.

**REQUISITI.** *Scienza delle costruzioni, Meccanica applicata alle macchine.*

#### PROGRAMMA

Ruote dentate. Ingranaggi. Caratteristiche geometriche, cinematiche, di taglio e di resistenza. [12 ore]

Cuscinetti. Tipi. Montaggio. [4 ore]

Ipotesi di rottura. Tensioni equivalenti. [6 ore]

La fatica dei materiali: descrizione, caratteristiche, diagrammi. Meccanica della frattura. [8 ore]

Effetto d'intaglio: definizione, diagrammi, dati numerici. [6 ore]

Scorrimento a caldo dei materiali e smorzamento interno. [6 ore]

Molle. Tipi. Calcoli. Applicazioni. [12 ore]

Giunti. Innesti. Collegamenti (viti, linguette, chiavette, accoppiamenti scanalati).

[10 ore]

Teoria di Hertz: formule finali e applicazioni. [6 ore]

Vibrazioni e velocità critiche. [10 ore]

ESERCITAZIONI. Argomento dell'esercitazione è la progettazione di un gruppo meccanico, preferibilmente per centrale nucleare.

#### BIBLIOGRAFIA

R. Giovannozzi, *Costruzione di macchine. Vol. I e II*, Pàtron, Bologna.

## Q5270      **Strumentazione e misure per gli impianti nucleari**

Anno: periodo 5:1

Docente: Aldo Pasquarelli

Col nuovo ordinamento si chiamerà *Misure e strumentazione nucleari*

L'insegnamento intende fornire specifiche conoscenze teoriche e soprattutto sperimentali nel campo delle misurazioni di grandezze fisiche in generale. Vengono quindi spiegati gli effetti fisici che conducono alla costruzione di un sensore. Vengono descritti pure sia gli apparati elettronici di amplificazione e linearizzazione del segnale proveniente da un sensore, sia i metodi di misura del segnale stesso. Vengono descritte le principali applicazioni dei sensori stessi.

#### REQUISITI

Lo studente deve aver seguito corsi di fisica ed almeno un corso di elettronica.

#### PROGRAMMA

1. *Definizione di sensore; definizione di trasduttore.*

2. *Misure di tempo.*

Oscillatore al quarzo, oscillatore CMOS. Contatore digitale; misuratore del periodo; misuratore della frequenza; moltiplicatore di frequenza; discriminatore di frequenza.

3. *Sensori di temperatura.*

Sensori a resistenza. Resistenza di platino (esempio PT100) e sua linearizzazione. Termocoppia: effetto Seebeck; costituzione di una termocoppia, compensazione di giunto freddo, linearizzazione, amplificazione. Vari tipi di termocoppia; calibratore per amplificatori linearizzatori per i vari tipi di termocoppia.

Sensori di temperatura a stato solido: descrizione del circuito LM335.

Sensori di temperatura ad oscillatore al quarzo.

Cenni di pirometria.

#### 4. *Termistori.*

Descrizione del comportamento sia a pendenza negativa che a pendenza positiva. Funzionamento in regime di autoriscaldamento: schema di un anemometro a filo caldo; funzionamento di un ponte anemometrico con compensazione per la temperatura del fluido in cui è immerso.

#### 5. *Sensore di umidità.*

Descrizione del sensore capacitivo: sistema di misura e linearizzazione. Descrizione del sensore resistivo: sistema di misura e linearizzazione.

#### 6. *Estensimetro.*

Vari tipi di estensimetri; analisi della variazione di resistenza in funzione della deformazione meccanica. Vari tipi di trasduttori costruiti con ponti estensimetrici: sensori di forza (cella di carico), sensori di pressione, sensori di accelerazione.

#### 7. *Trasduttori di pressione.*

Definizione e caratteristiche generali. Trasduttori a ponte serigrafato (tipo Marelli Autronica). Trasduttore a ponte diffuso (tipo Motorola).

#### 8. *Trasduttori di spostamento.*

Caratteristiche dei potenziometri lineari. *Encoder* ottici: riga ottica e trasduttore d'angolo. Sistemi di lettura per *encoder* ottici.

9. *Trasformatore differenziale*: analisi del circuito e sue caratteristiche come sensore di spostamento o d'angolo.

#### 10. *Trasduttore ad effetto Hall.*

#### 11. *Convertitori raggi X - luce.*

Impiego di tali convertitori per la costruzione di esposimetri per apparati a raggi X.

#### 12. *Strumentazione.*

Misuratore del numero di giri di un albero motore. Voltmetro digitale a 3 cifre e mezzo. Voltmetro digitale a 4 cifre e mezzo. Periodimetro. Frequenzimetro. Generatore di segnali. Oscilloscopio. Oscilloscopio a memoria. Acquisizione dati per PC. Amplificatore per strumentazione.

### LABORATORIO

Le esercitazioni di laboratorio riguardano tutti i sensori e le apparecchiature descritte.

### BIBLIOGRAFIA

Peternel, Vitelli, *Strumentazione industriale*, UTET, Torino.

O. Doebelin, *Measurement systems*, McGraw-Hill.

Principali specifiche tecniche dei maggiori costruttori.

A. Pasquarelli, *Trasduttori e sensori*, Levrotto e Bella, Torino.

## Q3040 Istituzioni di economia

Anno: periodo 5:2

Docente: da nominare

[Testo del programma non pervenuto in tempo per la stampa]

# Programmi degli insegnamenti

(insegnamenti d'orientamento)

I programmi sono riportati in ordine alfabetico di titolo. Al termine del volume (p. 103) le tavole alfabetiche generali, per nomi dei docenti e per titoli degli insegnamenti.

## Q0010 Acceleratori di particelle

Anno: periodo 5:1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6 (ore settimanali); 70+10 (nell'intero periodo)

Docente: Pier Paolo Delsanto

Il corso si ripropone una finalità culturale e una applicativa. La finalità culturale è legata all'importanza sia fisica che ingegneristica degli argomenti trattati nel corso. Data la natura multidisciplinare del campo esistono inoltre parecchie opportunità di spunti sia per il ripasso di argomenti di grande importanza e generalità, sia per la discussione delle prospettive di progresso sia scientifico che tecnologico.

Per quanto riguarda le finalità applicative, occorre notare che i grandi acceleratori presenti e futuri (per es. LEP, LHC) richiedono personale altamente qualificato, quali potrebbero essere i laureati di Ingegneria nucleare dopo una specializzazione. Inoltre in campo medico e industriale si diffonde sempre più l'uso di piccoli acceleratori. Pertanto il corso si ripropone anche d'indirizzare gli studenti verso queste possibili offerte del mercato occupazionale, incoraggiandoli, per es. mediante le "tesine", a esaminare le applicazioni degli acceleratori.

Il corso consiste di quattro parti, approssimativamente di uguale lunghezza, cioè ciascuna delle quali comprendente circa venti lezioni di un'ora. Nella prima parte si ripassano velocemente quegli elementi di relatività ristretta e di elettromagnetismo avanzato che, opportunamente complementati, servono a formare una solida base per la comprensione della parte centrale del corso. Inoltre vengono sviluppate tecniche numeriche, in particolare utilizzabili in connessione con *computers* paralleli, di grande utilità per la progettazione e analisi di elementi strutturali di vari acceleratori.

La seconda parte consiste di una veloce rassegna dei tipi più importanti di acceleratori (elettrostatici, lineari, betatroni, ciclotroni, sincrociclotroni e sincrotroni), dei loro principi operazionali e del principio di stabilità di fase.

Nella terza parte si sviluppano in dettaglio le teorie di oscillazione di betatrone e di sincrotrone e si descrive il principio di focalizzazione forte, sulla base del quale viene spiegato il funzionamento dei sincrotroni a gradiente alternato.

Infine nella quarta parte vengono studiate alcune fra le più importanti applicazioni degli acceleratori, spesso attraverso l'esposizione di "tesine" da parte degli studenti. Come applicazione di particolare interesse scientifico si studia inoltre l'utilizzo dei grandi acceleratori nella fisica delle alte energie. Per comprendere meglio l'importanza dell'argomento vengono illustrati i concetti più innovativi della fisica delle particelle elementari, quali l'introduzione dei *quarks*, la cromodinamica quantistica, le supersimmetrie, etc.

Il corso si propone di dare agli studenti le nozioni fondamentali riguardanti il funzionamento, i criteri di progetto e le caratteristiche di fascio delle macchine acceleratrici più comunemente impiegate nel campo della ricerca e delle applicazioni, in particolare industriali e biomediche.

Gli acceleratori sono visti in stretta connessione coi problemi di schermatura, dosimetria, trasporto di fascio e vuoto ad essi correlati. Si danno cenni sulle sorgenti a radioisotopi e sulle loro applicazioni.

**REQUISITI.** Nozioni elementari di relatività ristretta e di fisica nucleare.

#### PROGRAMMA

Circuiti magnetici e curve di demagnetizzazione.

Acceleratori elettrostatici: Cockroft-Walton e Van der Graaf.

Cenni sulla teoria della scarica nei gas. Legge di Paschen. Equazione di Fowler-Nordheim.

Lenti elettromagnetiche e approssimazione parassiale. Confronto fra i diversi tipi di acceleratori elettromagnetici. Principio della stabilità di fase.

Sorgenti ioniche. Perdite di energia per radiazione. Effetto di coerenza.

Condizioni di stabilità e oscillazioni di betatrone. Iniezione e utilizzo degli elettroni in un betatrone.

Diversi tipi di sincrotroni. Equazione di fase e oscillazioni di sincrotrone. Effetti di risonanza. Sincrotroni a gradiente alterato.

Calcolo del diagramma di stabilità col metodo delle matrici caratteristiche.

Altri tipi di acceleratori: *linacs*, ciclotroni e sincrociclotroni. LEP, LHC e altri programmi internazionali in via di sviluppo.

Cenni sulle applicazioni degli acceleratori in campo scientifico, industriale e biomedico. Cenni sulle sorgenti a radioisotopi e loro impieghi.

#### BIBLIOGRAFIA.

S. Humphries jr., *Principles of charged particle acceleration*, Wiley, 1986.

E. Persico, E. Ferrari, S.E. Segre, *Principles of particle accelerators*, Benjamin, 1968.

W. Scharf, *Particle accelerators and their uses*, Harwood, 1986.

#### ESAME

Agli studenti viene offerta la possibilità di portare la prima parte del corso in un esame di "esonero" che conta, per chi lo sostiene come una domanda ai fini dell'esame finale. La valutazione della tesina conta come una seconda domanda. L'esame finale conta come due domande e il voto viene dato come media dei quattro voti conseguiti. Viene incoraggiata una stretta interazione tra studenti e docente, per cui diventa più facile sostenere l'esame nella sessione successiva al periodo didattico del corso.

## N0841 Controlli automatici (generale)

Anno: periodo X:1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+4+2 (ore settimanali)

Docente: Giovanni Fiorio

L'insegnamento riguarda sia l'analisi di sistemi fisici di varia natura (elettrica, meccanica, termica, idraulica, pneumatica, ecc.), con lo scopo di determinarne le leggi di funzionamento in regime transitorio, sia la struttura dei sistemi di controllo, sia le proprietà richieste per i sistemi dotati di controllo, sia le procedure per il progetto degli organi di controllo di sistemi dinamici che garantisca il verificarsi delle proprietà richieste.

**REQUISITI.** Le nozioni propedeutiche necessarie per seguire il corso e prepararne l'esame sono quelle di elettrotecnica, di geometria e di matematica, soprattutto per quanto riguarda l'uso di vettori, matrici e trasformate di Laplace.

### PROGRAMMA

- 1. Il problema del controllo automatico.* Concetto di sistema. Ingressi (comandi e disturbi), uscite (primarie e secondarie). Enunciato del problema in forma operativa. Schema generale di un sistema dotato di controllo. Proprietà degli elementi componenti. Elenco delle competenze richieste ad un esperto di controlli automatici.
- 2. La costruzione di modelli matematici di sistemi fisici.* Rappresentazione grafica dei modelli; schemi a blocchi e loro regole di elaborazione. Modelli matematici approssimati per sistemi elettrici, meccanici, elettromeccanici, termici, idraulici e pneumatici.
- 3. Elementi di analisi di segnali e di sistemi.* Risposte nel dominio del tempo e della frequenza. Cenni su processi stocastici e dinamica statistica. Proprietà strutturali.
- 4. L'incertezza nei modelli di sistemi e di segnali.* La costruzione di modelli dinamici approssimati come lineari, a parametri concentrati ed invarianti nel tempo, a partire dalle leggi fisiche dei corrispondenti sistemi. Errori di modello in termini di incertezza dei rispettivi parametri. Sensitività.
- 5. Dinamica dei sistemi monovariabili (un comando, una uscita con retroazione).* Criteri di Routh e di Nyquist. Costruzione dei diagrammi di Nyquist. Margini di stabilità. Costruzione dei luoghi delle radici. Proprietà dei luoghi delle radici.
- 6. Specifiche per la qualificazione dei sistemi di controllo.* Enunciato del problema del controllo automatico in forma matematica. Specifiche sulla rapidità di risposta e sulla stabilità relativa. Specifiche sulla precisione a regime stazionario. Specifiche sull'attenuazione dei disturbi e della sensitività. Specifiche sulla sicurezza.
- 7. Strutture particolari dei sistemi di controllo monovariabili, e loro proprietà ai fini del soddisfacimento delle specifiche.* Compensazione in cascata ed in retroazione; retroazione dalle variabili di stato e da generiche uscite secondarie; filtraggio del riferimento e filtraggio (previa misura dei disturbi). Strutture miste.
- 8. Progetto degli organi di controllo per sistemi monovariabili.* Progetto di compensatori in cascata sulla base di specifiche assegnate, con particolare riguardo ai compensatori di larga diffusione industriale. Progetto di compensatori di forma prefissata relativi ad altre strutture. Orientamenti per la scelta della forma degli organi di controllo. Sintesi diretta con uno o due gradi di libertà nella forma dei blocchi componenti.

9. *Introduzione allo studio del controllo digitale*. Componenti digitali dei sistemi di controllo. I sistemi a tempo discreto. La trasformata *zeta* e le sue principali proprietà. Le funzioni di trasferimento impulsive. Cenni al progetto di sistemi di controllo digitali.

#### ESERCITAZIONI

Alle esercitazioni in aula è dedicata una quaterna di ore consecutive ogni settimana. Le settimane dedicate alle esercitazioni sono circa una dozzina, ed ogni esercitazione riguarda l'argomento trattato a lezione la settimana precedente. A ciascuno dei nove capitoli del programma delle lezioni è dedicata una esercitazione settimanale, salvo a quelli di maggior estensione, cui sono dedicate due esercitazioni successive. Il testo di riferimento per le esercitazioni ne riporta 13, per 13 settimane successive. Per ogni esercitazione sono presentati una decina di problemi da risolvere. Nella seconda parte del testo è riportata la risoluzione completa di alcuni di questi problemi.

#### BIBLIOGRAFIA

Per le lezioni:

G. Fiorio, *Controlli automatici, con elementi di teoria dei sistemi*, CLUT, 1992.

Per le esercitazioni:

G. Fiorio, S. Malan, *Esercitazioni di controlli automatici*, CLUT, 1990.

#### ESAME

L'esame consiste di due parti, entrambe orali; la prima riguarda la discussione di una tesina, preparata durante il corso con l'uso dei mezzi del Laboratorio di Informatica di Base; la seconda riguarda tutto il programma delle lezioni e delle esercitazioni.

## P1165 **Criogenia + Tecnica del freddo** (Corso integrato)

Anno: periodo X: 1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 4+3+1 (ore settimanali)  
Docente: Armando Tuberga

Scopo del corso è di fornire allo studente i criteri necessari a comprendere il funzionamento degli impianti che lavorano a temperature inferiori all'ambiente; con l'analisi exergetica si evidenziano le situazioni costruttive e funzionali che favoriscono i fenomeni irreversibili e il conseguente maggior consumo di energia pregiata. Nella tecnica del freddo si studiano i cicli frigoriferi a compressione di vapore, ad assorbimento, a gas e termoelettrici. Nella criogenia si illustrano i processi di liquefazione e separazione dei gas, e la conservazione dei prodotti liquefatti.

REQUISITI. *Fisica tecnica, Analisi matematica, Fisica.*

#### PROGRAMMA

1. Problemi e applicazioni della tecnica frigorifera e criogenica. Cenni sullo sviluppo storico del freddo.
2. Concetto generalizzato di exerergia associata a vari tipi di energia. Rendimenti exergetici di impianti e componenti.
3. Cicli frigoriferi a compressione di vapore a semplice e doppia compressione, in cascata; analisi delle perdite exergetiche.

4. Cicli frigoriferi ad assorbimento; proprietà della miscela acqua-ammoniaca; assorbimento del vapore frigorifero e separazione con distillazione frazionata; bilancio energetico ed exergetico.
5. Cicli frigoriferi a gas, Stirling rigenerativo, a refrigerazione magnetica, a diluizione; termoelettricità; refrigerazione termoelettrica.
6. Proprietà dei materiali a basse temperature.
7. Liquefazione dei gas; macchine di Linde, Claude, Heylandt, Kapitza; produzione di gas liquefatto o di freddo.
8. Separazione di miscele gassose; lavoro minimo teorico; rettifica semplice e doppia; separazione dei gas rari dall'aria; purificazione dei gas.
9. Bilanci exergetici e particolari costruttivi di compressori, scambiatori, rigeneratori, espansori, valvole; isolamento termico dei contenitori criogenici con elementi di tecnica del vuoto; impianti di conservazione e trasporto di gas liquefatto.

### ESERCITAZIONI

1. Ciclo frigorifero a compressione di vapore, monostadio; calcolo delle perdite exergetiche dei singoli componenti ripartite tra perdite per attrito e perdite termiche; rappresentazione e verifica nei piani  $(T,s)$  e  $(h,s)$ .
2. Ciclo frigorifero a vapore con doppia compressione e doppia espansione; bilanci di I e II principio.
3. Frigorifero ad assorbimento acqua ammoniaca; diagrammi entalpia-concentrazione ed entropia-concentrazione.
4. Liquefattore e refrigeratore Linde; bilancio energetico ed exergetico dei componenti; diagramma di scambio termico. Variante con frigorifero ausiliario.
5. Liquefattore e refrigeratore Claude, trattato come al punto precedente.
6. Impianto di separazione aria; colonna a doppia rettifica per ossigeno ed azoto.
7. Contenitore per ossigeno liquido; verifiche dell'isolamento termico; verifica meccanica di stabilità per i cilindri esterno ed interno.

### BIBLIOGRAFIA

Testi di riferimento:

E. Bonauguri, D. Miari, *Tecnica del freddo*, Hoepli, Milano, 1977.

R. Barron, *Cryogenic systems*, McGraw-Hill.

Testi ausiliari:

L. Borel, *Thermodynamique et énergétique*, Presses Polytechn. Romandes, Lausanne, 1984.

## Q1290 **Dinamica e controllo degli impianti nucleari**

Anno: periodo 5:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+2 (ore settimanali); 80+24+6 (nell'intero periodo)

Docente: Mario De Salve

Col nuovo ordinamento si chiamerà

*Dinamica e controllo degli impianti nucleo-termoelettrici*

Il corso si propone di fornire le metodologie per l'analisi della dinamica delle centrali nucleotermoelettriche e per il controllo automatico delle stesse. Il corso completa il percorso formativo di un ingegnere nucleare con la sensibilizzazione ai problemi dell'esercizio di impianti complessi, quali quelli nucleari, in condizioni di progetto e fuori progetto e nelle fasi di avviamento, di modulazione dei carichi, di fermata. I temi sviluppati riguardano:

- a) sistemi per la produzione di energia elettrica: caratteristiche funzionali ed interconnessione con la rete elettrica;
- b) elementi di teoria dei controlli automatici;
- c) cinetica puntiforme;
- d) modelli termoidraulici dinamici per componenti e sistemi;
- e) analisi della stabilità di impianti e sistemi;
- f) instabilità termoidrauliche;
- g) aspetti dinamici della strumentazione termoidraulica e nucleare,
- h) cenni di analisi dei segnali.

L'obiettivo didattico dominante del corso è connesso alla formulazione di modelli, scelta degli strumenti di simulazione, analisi critica dei risultati della simulazione in relazione alle ipotesi e agli obiettivi dello studio. Nelle esercitazioni sono impiegati strumenti informatici per lo studio di sistemi lineari e non lineari.

Il corso è consigliabile agli studenti interessati all'analisi del sistema di produzione dell'energia elettrica con centrali sia nucleari che convenzionali, e più in generale agli studenti interessati alle problematiche di esercizio di impianti complessi.

### PROGRAMMA

1. Processi produttivi industriali ed impianti di produzione. Obiettivi dello studio della dinamica e controllo di un processo produttivo. Requisiti e caratteristiche dei sistemi di regolazione e protezione. Modelli dinamici di sistemi fisici di tipo elettrico, meccanico, termico, termofluidodinamico, termochimico. Simulazione dinamica di sistemi lineari e non lineari con l'ausilio del programma TUTSIM. [16 ore]

2. Il sistema di produzione e trasporto dell'energia elettrica. Impianti per la produzione di energia elettrica: classificazione e problemi di controllo e regolazione in relazione ai sottosistemi caratteristici degli impianti. Centrali nucleotermoelettriche: caratteristiche funzionali e programmi di regolazione ed inserzione in rete delle centrali nucleotermoelettriche. Cenni sui problemi di gestione della rete elettrica. Sottosistemi delle centrali nucleotermoelettriche con reattori PWR. Circuito secondario: turboalternatore, turbina, condensatore, sistemi di alimentazione e di preriscaldamento dell'acqua, controllo e regolazione della portata, generatore di vapore. Sistema di scarico rapido del vapore. Cenni sui sistemi di protezione e sicurezza. Circuito primario: sottosistemi e componenti. [16 ore]

3. Elementi di teoria dei sistemi e della regolazione. Sistemi a retroazione. Regolatori, funzioni di trasferimento e risposta in frequenza. Risposte dinamiche ad input di

riferimento (gradino, rampa, parabola unitaria). Errori a transitorio esaurito. Rappresentazioni di Bode, di Nyquist. Il metodo del luogo delle radici. Stabilità dei sistemi a retroazione. Il programma CC: potenzialità, ambienti di lavoro, esempi di programmazione ed applicazioni a problemi tipici delle centrali nucleotermoelettriche. [18 ore]

4. Modelli neutronici per il *core*: cinetica puntiforme. Risposte neutroniche del *core* in assenza di fenomeni di retroazione. Inserzione a gradino, a rampa e sinusoidale di reattività. Linearizzazione delle equazioni della cinetica puntiforme. Funzioni di trasferimento a potenza zero. Fenomeni di retroazione indotti da cause neutroniche. Avvelenamento da xeno e samario. Modellistica avvelenamento da xeno. Funzioni di trasferimento associate allo xeno. Coefficienti di temperatura della reattività. Studio delle funzioni di trasferimento con il programma CC. Analisi della stabilità. Modello termoidraulico del *core* a due temperature. Effetti di retroazione di reattività dovuti alle temperature. Coefficienti di temperatura della reattività. Coefficiente dei vuoti, della pressione, coefficienti compositi. Funzioni di trasferimento del reattore in presenza di retroazioni di temperatura. Studio delle funzioni di trasferimento con il programma CC. Stabilità del reattore in presenza di retroazioni di temperatura e di avvelenamento da xeno. Barre di controllo: classificazione e teoria semplificata delle barre di controllo. Inventario della reattività, difetti di temperatura e potenza, margini di spegnimento. Controllo della reattività. Sistemi per la movimentazione delle barre di controllo. Controllo della reattività con veleni solubili. Relazione tra reattività e concentrazione dell'acido borico. Sistemi per il controllo del volume e della chimica dell'acqua. [18 ore]

5. Strumentazione nucleare *in core* ed *ex core*. Misure di flussi neutronici, periodo, efficacia delle barre di controllo. Elementi di misure termiche e fluidodinamiche. Sale di controllo: esemplificazione, funzioni e criteri per il progetto. [4 ore]

6. Regolazioni e programmi di regolazione per il circuito primario e secondario. Comportamento dinamico e modello semplificato di un BWR, mappa di regolazione. Instabilità termofluidodinamiche nei deflussi bifase. [4 ore]

7. Transitori anticipati ATWS. Il codice LOFTRAN: struttura e modelli. [4 ore]

#### ESERCITAZIONI

1. Applicazione del TUTSIM per la soluzione di problemi non lineari nel dominio del tempo. [6 ore]
2. Applicazione del MatLab e del *control tools* nella soluzione di modelli del circuito primario e secondario di un PWR. [10 ore]
3. Applicazione del CC per lo studio di funzioni di trasferimento ed analisi di stabilità. [8 ore]
4. Esemplificazione del funzionamento dei regolatori e delle funzioni di regolazione su una attrezzatura didattica di controllo della pressione. [2 ore]
5. Esemplificazione del funzionamento di un sistema di acquisizione dati con misura di temperature e pressioni. Cenni di analisi dei segnali e illustrazione del programma DADISP. [4 ore]

#### BIBLIOGRAFIA

- J. Lewis, *Nuclear reactor kinetics and control*, Pergamon, 1978.  
 J.J. D'Azzo, C.H. Houpis, *Linear control system analysis and design, conventional and modern*, McGraw-Hill, 1988.

ESAME. L'esame verte in modo prevalente sulla discussione ed analisi degli aspetti teorici dei temi svolti nelle esercitazioni nonché nella formulazione e discussione di tipici modelli dinamici di interesse delle centrali nucleotermoelettriche.

## Q1830 Energetica e sistemi nucleari

Anno/periodo 4:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 4+2+2 (ore settimanali)

Docente: Evasio Lavagno

Il corso si propone di fornire le conoscenze ingegneristiche e gli strumenti metodologici utili per l'analisi e la valutazione dei principali sistemi energetici industriali e civili, con particolare attenzione rivolta alla produzione di energia elettrica e alla produzione combinata di energia elettrica e termica.

Vengono descritte e analizzate le soluzioni tecnologiche, impiantistiche e di sistema, disponibili sia nel settore nucleare che in quello convenzionale. Particolare attenzione è dedicata alle soluzioni innovative in merito all'uso razionale delle risorse primarie, alla compatibilità ambientale ed alla sicurezza.

REQUISITI. *Termodinamica applicata* o *Fisica tecnica*.

### PROGRAMMA

1. *Elementi introduttivi.* [14 ore]
  - 1.1. *Forme e trasformazioni fondamentali dell'energia.*  
 Fonti e usi finali dell'energia.  
 I cicli di trasformazione delle fonti fossili e nucleari e di quelle rinnovabili.  
 Energia e sistemi economici. Energia e ambiente. Gli indicatori energetici e la loro evoluzione nelle varie fasi dello sviluppo economico e industriale.
  - 1.2. *Elementi di ecologia.* [6 ore]  
 Gli ecosistemi.  
 Gli elementi costitutivi dell'ambiente naturale: atmosfera, idrosfera, pedosfera, biosfera, ecc.  
 I principali cicli materiali nell'ambiente naturale: acqua, carbonio, azoto, zolfo, ossigeno, ecc.  
 Le perturbazioni naturali e quelle di origine antropica.
2. *Fondamenti di energetica.* [8 ore]  
 Energia ed exergia.  
 Metodologie per l'analisi energetica ed exergetica dei cicli e delle trasformazioni termodinamiche.
3. *Le fonti primarie di energia e la loro utilizzazione.* [20 ore]
  - 3.1. *Le fonti primarie e le modalità del loro impiego:*  
 l'energia solare (diretta e indiretta),  
 la biomassa,  
 i combustibili fossili,  
 i combustibili nucleari: fissione e fusione,  
 l'idrogeno.
  - 3.2. *Le modalità di vettoriamento.*
  - 3.3. *Gli usi finali.*
4. *Le nuove tecnologie.* [10 ore]
  - 4.1. Situazione attuale e prospettive per impianti e sistemi provati e per proposte innovative dal punto di vista tecnologico e ambientale. La maturità tecnologica e commerciale. La competizione tra tecnologie antagoniste.
  - 4.2. *Analisi dello stato dell'arte dei seguenti sistemi:*  
 i cicli del carbone,  
 i cicli dell'idrogeno,

le celle a combustibile,  
i reattori nucleari avanzati,  
i reattori nucleari a sicurezza intrinseca,  
le fonti rinnovabili.

5. *I modelli per l'analisi dei sistemi energetici.* [14 ore]

5.1. Modelli per la valutazione delle caratteristiche tecnologiche, economiche ed ambientali dei sistemi energetici alle varie scale di analisi.

5.2. Struttura e finalità di alcuni programmi e codici per analisi energetica e la redazione di ecobilanci (GRAFENE, TEMIS) e per la programmazione lineare in scenari evolutivi (MARKAL).

ESERCITAZIONI E LABORATORIO. [40 ore]

Le esercitazioni riguardano:

- l'analisi di un sistema energetico a scala territoriale;
- l'analisi di un particolare ciclo energetico o di un sistema tecnologico.

Nel Laboratorio Didattico di Analisi e Modelli Energetici si svolgeranno applicazioni al computer di alcuni modelli di analisi integrale tecnico-economica e ambientale.

BIBLIOGRAFIA

A.W. Clup, *Principles of energy conversion technologies*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1991.

Altra documentazione, con i relativi riferimenti bibliografici, sarà messa a disposizione dal docente.

ESAME. Il colloquio d'esame comprende la discussione degli elaborati di esercitazione e laboratorio.

## L2000 **Fisica dello stato solido**

Anno: periodo X:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 8 (ore settimanali)

Docente: Alberto Tagliaferro

Il corso si propone di fornire agli allievi gli strumenti per la comprensione delle proprietà della materia nel suo stato solido. Vengono sviluppate le varie approssimazioni ed i concetti appresi sono utilizzati per analizzare alcuni tipi di materiali e le loro proprietà.

REQUISITI. È richiesta la conoscenza dei fondamenti della meccanica quantistica.

PROGRAMMA

1. *Gas di elettroni.* [12 ore]

Gas di Fermi. Condizioni al contorno di Born – Von Karmann. Livello di Fermi e potenziale chimico. Densità di stati elettronici. Calore specifico. Gas di Fermi bidimensionale.

Effetti dell'interazione elettrone – elettrone. Interazione coulombiana. Interazione di Pauli. Modello di Hartree. Modello di Hartree-Fock, determinante di Slater ed interazione di scambio.

*Screening*: modello di Fermi e modello di Lindhard. Quasiparticelle.

## 2. *Modello di Bloch.* [10 ore]

Hamiltoniana completa di un solido: energie cinetiche e di interazione. Approssimazioni: adiabatica, reticolo statico.

Reticoli cristallini. Cella di Wigner-Seitz. Struttura cristallina: reticolo + base. Reticolo reciproco. Zona di Brillouin.

Modello di Bloch. Potenziale periodico. Teorema di Bloch. Elettroni liberi ed elettroni "di Bloch": analogie e differenze. Superficie di Fermi. Struttura a bande. Densità di stati. Teorema della massa efficace. Effetti del potenziale periodico: *gap* di energia.

## 3. *Metodi di calcolo della struttura a bande.* [10 ore]

Teoria delle perturbazioni. Metodo variazionale. *Tight binding*. Equazione secolare del TB; *overlap*. Il metodo OPW. Lo pseudopotenziale. Effetto repulsivo dello pseudopotenziale. Metodo Car-Parrinello.

## 4. *Proprietà di trasporto.* [10 ore]

Moto semiclassico in campi elettromagnetici. Ipotesi. Equazioni del moto. Lacune. Corrente di elettroni e di lacune. Il tensore massa efficace.

Processi di *scattering*. Sorgenti di *scattering*. Probabilità di *scattering* e tempo medio fra le collisioni. Equazione di Boltzmann.

Approssimazione del tempo di rilassamento. Ipotesi. Calcolo della distribuzione di equilibrio. "Momento del cristallo" e sua conservazione.

Proprietà dei materiali. Conducibilità elettrica in DC ed AC. Conducibilità termica (relazioni di Onsager, legge di Wiedemann-Franz). Potere termoelettrico. Effetti Peltier e Thomson.

## 5. *Fononi.* [10 ore]

Effetti del reticolo ionico mobile. Approssimazione armonica. Modi normali, seconda quantizzazione e fononi: fononi acustici e fononi ottici; polarizzazione trasversale e longitudinale. Misura della relazione di dispersione.

Teoria del calore specifico. Fononi e distribuzione di Bose. Calore specifico: definizione ed osservazioni sperimentali. Modelli di Debye e di Einstein. Densità di stati fononici e teoria del calore specifico.

## 6. *Effetti di ordine superiore.* [10 ore]

Anarmonicità ed effetti di interazione fonone - fonone: proprietà del cristallo "armonico" non riscontrabili nell'osservazione. Processi di urto fra fononi. Processi *umklapp* e conducibilità termica. Resistività nei metalli a bassa temperatura: legge  $T^5$  di Bloch. Effetti dell'interazione elettrone - fonone: variazione degli autovalori dell'hamiltoniana. *Screening* ionico dell'interazione elettrone - elettrone. Interazione attrattiva elettrone - elettrone, mediata dai fononi.

## 7. *Tecniche di analisi e visite ai laboratori.* [18 ore]

Spettrometrie: UPS, PDS, visibile, infrarossa, Raman, fotoluminescenza. Misure di calori specifici e conducibilità termiche a  $T < 10$  K. Diffrazione di: neutroni, raggi X. EELS (cenni).

## 8. Saranno inoltre svolti alcuni dei seguenti argomenti monografici. [20 ore]

Proprietà magnetiche della materia. Superconduttori. Semiconduttori cristallini ed amorfi. Proprietà ottiche della materia. Fenomeni di superficie. Proprietà elastiche e difetti reticolari. Cristalli liquidi.

ESERCITAZIONI. Esercizi sui vari argomenti saranno svolti durante le ore di lezione. Sono previste visite a laboratori di ricerca attivi sia presso il dipartimento di Fisica che presso altri centri di ricerca in città.

**BIBLIOGRAFIA**

Testo di riferimento:

Ashcroft, Mermin, *Solid state physics*, Saunders.

Testi ausiliari:

Ibach, Luth, *Solid state physics*, Springer.Kittel, *Introduzione alla fisica dello stato solido*, Boringhieri.Myers, *Introductory solid state physics*, Taylor & Francis.

**ESAME.** L'esame consiste in una prova orale, suddivisa in due parti: una lezione di 25-30 minuti su un argomento scelto dal candidato; alcune domande su argomenti svolti durante il corso.

## Q2024 **Fisica e ingegneria dei plasmi** (Corso ridotto)

Anno: periodo 5:2

Docente: Franco Porcelli

Più del 99 % della materia nell'Universo è nello stato di plasma. I plasmi sono gas ionizzati, elettricamente quasi-neutri, dominati da fenomeni collettivi. La fisica del plasma è una materia interdisciplinare, a cavallo tra l'elettromagnetismo, la fluidodinamica e la meccanica statistica. In questo corso daremo particolare attenzione al problema del confinamento magnetico di plasmi ad alta temperatura di interesse termonucleare. Tuttavia, applicazioni della fisica del plasma allo studio delle scariche elettriche nei gas, torce al plasma, propulsione spaziale e astrofisica verranno brevemente accennate. Per i futuri ingegneri che intendono lavorare nel campo della fusione termonucleare controllata, suggeriamo di accoppiare questo corso a quello (ridotto) di *Ingegneria dei reattori a fusione 2*.

**PROGRAMMA***Introduzione.* [6 ore]

Criterio d'ignizione termonucleare. Temperatura minima di un plasma ignito. Il Tokamak.

*Confinamento magnetico di cariche singole.* [10 ore]

Orbite di particelle cariche in campi magnetici. Specchi magnetici. Configurazioni toroidali. Corrente minima per il confinamento dei prodotti di fusione in un Tokamak.

*Il modello magnetoidrodinamico (MHD) ideale.* [18 ore]

Equazioni fondamentali. Energia cinetica e potenziale del plasma. Legge di congelamento delle linee di campo. Equilibri MHD. Onde MHD. Il problema della stabilità. Il principio dell'energia. Instabilità MHD più importanti.

*Riconnessione magnetica.* [16 ore]

Diffusione resistiva. Instabilità resistive. Teoria lineare in geometria piana. Isole magnetiche. Perturbazioni singolari, strati limite e tecniche di raccordo asintotico. Limite noncollisionale.

#### BIBLIOGRAFIA

G. Schmidt, *Physics of high temperature plasmas*, 2nd ed., Academic Press, New York, 1979.

N.A. Krall and A.W. Trivelpiece, *Principles of plasma physics*, San Francisco Press, 1986.

ESAME. Interrogazione orale tradizionale; occasionalmente: tesina.

## Q2030 Fisica matematica

Anno: periodo 4:2

Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+2(3) (ore settimanali); 60+40(50) (nell'intero periodo)

Docente: Guido Rizzi

1. Argomento principale del corso: introduzione alla relatività speciale (RS).
2. Argomento ulteriore, consigliato ma facoltativo (senza penali in sede di esame), da tenersi in ambito seminariale: introduzione alla relatività generale (RG).

Concedendo uno spazio relativamente ampio a questioni di carattere metodologico, il corso intende: (a) proporre una visione sintetica, rigorosa e concettualmente semplice di un ampio dominio della fisica moderna; (b) familiarizzare lo studente con una mentalità, un linguaggio, una metodologia che gli consentano sia di approfondire la propria cultura scientifica, sia di rendere possibile e fruttuosa un'eventuale collaborazione con i fisici, a livello di ricerca.

**REQUISITI.** Gli argomenti dei corsi di *Analisi matematica 1 e 2*, *Fisica 1 e 2*, *Meccanica analitica* (oppure *Meccanica razionale*), *Geometria*, *Complementi di Matematica*, *Fisica nucleare*.

#### PROGRAMMA

*Introduzione matematica.* [25 ore]

Vengono anzitutto introdotte le tecniche matematiche adatte allo studio della RS e della RG, con particolare riguardo al calcolo tensoriale in varietà riemanniane curve (alcuni argomenti, specificamente finalizzati alla RG, saranno svolti in sede seminariale).

Spazi e varietà lineari (richiami). Forme lineari. Spazio duale e spazio biduale. Covarianza e controvarianza. Isomorfismo canonico. Forme multilineari ("tensori"). Algebra tensoriale. Spazi vettoriali con prodotto interno; tensore metrico. Identificazione di uno spazio vettoriale (con prodotto interno) col suo duale. Spazio affine. Spazio affine euclideo; spazio strettamente euclideo e spazio pseudoeuclideo (di Minkowski).

In ambito (prevalentemente) seminariale:

Varietà differenziabili. Struttura differenziabile e struttura topologica di una varietà. Paracompattezza. Spazio tangente e cotangente; forme differenziali. Fibrato tangente e cotangente (cenni). Campi (vettoriali e tensoriali) differenziabili. Commutatore, alge-

bra di Lie e derivata di Lie. Varietà differenziabili a connessione affine. Trasporto parallelo. Connessioni simmetriche e torsione. Geodetiche. Derivazione covariante. Tensore di curvatura. Varietà riemanniane.

### *Meccanica relativistica.* [25 ore]

Si introducono i due principi della RS. La struttura geometrica minkowskiana dello spaziotempo della RS è dedotta in modo univoco da tali principi. In tale contesto geometrico viene studiata la meccanica della particella con massa propria variabile. Tale studio viene esteso ai sistemi di particelle e ai continui materiali, anche in presenza di interazioni a distanza (e quindi con l'introduzione del concetto di campo di interazione). Particolare attenzione è rivolta ai teoremi di conservazione.

Sistemi inerziali. I due gruppi di invarianza della fisica classica; il riferimento assoluto. Cenni sulle esperienze di Michelson-Morley, di De Sitter e di aberrazione stellare. Difficoltà di interpretazione all'interno del paradigma classico. L'ipotesi dell'etere. L'ipotesi emissiva. Tentativi di soluzione: Lorentz e Einstein. I due principi della RS. La relatività della simultaneità. La trasformazione di Lorentz e le sue conseguenze. Lo spaziotempo minkowskiano della RS. Campi tensoriali e 4-tensoriali nello spaziotempo minkowskiano. 4-velocità e 4-accelerazione; tempo proprio. Cono di luce. Grafici spaziotemporali; soluzione di alcuni paradossi. Bradioni, fotoni e tachioni. Struttura geometrica e struttura causale dello spaziotempo. Cenni di ottica relativistica (effetto Doppler; esperienza di Fizeau).

Istituzione di una meccanica relativistica; legge di moto di una particella. I concetti di impulso, massa, forza, energia. Relazione massa - energia, e sue conseguenze. I concetti di momento angolare e centro di massa in RS. Applicazioni: moto di un elettrone in un campo magnetico costante; orbite descritte sotto l'azione di una forza coulombiana (o newtoniana); effetto Compton; urto elastico tra due elettroni. Proporzionalità tra energia di un fotone e frequenza dell'onda associata.

Cenno su alcuni formalismi alternativi della meccanica relativistica.

### *Elettrodinamica relativistica.* [25-30 ore]

In questa parte, che è forse la più ampia e significativa del corso, si istituisce la teoria di Maxwell-Lorentz in forma covariante nello spaziotempo minkowskiano. La teoria è applicata, in particolare, allo studio dell'irraggiamento elettromagnetico di una carica accelerata. Applicazioni: la radiazione di sincrotrone.

Formula di Lorentz in forma covariante. Tensore elettromagnetico. Trasformazione dei vettori di campo. Invarianti del campo elettromagnetico. 4-vettore distribuzione elettrica. Equazioni di Maxwell in forma covariante. Equazione di continuità. 4-potenziale del campo elettromagnetico. Irraggiamento elettromagnetico. Tensore energetico. Teoremi di conservazione; energia, impulso, momento angolare del campo elettromagnetico. Bilancio dell'energia in un volume finito. Tensore degli sforzi maxwelliani; analogie con l'elasticità.

Campo elettromagnetico generato da una carica in moto uniforme. Potenziali elettromagnetici generati da una carica in moto qualsiasi (Lienard-Wiechert). Campo elettromagnetico generato da una carica in moto qualsiasi. Trasporto di energia. Radiazione di sincrotrone: distribuzione angolare della potenza irradiata da una carica in moto; potenza totale irradiata da una carica in moto (Larmor). Irraggiamento di una carica in un campo magnetico costante (cenni). Reazione di radiazione (cenni).

Formulazione variazionale delle equazioni fondamentali dell'elettrodinamica relativistica. Generalizzazioni: condizioni per l'esistenza di una formulazione variazionale; particella in un campo di forza derivabile da un 4-potenziale; estensione relativistica dell'equazione di Schrödinger (Klein-Gordon). Cenno sulla teoria relativistica dell'elettrone a *spin* (Dirac).

### *Introduzione alla RG.* [25-30 ore, in ambito seminariale]

I fondamenti matematici (vedi l'ultima parte dell'introduzione matematica) e fisici della

RG. Principio di equivalenza e principio di covarianza generale. *Red-shift* gravitazionale e sue conseguenze sulla struttura geometrica dello spaziotempo. Gravitazione e geometria: il modello matematico dello spaziotempo fisico secondo la RG. Sistemi di riferimento in RG. Equazioni gravitazionali einsteiniane, con e senza costante cosmologica. Approssimazione newtoniana. Soluzione di Schwarzschild.

#### BIBLIOGRAFIA

G. Rizzi, *Introduzione alla relatività speciale*, 2 vol., CLUT, Torino, 1987.

G. Rizzi, *Introduzione alla relatività generale*, appunti fotocopiati (Politeko, c. Einaudi 55, Torino).

V. Cantoni, *Appunti di fisica matematica*, Veschi, Roma, 1983.

C. Cattaneo, *Introduzione alla teoria einsteiniana della gravitazione*, Veschi, Roma, 1960.

T. Regge, *Relatività*, voce dell'*Enciclopedia Einaudi*.

## Q2772 Impianti nucleari 2

Anno:periodo 5:1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+2 (ore settimanali); 78+24 (nell'intero periodo)

Docente: Giovanni Del Tin (collab.: Cristina Bertani)

Il corso si propone di fornire elementi per il calcolo e la progettazione di impianti nucleari a fissione e a fusione e per la relativa analisi di sicurezza.

REQUISITI. Sono nozioni propedeutiche quelle impartite nei corsi di *Fisica dei reattori a fissione + Fisica dei reattori a fusione, Impianti nucleari + Ingegneria dei reattori nucleari a fusione 1, Termofluidodinamica negli impianti nucleari 1*.

#### PROGRAMMA

Lo studio dei principali transitori di impianto (con riferimento soprattutto a PWR e BWR) prevede l'illustrazione dei modelli di calcolo atti a prevedere l'andamento temporale delle grandezze in gioco, nonché l'analisi funzionale delle principali salvaguardie ingegneristiche preposte alla prevenzione ed eventualmente alla mitigazione degli effetti dell'evento incidentale.

Natura del rischio nucleare. Criteri, metodi e normative per la progettazione ai fini della sicurezza dei principali componenti dell'impianto nucleare, dei sistemi ausiliari, di protezione e di emergenza. Sicurezza intrinseca e sicurezza passiva. [8 ore]

Individuazione delle sequenze incidentali critiche e classificazione degli eventi incidentali in classi di sicurezza. [2 ore]

Perdita di carico elettrico. [2 ore]

Perdita di portata per guasti al sistema di pompaggio primario; modalità di rimozione della potenza attraverso la circolazione naturale. [6 ore]

Transitori conseguenti alla riduzione di capacità di asportazione del calore dal nocciolo (perdita di acqua di alimento ai generatori di vapore per impianti a ciclo indiretto e al reattore per gli impianti a ciclo diretto; perdite di vuoto al condensatore, rottura di una linea del vapore, ecc.). [6 ore]

Transitori di depressurizzazione. Cenni alla dinamica del pressurizzatore e alle caratteristiche funzionali del sistema di controllo della pressione. [6 ore]

Transitori di reattività: analisi dei diversi tipi di transitori e determinazione della massima potenza raggiunta e dell'energia rilasciata. Caratteristiche funzionali dei sistemi di controllo della reattività. [6 ore]

Transitori di perdita di refrigerante: modalità di rottura dei componenti (cenni alla meccanica della frattura); valutazione della portata critica in regime monofase e bifase; generazione, propagazione ed attenuazione delle onde di pressione con particolare riferimento alla fase acustica del *blow-down*; modalità di rimozione del calore nelle fasi di *blow-down* e di refrigerazione di emergenza; modelli di separazione di fase. [12 ore]

Forze di reazione e forze di getto. Valutazione dei carichi dinamici applicati alle tubazioni e ai componenti investiti dal getto a seguito di LOCA; criteri e metodi per la predisposizione di adeguate strutture di supporto. [6 ore]

Criteri di progetto a fronte dei principali eventi di origine esterna all'impianto (sisma, caduta di aereo, onde di pressione, ecc.). [4 ore]

Incidenti severi comportanti la fusione del nocciolo e/o la perdita di integrità fisica del contenimento. [2 ore]

Analisi di rischio degli impianti nucleari con metodologie probabilistiche (Probabilistic Risk Assessment o PRA): descrizione e finalità dei diversi livelli del PRA, descrizione e esempi applicativi delle metodologie più diffuse per l'esecuzione del PRA (albero degli eventi e albero dei guasti). Analisi dei risultati ottenuti dalle due più conosciute analisi probabilistiche di rischio effettuate su impianti nucleari: il rapporto Rasmussen e il German Risk Study. [10 ore]

La sicurezza nei reattori nucleari a fusione: analisi di transitori incidentali tipici (es. perdita di vuoto, perdite di trizio, perdita di funzionalità del sistema criogenico e del sistema magnetico). [8 ore]

## ESERCITAZIONI

Richiami sui tipi di sistemi di contenimento, salvaguardie ingegneristiche e sistemi di protezione con particolare riferimento ai reattori ad acqua leggera. [4 ore]

Calcolo di prima approssimazione delle condizioni termofluidodinamiche nei sistemi di contenimento a secco e con piscina di soppressione negli incidenti di LOCA; codici di calcolo CONTEMPT e CONTEMPT-PS. [8 ore]

Incidenti severi: sequenze incidentali, fenomeni *in-vessel* ed *ex-vessel*, modi di cedimento del sistema di contenimento. [3 ore]

Rilascio dei prodotti di fissione dal nocciolo, dall'edificio di contenimento, dispersione nell'ambiente esterno e calcolo delle dosi assorbite dalla popolazione. [7 ore]

Applicazione delle metodologie di analisi probabilistica di rischio a un impianto nucleare PWR. [2 ore]

## BIBLIOGRAFIA

Appunti del docente.

E.E. Lewis, *Nuclear power reactor safety*, Wiley, New York, 1977.

N.J. McCormick, *Reliability and risk analysis*, Academic Press, London, 1981.

J. Wesson, *Tokamaks*, Clarendon, Oxford, 1987.

## Q2934 Ingegneria dei reattori nucleari a fusione 2

(Corso ridotto)

Anno: periodo 5:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 4 (ore settimanali)

Docente: Roberto Zanino

Questo corso intende approfondire le conoscenze sviluppate nel corso di *Ingegneria dei reattori nucleari a fusione 1*, con particolare riferimento al tokamak. L'enfasi è sulle basi fisiche delle soluzioni impiantistiche presentate, e le caratteristiche costruttive e funzionali dei principali componenti di un reattore vengono analizzate sviluppando semplici modelli matematici. Per coloro che intendano lavorare nel campo della fusione termonucleare controllata si consiglia di accoppiare questo corso con quello di *Fisica e ingegneria dei plasmi* (ridotto).

### PROGRAMMA

#### *Controllo e termofluidodinamica del plasma.*

Derivazione e soluzione perturbativa dell'equazione di Grad-Schlueter-Shafranov. [4 ore]

Equazioni di Braginskii; derivazione qualitativa di conducibilità termica, viscosità, etc., di un plasma magnetizzato. [4 ore]

Cenni al trasporto neoclassico e al trasporto anomalo; analisi statistica degli esperimenti e *scaling* di  $t_{E\theta}$ . [2 ore]

#### *Ingegneria dei magneti e del blanket.*

Sollecitazioni sui magneti. [2 ore]

Magneti superconduttori e loro refrigerazione; problemi di criogenia. [4 ore]

Operazione dei magneti OH ed EF in un tokamak. [2 ore]

Analisi neutronica del *blanket*; scelta del *breeder* e del refrigerante. [4 ore]

Scelta dei materiali strutturali; esempi di soluzioni impiantistiche per ITER. [2 ore]

#### *Interazioni plasma - parete.*

Dinamica del plasma nel SOL lungo B. [2 ore]

Analisi dello *sheath* elettrostatico. [3 ore]

*Edge refueling* e *recycling*; metodi per la descrizione del trasporto di particelle neutre nel SOL ed effetti della loro presenza. [3 ore]

Produzione e *screening* delle impurezze nel SOL. [2 ore]

Equilibrio corona; trasporto di impurezze nel main. [2 ore]

Confronto *limiter* / divertore; soluzioni impiantistiche per *limiter*, divertore, prima parete; studio sperimentale dei carichi termici sui componenti affacciati al plasma. [4 ore]

#### *Confinamento inerziale.*

Modelli per il calcolo del guadagno energetico del combustibile. [2 ore]

Implosione, requisiti di simmetria; interazione luce laser - materia, ablazione. [2 ore]

Fusione inerziale a irraggiamento indiretto e indotta da fasci di ioni. [2 ore]

Codici di simulazione lagrangiani e progetto dei bersagli. [2 ore]

Aspetti di tecnologia dei *driver* e della camera di reazione. [2 ore]

### BIBLIOGRAFIA

J.Raeder [et al.], *Controlled nuclear fusion*, Wiley, New York, 1986.

T.J. Dolan, *Fusion research. Vol. 3*, Pergamon, New York, 1982.

W.M.Stacey jr., *Fusion*, Wiley, New York, 1984.  
 J.A.Wesson [et al.], *Tokamaks*, Clarendon, Oxford, 1987.

ESAME. Di norma esame orale convenzionale a fine corso. In casi particolari sarà possibile in alternativa sostenere l'esame con lo svolgimento di una tesina.

## L3050 Istituzioni di meccanica quantistica

Anno: periodo X: 1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+2 (ore settimanali)

Docente: Carla Buzano

Il corso si propone, partendo dalle conoscenze acquisite nei corsi di *Fisica 1* e *2*, di introdurre gli studenti allo studio della meccanica quantistica e statistica, fornendo le basi concettuali e le tecniche necessarie per seguire con profitto corsi successivi di rilevante contenuto fisico. Ampia parte del corso è dedicata ad applicazioni nel campo della struttura della materia con particolare attenzione al magnetismo.

REQUISITI. *Analisi matematica 1 e 2, Geometria, Fisica 1 e 2.*

### PROGRAMMA

#### 1. *Cenni di meccanica analitica.* [8-12 ore]

Lagrangiana ed equazioni di Lagrange, hamiltoniana ed equazioni di Hamilton, parentesi di Poisson, trasformazioni canoniche. Piccole oscillazioni, coordinate normali.

#### 2. *Meccanica quantistica.* [56-60 ore]

Breve analisi degli esperimenti che hanno condotto alla formulazione della Meccanica quantistica.

*Formulazione di Dirac della meccanica quantistica.* Principio di sovrapposizione e caratterizzazione degli stati dinamici mediante vettori. Variabili dinamiche e osservabili. Teoria della rappresentazione. I postulati della meccanica quantistica (probabilità dei risultati di misura e valore medio di un osservabile). Principio di indeterminazione di Heisenberg. Comportamento dinamico di un sistema quantistico (descrizione di Schrödinger, di Heisenberg, di interazione)

Meccanica ondulatoria.

Applicazioni elementari della meccanica quantistica: oscillatore armonico, buca (barriera) di potenziale rettangolare.

Proprietà generali dei momenti angolari in meccanica quantistica.

Particella in un campo centrale. Atomo di idrogeno.

Lo *spin*. Bosoni e fermioni.

Sistemi di particelle identiche. Principio di esclusione di Pauli.

Metodi di approssimazione. Teoria delle perturbazioni.

#### 3. *Elementi di meccanica statistica quantistica.* [14-16 ore]

I postulati della fisica statistica (concetto di *ensemble*, ipotesi ergodica).

Ensemble microcanonico, canonico, gran canonico.

Gas di bosoni: statistica di Bose-Einstein. Gas di fermioni: statistica di Fermi-Dirac.

Gas classico: statistica di Maxwell-Boltzmann.

4. *Applicazioni nel campo della struttura della materia*, con particolare attenzione al magnetismo.

**ESERCITAZIONI.**

Insieme completo di osservabili che commutano.

Modi normali molecola.

Esempi vari.

**LABORATORIO**

Esercitazioni al *computer* (svolte al LAIB) sui seguenti argomenti:

Particella libera.

Stati legati (oscillatore armonico, buca di potenziale).

Stati di *scattering* (potenziale a gradino, buca e barriera di potenziale, effetto *tunnel*).

Atomo di idrogeno.

Modi normali di oscillazione.

**BIBLIOGRAFIA**

Testo di riferimento:

Sono a disposizione appunti raccolti dagli studenti.

Testi ausiliari:

C. Cohen-Tannoudji, B. Diu, F. Laloe, *Mécanique quantique. I, II*, Hermann.

A. Messiah, *Quantum mechanics. I, II*, North Holland.

A. Galindo, P. Pascual, *Quantum mechanics. I, II*, Springer.

J.J. Sakurai, *Meccanica quantistica moderna*, Zanichelli.

W.H. Louisell, *Quantum statistical properties of radiation*, Wiley.

**Q3090 Localizzazione dei sistemi energetici**

Anno:periodo 5:1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 4+2+2 (ore settimanali)

Docente: Evasio Lavagno

Il corso si propone di analizzare le metodologie e le procedure di localizzazione di impianti, infrastrutture e sistemi energetici con particolare attenzione rivolta alle soluzioni tecnologiche di salvaguardia ambientale. La scelta tra soluzioni alternative, a parità di servizi resi, viene impostata sulla base di un approccio di tipo sistemico, che si pone obiettivi di razionalizzazione tecnico-economica ed ambientale. Viene sviluppata una applicazione progettuale con caratteristiche di studio di fattibilità.

**REQUISITI.** *Fisica tecnica, Macchine, (Energetica e sistemi nucleari).*

**PROGRAMMA**

1. *Elementi di ecologia e di energetica.* [8 ore]  
(gli argomenti segnati con \* verranno sviluppati principalmente per gli studenti che non hanno seguito il corso di *Energetica e sistemi nucleari*).
- 1.1. *Elementi di ecologia \**  
Gli ecosistemi. Gli elementi costitutivi dell'ambiente naturale e i principali cicli materiali nell'ambiente naturale. Le perturbazioni naturali e antropogeniche.
- 1.2. *Le forme e le trasformazioni dell'energia \**  
Le forme dell'energia. Le trasformazioni dell'energia: spontanee, reversibili, irreversibili. Energia, exergia, anergia. Analisi energetica di processi e sistemi: metodi, modelli e applicazioni.
- 1.3. *Cenni storici e scenari per il futuro \**  
I contributi delle varie forme primarie al soddisfacimento dei fabbisogni; fonti primarie, risorse, riserve; processi di trasformazione; fabbisogni energetici ed usi

finali. Evoluzione storica dei consumi; descrizione di alcune situazioni nazionali caratteristiche; previsioni e scenari. La situazione italiana nel contesto europeo.

- 1.4. L'approccio sistemico all'analisi dei sistemi energetici.  
I cicli energetici: le fonti primarie e quelle rinnovabili. L'energia nucleare. I combustibili fossili: carbone, olio, gas naturale. I combustibili secondari: i prodotti delle trasformazioni del carbone e della biomassa. Il ciclo dell'idrogeno.
2. *Gli impianti, i cicli ed i sistemi energetici.* [20 ore]
- 2.1. Impianti e sistemi per la produzione di energia elettrica e di energia termica. I processi di combustione (richiami). Caldaie, turbine a vapore e a gas, motori alternativi; cicli combinati; celle a combustibile. Impianti nucleari. La produzione combinata di energia elettrica e termica. Le pompe di calore.
- 2.2. Schemi di impianto.  
Descrizione di alcune schemi particolarmente significativi in merito alle soluzioni tecnologiche adottate per la riduzione dell'impatto e del rischio ambientali.
- 2.3. Valutazioni qualitative e quantitative dei rilasci di esercizio e dei rilasci incidentali.  
Tecniche di controllo e riduzione delle emissioni
- 2.4. La prevenzione del rischio.
- 2.5. Le infrastrutture necessarie per la gestione dei cicli energetici.  
Il vettoriamento dell'energia e le reti energetiche. Le interconnessioni sovranazionali.
- 2.6. Il ciclo completo del combustibile e l'impatto ambientale complessivo.
3. *Il contesto normativo in merito ai processi di localizzazione dei sistemi energetici e agli standards ambientali.* [8 ore]
- 3.1. Norme e procedure della legislazione nazionale ed internazionale.  
Gli standards di qualità ambientale. Normativa USA, CEE ed italiana.
- 3.2. Analisi critica di alcuni casi rilevanti di processi localizzativi.  
Le localizzazioni di impianti elettronucleari.
4. *Analisi di impianti e sistemi energetici.* [24 ore]
- 4.1. Definizione dei parametri di valutazione.  
In termini di validità: tecnologica, energetica, socio-economica, territoriale, ambientale. Le analisi costi / benefici.
- 4.2. Criteri e metodi per la valutazione delle alternative.  
La modellazione dei sistemi energetici. Modelli integrali. Modelli per la valutazione delle alternative di localizzazione. Le procedure per la scelta e la qualificazione dei siti: l'esperienza nucleare.
- 4.3. Energia e aree urbane.  
La pianificazione energetica territoriale. Le aree urbane. La zonizzazione territoriale.

**ESERCITAZIONI.** Le esercitazioni e le attività del laboratorio didattico consistono nello sviluppo di casi concernenti diversi sistemi energetici, produttivi e/o territoriali. Verrà sviluppata una applicazione a livello di studio di fattibilità.

**BIBLIOGRAFIA.** Verrà messo a disposizione materiale di documentazione e verranno forniti riferimenti bibliografici.

**ESAME.** Il colloquio di esame comprende la discussione degli elaborati di esercitazione e laboratorio.

## P 3360 Meccanica delle vibrazioni

Anno: periodo X: 1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+4 (ore settimanali); 72+32+16 (nell'intero periodo)  
 Docente: Bruno Piombo

[Testo del programma da "Guida 1994/95"]

Il corso si propone di utilizzare i metodi di studio di sistemi lineari e non lineari con applicazioni su sistemi meccanici reali.

### PROGRAMMA

Eccitazione impulsiva, a gradino, sinusoidale. Eccitazione periodica: serie di Fourier. Eccitazione aperiodica. Eccitazione casuale: parametri caratteristici di un processo casuale; ergodicità e stazionarietà; funzioni di correlazione.

Definizione e interpretazione della trasformata di Fourier; proprietà caratteristiche. Trasformate di Fourier di eccitazioni impulsive, sinusoidali e casuali. Auto- e *cross*-spettri, coerenza. Le trasformate di Fourier discretizzate (DFT) e quelle veloci (FFT). Sistema massa, molla e smorzatore con smorzamento viscoso, isteretico e coulombiano: parametri caratteristici del sistema.

Risposta di un sistema SDOF alle eccitazioni impulsiva, a gradino sinusoidale. Risposta in frequenza. Risposta di un sistema SDOF ad eccitazioni aperiodiche: integrale di convoluzione. Trasformata di Fourier dell'integrale di convoluzione. Risposta di un sistema SDOF ad eccitazioni casuali. Forma matriciale del modello di un sistema vibrante MDOF. Smorzamento proporzionale e non proporzionale. Coordinate generalizzate. Trasformazione di coordinate.

Modi propri di vibrare (autovalori e autovettori). Principio di ortogonalità degli autovettori. La trasformazione modale. Applicazione dell'analisi modale per la determinazione della risposta di sistemi MDOF.

Sistemi MDOF smorzati in modo non proporzionale: autovalori e autovettori complessi. Risposta ad eccitazioni sinusoidali: metodo di Duncan; metodo di Fraejijs de Veubeke o del ritardo di fase.

Sistemi continui. Modelli di sistemi meccanici: funi, travi, piastre.

Determinazione di autovalori e autovettori. Risposte ad eccitazioni di tipo impulsivo e sinusoidale.

L'analisi modale sperimentale e la strumentazione utilizzata. L'analisi delle funzioni di trasferimento ricavabili sperimentalmente (FRF). Estrazione dei parametri modali. Modelli SDOF e MDOF. I residui. Confronto tra i modelli modali ottenuti per via numerica e per via sperimentale.

Modellazione delle principali non linearità. Analisi teorica della risposta di sistemi non lineari a differente eccitazione. Applicazione delle trasformate di Hilbert, delle serie di Volterra e delle trasformate di Fourier multiple per l'analisi di sistemi non lineari.

### ESERCITAZIONI

Vengono assegnati problemi pratici collegati con gli argomenti trattati nel corso.

LABORATORI. Esempi pratici di sistemi vibranti e relative misure sperimentali.

### BIBLIOGRAFIA

G. Jacazio, B. Piombo, *Meccanica applicata alle macchine. Vol. 4*, Levrotto & Bella, Torino.

J.P. Den Hartog, *Mechanical vibrations*, McGraw-Hill, New York, 1956.

W.T. Thomson, *Vibrazioni meccaniche: teoria ed applicazioni*, Tamburini, 1974.

D.J. Ewins, *Modal testing: theory and practice*, Research Studies Press, Letchworth, 1985.

J.S. Bendat, A.G. Piersol, *Random data*, Wiley, New York, 1986.

L. Meirovitch, *Elements of vibration analysis*, McGraw-Hill, New York, 1985.

## Q3390 Meccanica statistica

Anno: periodo 5:1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 90 (ore, nell'intero periodo)

Docente: Mario Rasetti

Il corso è inteso fornire una professionalità specifica a chi voglia affrontare professionalmente problemi avanzati nell'ambito dei sistemi complessi, di qualunque natura questi siano. Più in particolare, esso mira a fornire, a quegli studenti che fanno un uso applicativo esteso della termodinamica, una comprensione profonda dei meccanismi fisici, dei fenomeni microscopici, dei metodi e degli algoritmi concettuali di rappresentazione di tale disciplina. Dato il livello alto di difficoltà e di aggiornamento, il corso è strumento professionale importante per chi intenda affrontare tali argomenti in un ambito di ricerca. Nel passato, dalla frequenza al corso sono spesso scaturite tesi di laurea interessanti (nell'ambito della scienza dei materiali, della teoria della computazione, dello studio dei sistemi complessi).

Il corso si articola in tre parti.

La prima parte è incentrata essenzialmente sulla nozione di complessità nell'ambito dei sistemi dinamici in generale (di quelli hamiltoniani in particolare) e sui paradigmi mediante i quali tale concetto si può definire e controllare. Vengono date le nozioni fondamentali della teoria dei sistemi dinamici, quali *spazio delle fasi*, "*flows*" e mappe, *integrabilità e non integrabilità* (equazioni di Hamilton-Jacobi), *stabilità* dinamica e strutturale – con i relativi concetti di attrattore, regolare o strano, e della sua dimensionalità di Hausdorff – e si discutono gli effetti della non-linearità. Si analizzano poi a fondo i criteri che individuano il comportamento imprevedibile (*chaos*) dei sistemi dinamici non integrabili: *frattalità* dei corrispondenti attrattori strani, segno degli esponenti di Lyapunov, legame fra dimensione frattale degli attrattori ed entropia di Kolmogorov del sistema. Vengono studiate le proprietà topologiche del sistema globale delle traiettorie legate alla non-linearità delle interazioni mediante la rappresentazione di Smale e si identificano le varie possibilità di *transizione* al regime caotico mediante la dinamica simbolica associata a tali interazioni: mappa *horse-shoe* e *Bernoulli shift*. Si discutono varie applicazioni: dalla turbolenza nei sistemi metereologici (equazioni di Navier-Stokes-Lorenz) alla dinamica dei fasci in acceleratori di particelle accoppiati. Questa prima parte si conclude con lo studio della perturbazione di sistemi dinamici integrabili (teorema *KAM*) e della ergodicità del sistema di Sinai.

La seconda parte del corso inizia con i moderni fondamenti della meccanica statistica, basati su una definizione rigorosa del concetto di *ergodicità* a partire dai principi primi della teoria dei sistemi dinamici complessi sviluppata nella prima parte e dal teorema di Liouville per i *flows* hamiltoniani. Vengono poi definite le nozioni di *misura invariante* e di *ensemble* nelle varie versioni (*micro-canonica*, *canonica* e *gran-canonica*). Successivamente viene definito il concetto di *entropia* – legandolo sia all'entropia di Kolmogorov per i sistemi dinamici, sia all'entropia di Shannon della teoria dell'informazione, sia all'entropia della termodinamica – e a partire da esso si ritrovano i principi della termodinamica fenomenologica. Nel fare questo si definiscono rigorosamente anche i concetti di *potenziale termodinamico* e di *funzione di correlazione*, derivando da essi l'intera descrizione della termodinamica di equilibrio (incluse le transizioni di fase) di un sistema dinamico generico. Ne seguono anche le nozioni di temperatura assoluta (e di *zero assoluto*), di coesistenza delle fasi, di *stato termodinamico*, di *parametri d'ordine*. Viene discusso il concetto di *mixing* e come esso consenta di descrivere anche fenomeni termodinamici di "fuori-equilibrio".

La terza parte del corso è dedicata alle applicazioni dei concetti acquisiti nella seconda parte. Dopo gli esempi tipici del "gas perfetto", sia classico sia quantistico (vengono

studiate, ad esempio, l'equazione di stato di un gas nobile e il calore specifico degli elettroni in un metallo), si discutono a fondo i *sistemi interagenti*, ancora sia classici (gas reali: modello di van der Waals, espansioni viriali, teorema di Mayer-Mayer), sia quantistici (modello di Chandrasekar, superfluidità, superconduttività, sistemi magnetici). Attenzione particolare viene dedicata ai *plasma*. Il corso si conclude con la discussione approfondita della cosiddetta *approssimazione di "gas reticolare"* e delle complesse soluzioni (modelli di Ising e di Heisenberg) cui essa conduce.

Le tre parti del corso hanno peso approssimativamente uguale (di circa 30 ore ciascuna). Le lezioni sono accompagnate da esercitazioni sia al *computer* (simulazioni), sia di complemento al corso, queste ultime disegnate in particolare per fornire informazioni aggiuntive su applicazioni moderne *non-standard* della meccanica statistica (reti neurali, sistemi biologici, reti di calcolo), per un totale di una decina di ore. Sono pre-requisiti essenziali i corsi di matematica e fisica generali, i complementi di matematica, almeno un corso di "fisica moderna". Non ostante nel corso si faccia spesso uso di strumenti matematici avanzati e inusuali (cioè non forniti istituzionalmente, quali ad esempio alcune nozioni di topologia differenziale e combinatoria), questi vengono esaurientemente forniti durante il corso stesso. Per la prima e seconda parte esiste un libro di testo che copre con ampiezza la materia trattata. La terza parte ha natura più monografica e richiede il ricorso a testi specifici, via via indicati.

## Q3470 **Metodi matematici per i reattori nucleari**

Anno/periodo 5:1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 88+18+10 (ore, nell'intero periodo)

Docente: Gianni Coppa

Il corso si propone di descrivere i metodi matematici e le tecniche numeriche di maggiore importanza nella fisica dei reattori nucleari a fissione e a fusione. Un'ampia parte del corso (indicata con \* nel programma) è dedicata alle tecniche di simulazione basate sui metodi PIC (Particle In Cell) per lo studio di sistemi di particelle cariche. Tuttavia, dai diversi argomenti trattati si prende spunto per alcuni approfondimenti (indicati con \*\* nel programma) ritenuti utili nella preparazione di un laureato in Ingegneria che debba utilizzare tecniche matematiche e numeriche avanzate.

### PROGRAMMA

#### 1. *Generalità sui metodi alle particelle.* [8 ore] \*

Vari tipi di metodi (PP, PM, P3M), valutazione della collisionalità, uso di particelle di forma finita, schema di base del metodo PIC, funzioni di forma e di assegnazione, schemi NGP e CIC, equivalenza tra uso della griglia spaziale e forma finita delle particelle, soluzione delle equazioni del moto, distribuzione iniziale delle superparticelle.

#### 2. *Schemi per l'integrazione temporale delle equazioni del moto.* [6 ore] \*

Consistenza, accuratezza, stabilità, efficienza, schemi espliciti ed impliciti, schema *leap-frog*, oscillatore armonico numerico, soluzione numerica delle equazioni del moto in presenza di campo magnetico.

#### 3. *Soluzione numerica di equazioni alle derivate parziali di tipo parabolico.* [8 ore] \*\*

Schemi espliciti, impliciti e di Crank-Nicolson in problemi monodimensionali, analisi di Von Neumann, generalizzazione a problemi multidimensionali, metodi *time-splitting* e loro ottimizzazione, applicazione a problemi non lineari.

4. *Analisi delle funzioni di forma e di assegnazione.* [12 ore] \*

Andamento della forza d'interazione in un sistema periodico con reticolo spaziale, calcolo della *self-force* con diversi metodi di assegnazione e di interpolazione, vincoli fisici sulla funzione di assegnazione, schemi NGP, CIC e TSC, generalizzazione al caso bidimensionale, analisi di Fourier della relazione tra densità e forza, relazione tra trasformata e serie di Fourier, campionamento e *aliasing*.

5. *Analisi di stabilità dei metodi alle particelle.* [12 ore] \*

Analisi lineare delle perturbazioni in un plasma, tecnica dell'equazione integrale, equazione di Vlasov per particelle di forma finita, evoluzione di perturbazioni con particelle di forma finita e con griglia spaziale, relazione di dispersione modificata, *finite-grid instability*, effetto della discretizzazione temporale sulla relazione di dispersione.

6. *Calcolo variazionale.* [8 ore] \*\*

Equazioni di Eulero-Lagrange, problemi con vincoli, multidimensionali e con condizioni al contorno, variazione seconda, applicazioni alla soluzione di equazioni differenziali, metodi di Ritz e dei residui pesati.

7. *Metodi energy-conserving.* [4 ore] \*

Verifica della non conservazione dell'energia per gli schemi che usano la stessa funzione di assegnazione e di interpolazione, schemi *energy-conserving*, applicazione di tecniche variazionali.

8. *Soluzione dei sistemi lineari che derivano dalla discretizzazione di operatori differenziali.* [12 ore] \*

Metodi diretti e iterativi, criteri di convergenza, analisi del raggio spettrale, accelerazione della convergenza, ottimizzazione del metodo SOR, metodi LSOR e ADI, metodi *steepest descent* e dei gradienti coniugati, Fast Fourier Transform.

9. *Accelerazione della convergenza nei calcoli di trasporto neutronico.* [8 ore] \*\*

Metodo DSA, analisi della convergenza, effetti della discretizzazione spaziale ed angolare, schemi coerenti, modifiche nel caso di *scattering* altamente anisotropo.

10. *Tecniche perturbative per sistemi dinamici.* [10 ore] \*\*

Metodo *multiple-time scale*, perturbazioni in sistemi hamiltoniani, oscillazioni non lineari, il metodo delle medie, invarianti adiabatici.

ESERCITAZIONI. Viene introdotto l'ambiente di programmazione MATLAB. Viene descritto il programma di simulazione ES1. Sono sviluppate delle applicazioni numeriche relative agli argomenti trattati a lezione.

LABORATORIO. Vengono utilizzati programmi per la simulazione di plasmi e vengono sviluppati dei programmi di calcolo.

BIBLIOGRAFIA

C.K. Birdsall, A.B. Langdon, *Plasma physics via computer simulation*, Mc Graw-Hill, New York, 1985.

R.W. Hockney, J.W. Eastwood, *Computer simulation using particles*, Hilger, Bristol, 1988.

C.M. Bender, S.A. Orszag, *Advanced mathematical methods for scientists and engineers*, McGraw-Hill, New York, 1977.

E.E. Lewis, W.F. Miller, *Computational methods of neutron transport*, Wiley, New York, 1984.

V. Smirnov, *Cours de mathématiques supérieures*, Mir, Mosca, 1975.

**ESAME**

Per sostenere l'esame occorre consegnare una relazione relativa a programmi di calcolo sviluppati nelle esercitazioni. L'esame prevede una prova scritta di tipo teorico, seguita da un colloquio orale, in cui viene discussa la prova scritta e la relazione.

**Q4240 Progetti e costruzioni nucleari**

Anno: periodo 4,5:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 4+4 (ore settimanali); 52+44 (nell'intero periodo)  
 Docente: Graziano Curti (collab.: Francesco Raffa)

Il corso ha l'obiettivo di riprendere e approfondire argomenti della scienza delle costruzioni, con particolare riferimento a quelli che costituiscono il fondamento della progettazione di costruzioni meccaniche (strutture, impianti e recipienti in pressione). A questo scopo, nella prima parte del corso si espongono i principi di base della teoria dell'elasticità e vengono studiati elementi strutturali significativi quali le piastre e i solidi di rivoluzione (dischi e tubi). La seconda parte del corso si propone, invece, di illustrare alcune metodologie di calcolo comunemente applicate alla soluzione numerica dei problemi di calcolo strutturale.

**REQUISITI.** *Scienza delle costruzioni.*

**PROGRAMMA**

Stato di tensione in un corpo. Direzioni e tensioni principali. [6 ore]  
 Ipotesi di rottura. Tensione equivalente. [6 ore]  
 Trave curva e spessa. [2 ore]  
 Piastre rettangolari inflesse. [8 ore]  
 Dischi rotanti. [4 ore]  
 Tubi spessi e sottili. Cerchiatura dei tubi. [6 ore]  
 Metodo degli elementi finiti. [18 ore]  
 Cenni sugli elementi finiti gerarchici. [2 ore]

**ESERCITAZIONI**

La prima parte delle esercitazioni consiste nello svolgimento in aula di esercizi riguardanti gli argomenti trattati a lezione. La seconda parte delle esercitazioni prevede l'uso di un codice agli elementi finiti presso il LAIB.

Esercizi di ripasso di scienza delle costruzioni. [4 ore]  
 Cerchi di Mohr. Ipotesi di rottura. Esercizi. [4 ore]  
 Tensioni tangenziali nella flessione. Tensioni principali. Calcolo delle curve isostatiche. Esercizi. [8 ore]  
 Travi curve. Esercizi. [4 ore]  
 Analisi delle tensioni e delle deformazioni di elementi strutturali mediante elementi finiti. [24 ore]

**BIBLIOGRAFIA**

Timoshenko, *Theory of elasticity.*  
 Timoshenko, *Theory of shells and plates.*  
 Bathe, *Finite element procedures in engineering analysis.*  
 Appunti docente.

## Q4410 Protezione e sicurezza negli impianti nucleari

Anno: periodo 5:1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+(2) (ore settimanali); 78+18 (nell'intero periodo)  
Docenti: Luigi Gonella, Massimo Zucchetti

La protezione e l'analisi di sicurezza sono nate con il nucleare, e nel nucleare hanno trovato il campo di applicazione più avanzato fra i vari settori della tecnica.

Il corso è incentrato sull'insegnamento delle nozioni di radioprotezione ed i principi di sicurezza usati in campo nucleare; scopo finale è fornire all'ingegnere nucleare gli strumenti di analisi e di decisione a lui indispensabili nel campo più delicato della sua professione, ovvero quello dell'analista di sicurezza e di impatto ambientale. I recenti sviluppi nello scenario d'utilizzo del nucleare, in Italia e nel mondo, pongono questi aspetti in primo piano e ne rendono necessario l'approfondimento.

Viene particolarmente posta l'attenzione al confronto critico con i rischi e le normative di sicurezza degli altri settori della tecnica, allo scopo di mettere in grado l'ingegnere nucleare di estendere ad altri campi i criteri protezionistici avanzati propri del nucleare.

Oltre all'applicazione più classica (fissione) viene dato spazio sia all'analisi più innovativa riguardante la fusione nucleare, sia alle applicazioni al di fuori dell'energetica (utilizzo di radiazioni in campo industriale e medico).

In ultimo, il corso fornisce allo studente nozioni utili al sostenimento dell'esame per l'iscrizione all'elenco nazionale degli esperti qualificati per la sorveglianza fisica della radioprotezione.

### REQUISITI

Nozioni generali di fisica nucleare, di fisica del reattore nucleare e di impianti nucleari.

### PROGRAMMA

Il concetto e la misura del rischio. Quadro globale dei rischi della vita comune e delle attività civili e industriali. Rischi d'azione e di carenza, immediati e ritardati. Legami fra il rischi e l'impatto ambientale. [8 ore]

Trasferimento d'energia dalla radiazione alla materia. Grandezze dosimetriche, relazione fluenza - dose. Valutazione dell'esposizione interna all'organismo. [8 ore]

Effetti biologici e sanitari delle radiazioni ionizzanti. Equivalente di dose. Relazione dose - effetto. Esposizione di una popolazione. Posizione delle radiazioni ionizzanti nel quadro generale degli agenti genotossici. [8 ore]

Criteri generali della radioprotezione. Dose permessibile e principio ALARA. Livelli di riferimento e stati di emergenza. Concentrazioni permessibili e limiti d'assunzione. [8 ore]

Normativa nazionale ed internazionale nel campo della protezione dalle radiazioni. Le nuove normative ICRP del 1990 ed i BSS (*basic safety standards*). Confronto con le normative di sicurezza e protezione in altri campi. [6 ore]

Fondo naturale ed ambientale di radiazione. Sorgenti industriali, mediche e miscelanee. Il reattore come sorgente di radiazione. [8 ore]

Analisi di impatto ambientale di un reattore nucleare a fissione in condizioni di normale esercizio ed in condizioni incidentali, basato sul Rapporto preliminare di sicurezza del

Progetto Unificato Nucleare. Caratteristiche del sito di riferimento. Descrizione generale dell'impianto. Criteri generali di progetto (condizioni d'impianto, livelli di riferimento, criteri di protezione radiologica). Metodologia per il calcolo dei termini di sorgente e delle dosi al gruppo critico. Impatto radiologico in normale esercizio. Analisi d'incidente in condizioni d'impianto 2 e 3. Analisi d'incidente in condizioni d'impianto 4 (incidenti base di progetto), a partire dall'evento iniziatore fino alle dosi al gruppo critico. [14 ore]

Il rischio dell'elettroproduzione nucleare in confronto a quello degli altri mezzi di trasformazione d'energia e nel quadro generale dei rischi. [6 ore]

Analisi di impatto ambientale di un reattore nucleare a fusione. Il progetto ITER confrontato con la fissione. Caratteristiche d'impianto. Eventi incidentali. Rilasci di trizio e prodotti attivati. Metodologie per la riduzione dell'impatto. [6 ore]

Storia degli incidenti veri o presunti in campo nucleare. Gli incidenti di Windscale, Three-Mile Island e Chernobyl. [6 ore]

Scorie di fissione e di attivazione. Trattamento, classificazione e gestione finale delle scorie radioattive. Confronto fissione - fusione. Il problema della proliferazione. [4 ore]

Problemi di radioprotezione legati all'utilizzo di sorgenti radioattive in campo industriale e medico. [4 ore]

Elementi di progettazione dei rifugi NBC (nucleare, batteriologico, chimico). [2 ore]

La figura dell'esperto qualificato. L'esame e gli sbocchi professionali. Esercizi su radioprotezione. [6 ore]

### ESERCITAZIONI

Il programma indicato è comune a lezioni ed esercitazioni; queste ultime riguarderanno gli aspetti più applicativi fra gli argomenti trattati nel corso. All'interno del corso è prevista una visita di istruzione di una giornata presso l'impianto ETHEL del Centro Comune di Ricerca della Comunità Europea di Ispra, per la gestione di esperimenti sul trizio, oppure presso il Centro ENEA di Saluggia.

### BIBLIOGRAFIA

Appunti delle lezioni forniti dal docente.

C. Polvani, *Elementi di radioprotezione*, ENEA, Roma, 1987.

*Annals of the ICRP, Publication 60, Vol. 21, No. 1-3, 1990.*

ENEL, *Progetto Unificato Nucleare, Progetto di massima: rapporto preliminare di sicurezza. Vol. 1-3*, luglio 1982.

### ESAME

L'esame è esclusivamente orale e prevede l'approfondimento di alcuni temi fra quelli in programma. Non è prevista l'elaborazione di relazioni o altro materiale scritto. Particolare attenzione verrà rivolta alla verifica dell'apprendimento, da parte dello studente, della metodologia radioprotezionistica.

## Q4434 Radioattività

(Corso ridotto)

Anno: periodo 5:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 3+1 (ore settimanali); 34+12 (nell'intero periodo)  
 Docente: Bruno Minetti

Il corso si propone di approfondire le nozioni di base sulle metodologie di misura utilizzate nel campo della fisica, con particolare riferimento alle metodologie utilizzate per progettare e realizzare esperimenti di fisica nucleare.

Il programma è finalizzato alla progettazione e realizzazione di esperimenti relativi ad applicazioni specifiche, quali ad es. misura di radioattività ambientale, misura di inquinamento radioattivo di falde acquifere, ecc.

REQUISITI. *Fisica nucleare.*

### PROGRAMMA

*Fondamenti del calcolo delle probabilità.* [2 ore]

Definizione di probabilità. Definizione di eventi compatibili e incompatibili. Probabilità di *and* e *or* di eventi. Probabilità condizionata.

*Variabili aleatorie.* [4 ore]

Densità di probabilità. Funzione di distribuzione. Valor medio, varianza, momenti di ordine superiore. Funzione caratteristica.

*Distribuzioni particolari.* [6 ore]

Distribuzione di Poisson. Somma e differenza di distribuzioni di Poisson. Distribuzione binomiale. Distribuzione di Gauss. Sovrapposizione di distribuzioni gaussiane. Distribuzione degli intervalli.

*Probabilità di deviazione dalla media.* [2 ore]

*Criteri di conformità.* [4 ore]

Verifica di ipotesi. *Test* di ipotesi, caso generale con due ipotesi alternative.

*Sistemi di variabili aleatorie.* [2 ore]

Funzioni di variabili aleatorie in due e tre dimensioni. Somma e rapporto di variabili aleatorie.

*Stima di parametri.* [4 ore]

Stima esplicita e implicita di parametri. Stima di parametri vincolati. Metodo della massima verosimiglianza. Metodo dei minimi quadrati.

*Intervalli di confidenza.* [4 ore]

Trattazione approssimata nel caso di distribuzioni gaussiane. Caso generale e stima di un parametro. Stima della probabilità dalla frequenza. Caso di  $n$  prove ripetute.

*Metodi di simulazione applicati alla progettazione di esperimenti di fisica, in special modo fisica nucleare.* [6 ore]

Generalità sui metodi Montecarlo e loro utilizzo in fase di progetto di una misura. Metodi diretti e indiretti per la generazione di numeri casuali con densità di probabilità assegnata. Simulazione di sorgenti radioattive isotrope e anisotrope. Simulazione del passaggio di particelle nei materiali. Tecnica della collisione forzata. Simulazione di collisioni.

**LABORATORIO**

Richiami sul passaggio di particelle nella materia. [2 ore]

Rivelatori di particelle. [2 ore]

Rivelatori a gas, a scintillazione e a stato solido. Efficienza e tempo morto di un rivelatore. [2 ore]

Rivelazione di particelle *beta*. [4 ore]

Rivelazione di particelle *gamma*. [4 ore]

**BIBLIOGRAFIA.** Appunti alle lezioni.

**ESAME.** L'esame può consistere in una prova orale tradizionale o nella discussione di una tesina relativa all'approfondimento di un argomento specifico del corso.

**Q4460 Reattori nucleari avanzati**

Anno: periodo 5:1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 88+32 (ore, nell'intero periodo)

Docente: *da nominare*

**PROGRAMMA**

*Procedure di calcolo neutronico dei reattori.* [12 ore]

Descrizione della struttura dei codici di calcolo neutronico. Funzioni di progetto: costante di moltiplicazione, distribuzione di potenza, dinamica e sicurezza, controllo; ottimizzazione del progetto di *core*.

Generazione dei dati nucleari. Librerie di sezioni d'urto: Media energetica delle sezioni d'urto. Calcoli di cella nei reattori termici. Sezioni d'urto per i reattori veloci. Aggiustamento di librerie di dati sperimentali differenziali mediante misure integrali: formalismo, varianza-covarianza delle librerie aggiustate. Descrizione delle procedure di media energetica delle sezioni d'urto; calcoli di spettro energetico e calcoli di cella.

**BIBLIOGRAFIA**

J.J. Duderstadt, L.J. Hamilton, *Nuclear reactor analysis*, Wiley, New York, 1976.

A.F. Henry, *Nuclear reactor analysis*, MIT Press, Cambridge (Mass.), 1975.

Y. Yeivin, *Experimental data uncertainties : the adjustment formalism, consistency of parameter and response data*, The Hebrew University, Jerusalem, 1992.

*Teoria del trasporto dei neutroni.* [32 ore]

Metodi statistici per la simulazione del trasporto neutronico e fotonico: fondamenti fisici e statistici del metodo Monte Carlo; convergenza statistica del metodo e varianza; calcolo di integrali; struttura di calcolo per un problema di trasporto neutronico con sorgente e per il problema critico; stimatori e loro applicazione; problemi *deep penetration* e principali metodi di riduzione della varianza; *importance sampling*; applicazioni agli schermi e ai *blanket* dei reattori a fusione di geometria complessa; cenni alle applicazioni nel settore dell'affidabilità di sistemi complessi.

Deduzione dell'equazione del trasporto per i neutroni in forma integro-differenziale ed integrale; equivalenza fra le due forme.

Risolubilità della equazione del trasporto stazionaria: autovalori e possibili formulazioni; autovalore di moltiplicazione, autovalore temporale e teorema di equivalenza.

Il metodo delle armoniche sferiche; caso monocinetico e dipendente dall'energia; il caso dipendente dal tempo; l'equazione della diffusione e del telegrafista; l'equazione dell'età.

Il metodo delle ordinate discrete: la geometria monodimensionale; equivalenza con il metodo delle armoniche sferiche; geometria pluridimensionale: *ray effects*; forma integrale delle equazioni alle ordinate discrete. Il codice ANISN.

Il metodo della trasformata di Fourier ed il metodo di Case: soluzione dell'equazione del trasporto monocinetico nel mezzo infinito; parte diffusiva e trasportistica della soluzione (cenni).

#### BIBLIOGRAFIA

Monte Carlo methods in nuclear reactor analysis : *Ispra course*, CCR, Ispra, 1984.

S.E. Corno, *Appunti*, Politecnico di Torino, 1978.

R.V. Meghreblian, D.K. Holmes, *Reactor analysis*, Mc-Graw-Hill, New York, 1960.

G.I. Bell, S. Glasstone, *Nuclear reactor theory*, Van Nostrand - Reinhold, New York, 1970.

A.F. Henry, *Nuclear reactor analysis*, MIT Press, Cambridge (Mass.), 1975.

ANISN, *PC manual*, NEA Data Bank, Gif-sur-Yvette, 1990.

#### *Teoria delle perturbazioni.* [16 ore]

L'equazione aggiunta all'equazione del trasporto integro-differenziale e la funzione importanza; generalizzazione del problema aggiunto: concetto di *detector*.

Teoria delle perturbazioni *standard* calcolo della reattività.

Teoria delle perturbazioni generalizzata: applicazione a funzionali lineari del flusso neutronico, a problemi di radiazione, allo studio dell'evoluzione di nuclidi, alla valutazione degli effetti di interazione di sistemi di barre di controllo. Applicazioni alla fisica dei reattori veloci.

#### BIBLIOGRAFIA

M. Salvatore, *La théorie des perturbations e les analyses de sensibilité*, IRDI / DEDR, CEN, Cadarache, 1988.

#### *Dinamica dei reattori.* [28 ore]

Metodi di separazione: deduzione delle equazioni della cinetica puntiforme, definizione dei parametri cinetici, metodi adiabatici e quasi-statici, metodi degli *omega-modes*. Metodi modali e nodali; la cinetica inversa.

La contoreazione: fondamenti fisici della contoreazione; risonanze ed effetto Doppler; effetti di temperatura e di concentrazione di nuclidi; il funzionale di *feedback*; metodi modali, metodi a parametri distribuiti per il calcolo termico; contoreazione da xeno e da samario.

Dinamica spaziale in approssimazione asintotica; applicazioni con diversi modelli di rallentamento; teoria della criticità.

Modelli fisico-matematici per la dinamica di reattori innovativi.

#### BIBLIOGRAFIA

A.F. Henry, *Nuclear reactor analysis*, MIT Press, Cambridge (Mass.), 1975.

Z. Ackasu, G.S. Lellouche, L.M. Shotkin, *Mathematical methods in nuclear reactor dynamics*, Academic Press, New York, 1971.

#### ESERCITAZIONI. [32 ore]

Nell'ambito del corso sono proposte tre esercitazioni che riguardano applicazioni degli argomenti trattati nelle lezioni. È richiesto allo studente di mettere a punto i metodi, di svolgere la parte di calcolo numerico, discutere le procedure e i risultati in una relazione e presentare il proprio lavoro agli altri studenti del corso in forma seminariale. Solitamente le esercitazioni vengono svolte in gruppi di lavoro di due o tre studenti.

– Soluzione di un problema di trasporto neutronico, fotonico o di affidabilità con il metodo Monte Carlo; studio della convergenza, applicazioni di metodi di riduzione

della varianza, *importance sampling*. L'esercitazione richiede la messa a punto di un programma al calcolatore.

– Calcolo dei parametri neutronici (costante di moltiplicazione, controllo, distribuzione di potenza e fattore di picco) di un *core* di reattore. Si richiede l'uso di un codice di trasporto a multigruppi energetici (ad es. ANISN) per effettuare il calcolo di cella e della struttura completa.

– Aggiustamento di un insieme di dati sperimentali differenziali mediante misure integrali.

## Q4740 Sicurezza e analisi di rischio

Anno: periodo 4,5:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 4+4 (ore settimanali); 90+20 (nell'intero periodo)

Docente: Giovanni Del Tin (collab.: Andrea Carpignano)

Il corso si propone di fornire gli elementi conoscitivi e gli strumenti operativi per l'analisi di sicurezza di impianti e sistemi complessi attraverso le metodologie deterministiche e probabilistiche.

L'obiettivo è quello di fornire al futuro professionista una adeguata cultura tecnico-scientifica nel campo della sicurezza, utile ai fini della progettazione degli impianti e della relativa compatibilità ambientale, nonché della pianificazione di emergenza in situazioni incidentali.

### REQUISITI

Sono nozioni propedeutiche quelle impartite nei corsi di *Fisica tecnica, Termodinamica applicata, Fluidodinamica*. Sono altresì richieste conoscenze di base concernenti le caratteristiche costruttive e funzionali dei più comuni componenti e sistemi dell'impiantistica industriale.

### PROGRAMMA

#### *Generalità.* [6 ore]

Generalità sulla sicurezza e l'analisi di rischio. Definizione, valutazione e accettabilità del rischio. L'analisi di rischio quale strumento di supporto per la Valutazione di Impatto Ambientale e per la pianificazione del territorio, rischio d'area. Rischi connessi all'impiantistica industriale, piani di emergenza interna ed esterna, normativa vigente in materia di sicurezza industriale. Rischi connessi alle attività di trasporto.

#### *Analisi fenomenologica dell'evoluzione degli*

#### *eventi incidentali e relative conseguenze.* [40 ore]

Identificazione degli eventi incidentali, interni all'azienda, rilevanti per la sicurezza delle aziende e dell'ambiente circostante.

Termine di sorgente: trattazione fenomenologica, identificazione dei possibili tipi di rilascio, modelli per la stima dell'entità del rilascio.

Fenomeni di incendio: trattazione fenomenologica, classificazione, modelli per la valutazione delle conseguenze, misure di salvaguardia.

Fenomeni di esplosione: trattazione fenomenologica, classificazione, modelli per la valutazione delle conseguenze, misure di salvaguardia.

Dispersione di inquinanti nell'ambiente: trattazione fenomenologica, identificazione dei meccanismi di trasporto, modelli per la stima delle concentrazioni.

Stima dei danni: vulnerabilità dell'uomo, delle strutture e dell'ambiente.

Identificazione e studio degli eventi di provenienza esterna: eventi naturali (terremoti, inondazioni, frane) ed eventi causati da altre attività industriali.

*Algebra degli eventi e calcolo probabilistico.* [4 ore]

Algebra degli eventi, utilizzo dell'algebra degli eventi nell'analisi di affidabilità. Definizione di *cut set* e *minimal cut set*. Teoria delle probabilità, teoremi sul calcolo probabilistico, teorema di Bayes. Utilizzo dei teoremi di calcolo probabilistico ai fini dell'analisi di affidabilità.

*Analisi di affidabilità di sistemi.* [20 ore]

Definizione di componente e sistema. Definizione di affidabilità e disponibilità. Determinazione empirica dell'affidabilità di componenti non riparabili. Tasso di guasto e densità di guasto non condizionata. Distribuzioni. Analisi di sistemi di componenti non riparabili: parallelo, serie, logica maggioritaria, *stand-by*. Riparabilità di componenti. Analisi di sistemi con componenti riparabili, parametri affidabilistici che caratterizzano i componenti riparabili, calcolo dell'indisponibilità di componenti riparabili, valutazione empirica di affidabilità e disponibilità per componenti riparabili. Calcolo dell'indisponibilità e dell'affidabilità di un sistema mediante *minimal cut set*. Componenti sottoposti a *test*, calcolo del periodo di *test* ottimale, politiche di *test* per sistemi serie e parallelo. Indici di criticità.

*Metodologie per l'analisi di affidabilità e sicurezza.* [20 ore]

Schema metodologico dell'analisi di sicurezza. Metodologie speditive e metodologie dettagliate. Identificazione degli eventi iniziatori (HAZOP, FMECA, ecc.) ed esempi applicativi. Analisi dei sistemi (*fault tree*, Markov, blocchi di affidabilità). Cause comuni di guasto. Analisi di sequenze incidentali (*event tree*, metodologie dinamiche, alberi fenomenologici). Analisi di vulnerabilità. Strumenti informatici per l'analisi di sicurezza.

ESERCITAZIONI. [20 ore]

Agli allievi è proposta un'esercitazione pratica che consiste nell'analisi di sicurezza di un sistema industriale complesso o di un sistema di trasporto ai fini della determinazione dell'impatto ambientale che si avrebbe in caso di incidente. L'esercitazione richiede l'applicazione delle metodologie trattate nelle varie parti del corso.

#### BIBLIOGRAFIA

M.D. Shooman, *Probabilistic reliability: an engineering approach*, Mc Graw-Hill, 1969.

A. Villemeure, *Sureté de fonctionnement des systèmes industriels*, Eyrolles, Paris, 1988. *Guidelines for chemical process quantitative risk analysis*, Center for Chemical Process Safety of the AIChE, New York, 1989.

*Methods for the calculation of physical effects*, The Netherlands Organization of Applied Scientific Research (TNO), Voorburg, 1988.

*Methods for the determination of possible damage*, The Netherlands Organization of Applied Scientific Research (TNO), Voorburg, 1989.

## Q5310 Strumentazione fisica

Anno: periodo 4:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 84 (ore, nell'intero periodo)

Docente: Luigi Gonella

Il corso presenta, mediante esemplificazione in due campi, la metodologia con cui si trattano quei dispositivi tecnici il cui funzionamento richiede un riferimento diretto ai corsi di fisica generale senza l'intermediario dei corsi d'ingegneria intesi al trattamento applicativo di specifici capitoli della fisica, sottolineando le differenze di approccio fra la trattazione di un fenomeno a scopo scientifico e quella a fine applicativo, per realizzare obiettivi tecnici definiti. Si pensa alla figura professionale di un ingegnere capace di trasferire strumentazioni dal laboratorio di ricerca alla pratica industriale.

### PROGRAMMA

#### A *Sviluppo e tendenze attuali della metrologia.* [10 ore]

Enti legiferanti e pratiche normative in campo metrologico.

Lacune e contraddizioni dell'approccio classico. Critica dei concetti di valor vero ed errore.

Il concetto emergente di incertezza della misura.

Diagramma di taratura e grandezze d'influenza.

Sensibilità, ripetibilità, stabilità e risoluzione.

Tipologia delle grandezze misurabili.

#### B *Tecnica del vuoto.* [24 ore]

Il ruolo giocato dalla fisica e tecnica del vuoto nello sviluppo dell'ingegneria, dai primi motori termici all'uso di superfici atomicamente pulite.

Unità di misura fisiche e convenzionali. Campi di vuoto.

Teoria cinetica dei gas in termini applicativi. Rateo di bombardamento e libero cammino medio.

Fenomeni di trasporto: diffusione, viscosità, conduzione termica. Vacuometri termici.

Flusso molecolare e laminare. Conduttanza e velocità. Dimensionamento delle condutture.

Fenomenologia della sorzione. Statica e dinamica (trattazione al prim'ordine). Pompe a sorzione e *getter*. Trattamento empirico del degasamento.

Effetti elettrici nel suolo. *Sputtering*. Vacuometri a ionizzazione. Pompe ioniche.

Tecnologia delle giunzioni. Valvole. Trappole.

Pompe volumetriche. Pompe a getto fluido. Pompe turbomolecolari. Pompe criogeniche.

Vacuometri McLeod. Taratura dinamica dei vacuometri.

Analizzatori di gas residuo. Cercafughe.

#### C *Ottica applicata.*

##### CI *La luce come fenomeno tecnico.* [12 ore]

Unità di misura in radiometria e fotometria. La luce come grandezza misurabile biofisico-tecnica. Curva di visibilità. Corpo nero. Infrarosso e ultravioletto.

Cenni di colorimetria.

Interazione luce - materia. Riflessione diffusa. Rivestimenti antiriflettenti. Indice di rifrazione complesso. Costringenza. Caratteristiche dei vetri ottici. Fluorescenza.

Sorgenti di luce. Sole. Lampade incandescenti. Lampade a scarica. Laser.

L'occhio umano come rivelatore fotometrico. Implicazioni sulla strumentazione delle sue caratteristiche e limiti.

Emulsioni fotografiche. Fotocellule.

*C2 Lo strumento ottico come formatore d'immagini puntiformi.* [20 ore]  
 Invarianti ottici. Approssimazione parassite. Le leggi dell'ottica geometrica in termini tecnici. Lenti spesse e sistemi centrati. Ingrandimento lineare, angolare longitudinale. Pupille e finestre. Apertura e campo. Fotometria dello spazio immagine. Conservazione della luminanza e contrasto. Problematica dei fari.  
 Trattamento matriciale dei raggi meridiani. Matrice di trasferimento e costanti gaussiane. Trattamento globale dei fasci estesi. Accettanza ed emittanza di un sistema. Quantità d'informazione trasmissibile.  
 Aberrazioni geometriche primarie. Aberrazione cromatica.  
 Correzione delle aberrazioni. Piegatura delle lenti. Superfici aplanatiche e obiettivo di Amici. Doppie acromatici.

*C3 Trattamento strutturale della formazione d'immagine.* [18 ore]  
 Diffrazione e interferenza in termini tecnici e fotometrici. Applicabilità generale dell'approssimazione di Fraunhofer agli strumenti ottici. Reticoli.  
 Illuminazione di Koeler. Teoria di Abbe del microscopio.  
 Risoluzione per diffrazione puntiforme e diffrazione da reticolo. Microscopia elettronica e suoi limiti.  
 Generalizzazione dell'approccio di Abbe: formazione dell'immagine come trasformata e antitrasformata di Fourier di una struttura di contrasto.  
 Funzione di trasferimento ottico OTF. Funzione di modulazione. Coordinate normalizzate termini di OTF.  
 Piastra a zone di Fresnel. Microscopio a contrasto di fase.

BIBLIOGRAFIA. Formulario e raccolta definizioni fornite in fotocopia dal docente.

ESAME. Esercizio di progettazione d'impianto a vuoto da svolgersi autonomamente dallo studente e presentare all'esame. Esame orale.

## **Q5404 Superconduttività** (Corso ridotto)

Anno: periodo 5:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 60 (ore, nell'intero periodo)  
 Docente: Mario Rasetti

Il corso è inteso fornire una professionalità specifica a chi voglia affrontare professionalmente problemi avanzati nell'ambito dei nuovi materiali, anche non necessariamente superconduttori. Più in particolare, naturalmente, esso mira a fornire, a quegli studenti che fanno un uso applicativo esteso delle proprietà dei superconduttori, una comprensione profonda dei meccanismi fisici, dei fenomeni microscopici, dei metodi di misura e dei modelli concettuali di rappresentazione di tali materiali. Dato il livello alto di difficoltà e di aggiornamento, il corso è strumento professionale importante per chi intenda affrontare tali argomenti in un ambito di ricerca. Nel passato, dalla frequenza al corso sono spesso scaturite tesi di laurea interessanti (nell'ambito della scienza dei materiali, della fisica dello stato condensato, dello studio dei sistemi quantistici a molti corpi).

Le tre parti del corso – che ha durata complessiva di 55 / 60 ore – hanno peso approssimativamente uguale (di circa 20 ore ciascuna). Le lezioni sono accompagnate da esercitazioni, che consistono essenzialmente nella visita a laboratori di ricerca, in cui gli studenti assistono alla esecuzione di esperimenti, per un totale di circa 8 ore. Sono pre-

requisiti essenziali i corsi di matematica e fisica generali e i complementi di matematica; raccomandabili uno o due corsi di "fisica moderna" (che diano allo studente le nozioni di base di meccanica quantistica di "prima quantizzazione" e di meccanica statistica). Tutti gli elementi concettuali non istituzionali necessari vengono esaurientemente forniti durante il corso stesso; esistono tuttavia buoni testi di riferimento, che vengono indicati.

La prima parte è dedicata alla descrizione delle proprietà caratteristiche dei materiali superconduttori, della fenomenologia relativa e dei più importanti esperimenti che consentono di mettere in rilievo e caratterizzare tali proprietà. Vengono descritti la dipendenza della resistività dalla temperatura assoluta nella fase normale, nella fase superconduttrice e alla transizione; l'effetto Meissner – che corrisponde al passaggio, alla temperatura critica, da comportamento paramagnetico (ad alta temperatura) a diamagnetico (a bassa temperatura); il fenomeno delle correnti persistenti; la resistenza e le tecniche di misura del *gap* nello spettro energetico. Per i superconduttori ad alta temperatura critica viene discussa la complessa struttura chimica e cristallografica.

La seconda parte del corso consiste di una accurata rassegna dei modelli e delle teorie fisiche che consentono di descrivere il fenomeno della superconduttività. Dopo lo studio delle teorie fenomenologiche di London e di Landau–Ginburg, viene affrontata la teoria microscopica BCS (Bardeen, Cooper, Schrieffer). Tale teoria è basata su concetti profondi e complessi di meccanica e meccanica statistica quantistiche, dei cui elementi fondamentali viene data una rassegna. Si discutono i principi della seconda quantizzazione, le proprietà statistiche collettive di sistemi di particelle di Fermi (in particolare come queste possano formare stati legati) e di Bose (con il fenomeno della condensazione a bassa temperatura). Si richiamano altresì elementi di fisica dello stato solido: il concetto di banda di energia, il teorema di Bloch, le relazioni di dispersione dei fononi. Mediante tutti questi strumenti la teoria BCS viene descritta sia nella versione a temperatura zero (stato fondamentale) sia in quella a temperatura non-nulla, ricavandone tutte le proprietà termodinamiche, di equilibrio e non, interessanti. Per i superconduttori ad alta temperatura critica viene fatto un cenno alle più moderne teorie (modello di Hubbard e sue generalizzazioni) attualmente prese in considerazione.

La terza parte del corso è dedicata alle applicazioni. Vengono descritti e analizzati gli utilizzi nel trasporto di corrente elettrica, nell'accumulo di energia, nella meccanica (tramite la levitazione: trasporti, cuscinetti a levitazione magnetica). Si studia poi l'effetto Josephson e la sua applicazione negli SQUID (Quantum Interference Superconductive Devices) per usi metrologici, di diagnostica medica, ecc.

## **P5584      Tecnologia dei materiali metallici** (Corso ridotto)

Anno: periodo X:2    Lezioni, esercitazioni, laboratori: 4+1 (ore settimanali)

Docenti: Donato Firrao, Giorgio Scavino (collab.: Graziano Übertalli, Giovanni Maizza, Francesco Rosalbino, Carmelo Baeli)

Nell'ambito del corso sono dapprima sviluppati i principi fondamentali del comportamento dei metalli e delle leghe, in riferimento alle loro caratteristiche meccaniche ed all'influenza esercitata da composizione chimica, microstruttura, trattamenti termici e lavorazioni meccaniche. Vengono quindi dettagliatamente esaminate le principali classi di acciai, ed i trattamenti termici e termochimici atti a conferire le caratteristiche

meccaniche richieste, le ghise, le leghe di alluminio e magnesio con i relativi processi di rafforzamento. Infine vengono descritte le applicazioni dei vari tipi di acciai e leghe di alluminio, magnesio e rame fornendo le modalità di scelta dei materiali metallici in base alla geometria del progetto ed alle sollecitazioni in opera.

## REQUISITI

*Chimica, Tecnologia dei materiali e chimica applicata, Scienza delle costruzioni.*

## PROGRAMMA

Presentazione del corso: argomenti trattati, impegno orario, difficoltà della materia, modalità d'esame. [1 ora]

Il legame metallico: caratteristiche del legame ed influenza sulle proprietà dei metalli. Proprietà elettriche e magnetiche. [1 ora]

I tipi di reticoli fondamentali: costruzione di strutture cubiche ed esagonali, relazioni di simmetria nei vari reticoli, indicizzazione delle direzioni e dei piani cristallografici con relativi esempi, piani e direzioni a maggiore impaccamento. [3 ore]

Le fasi metalliche: lacune ottaedriche e tetraedriche, soluzioni solide interstiziali, soluzioni solide sostituzionali, soluzioni solide ordinate, trasformazioni ordine - disordine, fasi di Hume-Rothary, Laves e semimetalliche, carburi, fasi intermedie. Cenni di roentgenografia con calcolo degli spettrogrammi. [4 ore]

Difetti di punto, linea e volume: vacanze, divacanze e autointerstiziali. Dislocazioni: calcolo per la resistenza teorica di un monocristallo, tipi di dislocazioni, reticoli e circuiti, vettore di Burgers, meccanismi di formazione e nucleazione delle dislocazioni, *climb* di dislocazioni, sforzo di taglio critico risolto, i sistemi di scorrimento, l'incrudimento, parte plastica della prova di trazione, condizioni di allungamento a carico massimo, prova di trazione per materiali a reticolo cubico corpo e facce centrato con eventuale prova pratica, slittamento deviato, dislocazioni parziali di Shockley, energia dei difetti di impilamento, intersezione di dislocazioni, campo di tensioni associato ad una dislocazione, energia delle dislocazioni, interazione tra dislocazioni. [6 ore]

Invecchiamento degli acciai: atmosfere di Cottrell, acciai calmati ed effervescenti, influenza sull'invecchiamento. [2 ore]

Frattura dei materiali metallici: frattura duttile su monocristallo e su policristallo, influenza delle particelle e della matrice, frattura fragile, nucleazione e propagazione delle cricche, fattori influenzanti la frattura fragile, rottura per fatica, la prova di resistenza e di determinazione del  $K_{Ic}$  e del  $J_{Ic}$  con loro significato. [3 ore]

Meccanismi di rafforzamento delle leghe: incrudimento, affinamento del grano, soluzione solida, precipitazione di seconda fase. [2 ore]

Acciai: da profondo stampaggio, proprietà e metodi di fabbricazione, prove pratiche di imbutibilità, acciai altoresistenziali, acciai bainitici, acciai a medio alto tenore di carbonio. [2 ore]

Trattamenti termici: *recovery* e ricristallizzazione, crescita dei grani, ricottura dei lingotti, ricottura completa e di globulizzazione, processi di ricottura, normalizzazione, trasformazioni allo stato solido attivate termicamente, trasformazione eutetoidica, parametri influenzanti la distanza tra le lamelle, trasformazione martensitica con relativi

meccanismi, trasformazione bainitica, rinvenimento degli acciai al carbonio e legati, fragilità di rinvenimento, diagrammi TTT e CCT per acciai al carbonio e legati. [6 ore]

Temprabilità: tensioni da tempra, curve ad  $U$ , mezzi raffreddanti, caratteristiche e difetti, diametro critico di barrotti temprati, diametro critico reale ed ideale, curve Jominy, determinazione sperimentale e teorica, diagrammi di Gerber e Wyss. [3 ore]

Gli acciai: acciai da bonifica, caratteristiche e proprietà, gli acciai da bonifica dell'unificazione italiana, gli acciai per utensili per lavorazioni a freddo e a caldo, acciai rapidi e trattamenti termici, acciai al Ni, acciai per impieghi a basse temperature, leghe Fe-Ni, acciai *maraging*, acciai al Mn, Hadfield, acciai automatici, acciai al Si, per molle, valvole e lamierini di trasformatori, acciai per cuscinetti, acciai per impieghi ad alte temperature, superleghe, acciai inossidabili martensitici, ferritici e austenitici. [8 ore]

Trattamenti superficiali: tempra superficiale, le atmosfere controllate, trattamenti di cementazione e di nitrurazione. [3 ore]

Ghise: ghise grigie, inoculazione, ghise bianche e per malleabilizzazione, ghise sferoidali. [2 ore]

Leghe di alluminio: classificazione delle leghe, processi di invecchiamento, leghe da trattamento termico, leghe da getto; cenni sulle leghe del Mg. [2 ore]

Leghe di rame: rame per impieghi elettrici, ottoni, bronzi; cenni sulle leghe del Ti. [2 ore]

#### ESERCITAZIONI

Prova di trazione.

Prova di durezza.

Prova di resilienza.

Valutazione temprabilità acciai.

Metodologie metallografiche.

#### BIBLIOGRAFIA

Testo di riferimento:

A. Burdese, *Metallurgia e tecnologia dei materiali metallici*, UTET Torino.

Testi ausiliari:

Qualsiasi testo di metallurgia fisica.

## Q5680 Tecnologie e applicazioni nucleari

Anno/periodo 5:1 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+2 (ore settimanali); 76+24 (nell'intero periodo)

Docente: Mario De Salve (collab.: Massimo Zucchetti)

Il corso si propone di completare la formazione culturale di un ingegnere con l'acquisizione di una sensibilità e metodologia finalizzata alla scelta dei materiali nel progetto di componenti, considerando non solo le funzioni che essi devono svolgere ma anche le prestazioni che essi devono assicurare e la fattibilità tecnico-economica in relazione ai metodi di fabbricazione e all'ambiente di lavoro. Nel corso sono fornite le nozioni di base sulla tecnologia, sulle proprietà e sulle prestazioni dei materiali impiegati negli impianti nucleari a fissione e fusione, con particolare riguardo agli aspetti

concernenti il danno da radiazione. Si affrontano i problemi connessi ai criteri per la scelta dei materiali in relazione alle funzioni che essi devono svolgere negli impianti, ai metodi di fabbricazione dei manufatti e all'ambiente di lavoro in cui devono operare. Si forniscono inoltre alcuni elementi di base sul comportamento elastoplastico dei materiali e sulla meccanica della frattura.

## PROGRAMMA

*Il ruolo delle tecnologie nella formazione professionale di un ingegnere.* [4 ore]

Settori tecnici che coinvolgono le tecnologie nucleari. Condizioni operative in cui i materiali devono operare. Classificazione dei materiali impiegati nei reattori nucleari. Materiali di corrente impiego nei reattori nucleari.

*Classificazione delle proprietà dei materiali.* [6 ore]

Proprietà fisico-chimiche, proprietà meccaniche, proprietà tecnologiche. Comportamento dei materiali sottoposti a carichi meccanici. Prove di trazione, macchine universali di prova. Diagramma sforzi - deformazioni, moduli di elasticità longitudinale e trasversale. Classificazione delle rotture. Transizione duttile - fragile, temperature di transizione. Resilienza e prove di resilienza. Metodi di prova, provette e norme UNI di riferimento. Rottura per fatica. Rottura per scorrimento viscoso. Influenza delle temperatura sulle proprietà meccaniche.

*Richiami sulla struttura e proprietà dei materiali.* [6 ore]

Legami interatomici (covalente, metallico, ionico), legami secondari. Impacchettamento atomico e ionico. Richiami sulle proprietà periodiche degli elementi. La struttura cristallina, proprietà dei cristalli. Cristallizzazione e strutture policristalline. Difetti dei cristalli: puntuali, lineari (dislocazioni). Meccanismi di formazione dei difetti e stima della concentrazione dei difetti. Moto delle dislocazioni. Difetti di superficie.

*Danneggiamento indotto da radiazioni.* [6 ore]

Tipi di danneggiamento indotti nei cristalli, valutazione dell'irraggiamento di un materiale, fluenza. Teorie per la stima degli spostamenti di atomi per irraggiamento, interazione con fotoni di alta energia, neutroni, frammenti di fissione, ioni pesanti. Ratei di spostamento. Dosi equivalenti e temperature equivalenti. Impianti per lo studio del danno da radiazione. Spostamenti multipli associati ad urti primari. Formazione di vacanze, *cluster* di difetti puntuali nei metalli. Formazione dei vuoti (*swelling*). *Spike* di fissione. Energia immagazzinata e rinvenimento nel danno da radiazione. Interazione dei neutroni veloci con i metalli. Formazione di bolle con precessi di nucleazione, crescita, aggregazione e migrazione. Fenomeni di diffusione e rilascio attraverso i bordi dei grani. Modelli per lo studio della formazione delle bolle durante l'irraggiamento.

*Effetti dell'irraggiamento sulle proprietà fisiche.* [2 ore]

Resistività elettrica, potere termoelettrico, conducibilità termica, calore specifico, dilatazione termica, densità.

*Fenomeno della radioattività indotta da flusso neutronico.* [4 ore]

Catene di decadimento attivazione. Concetto di bassa attività e materiale a bassa attivazione (LAM). Categorie di LAM (acciai, leghe, materiali compositi).

*Effetti dell'irraggiamento sulle proprietà meccaniche.* [2 ore]

Curve di trazione e curve di transizione duttile - fragile. Danno da radiazione sulle proprietà dei materiali isolanti elettrici e materiali polimerici.

*Elementi di teoria della plasticità.* [4 ore]

Richiami di meccanica dei mezzi continui, invarianti dei tensori degli sforzi e delle deformazioni, cerchi di Mohr, comportamento dei materiali sollecitati oltre il carico di snervamento, modelli di comportamento in regime elastoplastico. Criteri di plasticità. Modelli di incrudimento. Modelli meccanici per materiali in regime elasto-visco-plastico.

*Elementi di teoria dello scorrimento viscoso dei materiali (creep).* [4 ore]

Fasi dello scorrimento viscoso, *creep* primario e secondario. *Creep* terziario e meccanismi di rottura. Equazioni del *creep*. Comportamento sotto carichi variabili. Norme UNI per la caratterizzazione dei materiali in condizioni di scorrimento viscoso a caldo. Curve di scorrimento viscoso a caldo. Caratteristiche meccaniche degli acciai sottoposti a scorrimento viscoso a caldo. *Creep* da irraggiamento: modelli e mappe di rilassamento.

*Fenomeni di danneggiamento dei materiali della prima parete* dei reattori nucleari a fusione: erosione, *sputtering*, evaporazione, *blistering*. Criteri per la scelta dei materiali. [2 ore]

*Fenomeni di degradazione delle proprietà dei materiali.* [2 ore]

Rotture duttile, fragile, da fatica, indotta da corrosione. Classificazione dei processi di corrosione, corrosione elettrochimica, da ossigeno, intergranulare, sotto sforzo. Infragilimento da idrogeno. Prevenzione e protezione dalla corrosione: metodi ed accorgimenti.

*Elementi di meccanica della frattura: difetti e loro propagazione.* [2 ore]

Approccio energetico, curve *R*, fattori di intensità degli sforzi. Modello del raggio plastico. Propagazione dei difetti. Cenni sui metodi di controllo non distruttivo.

Classificazione dei materiali di rilevante interesse nell'ingegneria nucleare. Specifiche tecniche per i materiali combustibili, moderatori, refrigeranti e materiali strutturali.

*Materiali combustibili: uranio, plutonio, torio.* [8 ore]

Processi di preparazione e lavorazione e proprietà fisiche, meccaniche e tecnologiche. Leghe dell'uranio: diagrammi di stato, lavorabilità e comportamento sotto irraggiamento. Materiali ceramici a base d'uranio, elementi di metallurgia delle polveri e processi di sinterizzazione, proprietà termofisiche e meccaniche. Torio e sue leghe: processi di preparazione, proprietà termofisiche e meccaniche. Plutonio e suoi composti: proprietà termofisiche e meccaniche.

Moderatori e riflettori: grafite, berillio ed ossido di berillio. Materiali affacciati al plasma nei reattori a fusione e moltiplicatori neutronici. Refrigeranti: acqua, acqua pesante, metalli liquidi. Problemi di attivazione e corrosione. Materiali trizio-geni (*breeder*): composti ceramici, *breeder* liquidi. [4 ore]

Materiali di rivestimento: zirconio e sue leghe. Materiali strutturali: acciai, leghe a base di nickel. Materiali strutturali innovativi per reattori a fusione. Materiali superconduttori: proprietà e processi di fabbricazione. Materiali isolanti. [4 ore]

*Progetto e fabbricazione degli elementi di combustibile nei reattori ad acqua leggera:* geometrie e tipologie di riferimento, criteri e specifiche tecniche, campi di temperatura e sollecitazioni termomeccaniche. Ciclo di fabbricazione e cenni sui controlli non distruttivi. [6 ore]

*Ciclo del combustibile nucleare.* [2 ore]

Processi di arricchimento per diffusione gassosa e per centrifugazione gassosa.

*Riprocessamento del combustibile nucleare.* [2 ore]

*Gestione, trattamento e confinamento dei rifiuti radioattivi.* [4 ore]

Classificazione delle scorie, normativa internazionale ed italiana. Quantità e qualità delle scorie nei reattori a fissione. Confronto con i reattori a fusione: scorie triziate, scorie attivate. Confinamento geologico dei rifiuti radioattivi.

*Il trizio nei reattori a fissione e fusione.* [2 ore]

Produzione di trizio nel mantello del reattore a fusione, TBR. Inventario globale di trizio. Ottimizzazione del mantello.

#### ESERCITAZIONI

Analisi ed utilizzo di dati sperimentali sulle proprietà fisiche e meccaniche di materiali strutturali per reattori nucleari. Calcolo del fattore di resistenza termica e delle tensioni massime ammissibili (norme ASME). [4 ore]

Calcoli di attivazione neutronica. Soluzioni analitiche ed uso di codici. [6 ore]

Studio della produzione e gestione delle scorie radioattive nei reattori ITER e SEAFP, con comparazione con un LWR. [6 ore]

Calcolo della produzione e inventario di trizio in un mantello di reattore a fusione. [4 ore]

Dimensionamento termomeccanico di una barretta di combustibile. [4 ore]

BIBLIOGRAFIA. Appunti del docente.

ESAME. L'esame verte sulla discussione delle esercitazioni e sulla discussione e approfondimento di alcuni temi del corso.

## **Q5992      Termofluidodinamica negli impianti nucleari 2**

Anno: periodo 4:2    Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+2 (ore settimanali); 80+18+6 (nell'intero periodo)

Docente: Mario Malandrone

Col nuovo ordinamento si chiamerà *Termoidraulica 2*

Il corso è dedicato allo studio di modelli dei fluidi bifase, con particolare riferimento a problemi di moto e scambio termico rilevanti nel progetto termoidraulico di impianti di potenza (nucleari e non) e nei processi industriali. Vengono inoltre presentati e discussi alcuni dei metodi numerici più comunemente utilizzati nella soluzione di problemi di termofluidodinamica. Per la generalità dei temi trattati il corso può essere consigliato anche a studenti dei corsi di laurea in ingegneria meccanica e chimica.

REQUISITI. *Termoidraulica 1, Calcolo numerico.*

## PROGRAMMA

A *Termoidraulica dei fluidi bifase.**Idrodinamica dei fluidi bifase.*

Regimi di deflusso, transizioni e mappe di deflusso. [4 ore]

Moto a bolle e a tappi: tipologia di bolle singole e tappi, velocità di risalita. [2 ore]

Moto anulare: sforzo di taglio e profilo di velocità nel *film* liquido, sforzo di taglio all'interfaccia. [2 ore]

Deflusso omogeneo in condotti: conservazione della quantità di moto e calcolo del gradiente di pressione; moltiplicatori bifase. [2 ore]

Deflusso a fasi separate: equazioni di conservazione della quantità di moto e dell'energia per il calcolo del gradiente di pressione; frazione di vuoto, metodo di misura e correlazioni; misura del flusso di quantità di moto; correlazioni per il calcolo del gradiente di pressione per attrito. [5 ore]

Calcolo delle cadute di pressione in singolarità con i modelli omogeneo e a fasi separate. [3 ore]

Modello a *drift flux*, applicazione al moto a bolle e a tappi. [2 ore]

Fenomenologia del moto anulare, fenomeni di *entrainment* e *deposition*, modellizzazione del deflusso anulare in condizioni adiabatiche. [3 ore]

Deflusso in controcorrente: fenomeno di *flooding*, correlazioni ed esempi di modelli della transizione al *flooding*. [2 ore]

Fenomeni di instabilità nei deflussi bifase. [1 ora]

Fenomenologia e modelli dell'efflusso critico di miscele bifase. [2 ore]

*Scambio termico nei fluidi bifase.*

Ebollizione: tipi di ebollizione e fenomenologia. Ebollizione con fluido stagnante: processi di nucleazione, incipiente ebollizione e crescita delle bolle; scambio termico in ebollizione nucleata stagnante. [5 ore]

Crisi termica in regime di ebollizione stagnante: instabilità di strati e colonne di vapore, calcolo del flusso termico critico. [2 ore]

Ebollizione con deflusso: incipiente ebollizione, ebollizione nucleata e convettiva; calcolo del coefficiente di scambio termico. [4 ore]

Crisi termica nell'ebollizione con deflusso: fenomenologia e calcolo del flusso critico. [4 ore]

Modelli per il calcolo dello scambio termico nel deflusso anulare; cenni sull'applicazione a fasci di barre e sul deflusso non stazionario. [2 ore]

Scambio termico in regime di ultra-crisi in ebollizione stagnante e con deflusso; correlazioni empiriche; interazione liquido - vapore, cenno sui modelli teorici. [3 ore]

Ribagnamento di superficie ad alta temperatura: temperatura di Leidenfrost, fenomenologia del ribagnamento; cenni sui modelli di calcolo. [2 ore]

Condensazione: fenomenologia, calcolo della condensazione a *film* su piastre e tubi, condensazione con deflusso in condotti, cenno sull'influenza degli incondensabili. [5 ore]

B *Introduzione ai metodi numerici in termofluidodinamica.*

Richiami alle equazioni della termofluidodinamica in forma differenziale (equazioni di Navier-Stokes). [2 ore]

Analisi e soluzione di un problema modello di conduzione-convezione scalare dipendente dal tempo:

Differenze finite 1-D: schemi *upwind*; metodi di avanzamento in tempo; consistenza, stabilità, convergenza. Accuratezza in spazio e tempo. Cenno ai problemi non-lineari. [4 ore]

Differenze finite 2-D: metodo Alternating Direction Implicit. [2 ore]

Elementi finiti 1-D e 2-D: formulazione debole; metodi di Galerkin e di Petrov-Galerkin (SUPG); costruzione della matrice elementare e implementazione; confronto con le differenze finite; rassegna di risultati e problemi. [10 ore]

Volumi finiti 1-D e 2-D: formulazione conservativa; approssimazione dei flussi. [6 ore]  
Cenni ai metodi spettrali. [2 ore]

### ESERCITAZIONI

Problemi di termoidraulica bifase sui seguenti argomenti:

regimi di deflusso, frazione di vuoto e cadute di pressione di miscele bifase; elaborazione dei dati sperimentali acquisiti in laboratorio; [4 ore]

applicazione di modelli di calcolo dell'efflusso critico di miscele bifase; [2 ore]

scambio termico in regime di ebollizione stagnante; elaborazione dei dati sperimentali acquisiti in laboratorio; [4 ore]

scambio termico in regime di ebollizione con deflusso; [3 ore]

crisi termica e scambio termico in ultracrisi; [2 ore]

condensazione e calcolo di un condensatore; [3 ore]

soluzione al calcolatore (facoltativa, v. oltre) di un problema di conduzione-convezione.

### LABORATORIO

Svolgimento di esperienze relative a:

regimi di deflusso, frazione di vuoto e cadute di pressione in miscele aria-acqua; [4 ore]

scambio termico in regime di ebollizione. [2 ore]

### BIBLIOGRAFIA

P.B. Whalley, *Boiling, condensation and gas-liquid flow*, Clarendon, Oxford, 1987.

R. Peyret, T.D. Taylor, *Computational methods for fluid flow*, Springer, New York, 1985.

C. Johnson, *Numerical solutions of PD Es by the finite element method*, UP, Cambridge, 1987.

Per approfondimenti sulla termoidraulica bifase:

J.G. Collier, *Convective boiling and condensation*, Mc Graw-Hill, New York, 1981.

A.E. Bergles [et al.], *Two-phase flow and heat transfer in the power and process industries*, Hemisphere, Washington [etc.], 1981.

### ESAME

Per la parte relativa alla termoidraulica bifase l'esame viene, di norma, svolto oralmente.

Per la parte di metodi numerici è possibile scegliere fra un orale convenzionale su tutto il programma e la soluzione al calcolatore di un problema di conduzione-convezione; nel secondo caso l'esame verterà prevalentemente sulla discussione dell'elaborato.

In casi particolari verranno proposti la soluzione al calcolatore di un problema di conduzione-convezione tratto dalla termoidraulica bifase e lo studio, al calcolatore, di un circuito termoidraulico; in tali casi l'esame complessivo verterà prevalentemente sulla discussione degli elaborati relativi ai problemi proposti e alle esercitazioni di laboratorio.

## Q6010 Termodinamica del reattore

Anno: periodo 5:2 Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+2 (ore settimanali); 80+26 (nell'intero periodo)

Docente: Bruno Panella

Il corso intende approfondire il funzionamento termoidraulico dei reattori nucleari, fornendo le metodologie per affrontare problemi di scambio termico e moto dei fluidi in impianti ad alto flusso termico in cui il fluido termovettore è monofase o bifase, e trattando anche il caso di altissimi flussi termici, per applicazioni quali il carico termico sulla prima parete dei reattori a fusione. Vengono impostati i metodi statistici per i fattori di canale caldo e il margine di crisi termica. Vengono infine analizzati i modelli e le procedure di calcolo dei codici termoidraulici tenendo conto del *mixing* tra i sottocanalali aperti.

### PROGRAMMA

1. Richiami di impiantistica nucleare; circuito primario di raffreddamento; tipologie geometriche dei sottocanalali; confronto dei parametri termoidraulici dei noccioli: potenza specifica, densità di potenza, flusso termico, potenza lineare; scelta dei parametri in relazione ai margini di sicurezza ed evoluzione del progetto; scelta di fluido refrigerante, salto entalpico, portata, pressione. [6 ore]
2. Metodologia del progetto a seconda della tipologia di impianto; interazione tra i principali sottoprogetti: neutronico, termoidraulico, meccanico, dei materiali; progetto della geometria della cella, dell'arricchimento e del *burnup* sulla base di criteri neutronici, termici ed economici; diagramma a blocchi del progetto del nocciolo di un reattore veloce; progetto termico del nocciolo; limiti del progetto termico della barretta di combustibile per reattori ad acqua, a metallo liquido e a gas; comportamento del combustibile e meccanismi di guasto della barretta. [8 ore]
3. Generazione di potenza nel nocciolo; distribuzione di potenza in un reattore nudo, omogeneo, ed effetto delle barre di controllo, delle intercapedini, dell'arricchimento, della depressione del flusso, del ricambio di combustibile; fattori di forma e di canale caldo; sottofattori ingegneristici per il flusso termico, per il salto entalpico e per i salti di temperatura; distribuzione assiale a coseno e piccata; effetto dei fattori di canale caldo sul salto entalpico; portata di *bypass*; progetto preliminare del nocciolo di un LWR; orifiziatura; crisi termica e scelta della portata. [8 ore]
4. Calcolo termoidraulico del nocciolo di un PWR a inizio e a fine vita; calcolo del canale caldo; profili di temperatura del refrigerante, della parete della barretta, della guaina, della pastiglia, di centro barra; integrale di conducibilità, fattore di depressione del flusso; ebollizione sulla parete; correlazione di Jens-Lottes; modello di Bowring e altre correlazioni del codice termoidraulico THINC per la regione di non equilibrio termodinamico; resistenza termica del *gap* tra pastiglia e guaina; impostazione teorica e correlazioni usate; calcolo spessore del *gap* a caldo; calcolo della pressione nella barretta a fine vita; effetto dell'ossido e delle incrostazioni sul campo termico; calcolo delle cadute di pressione nel nocciolo. [14 ore]
5. Calcolo termoidraulico del nocciolo di un BWR: distribuzione di portata tra i canali, potenza e portata attiva; calcolo del titolo in ebollizione sottoraffreddata e satura; calcolo delle cadute di pressione monofase e bifase nel canale e nelle griglie; correlazioni del codice ISCOR. [6 ore]
6. Crisi termica: definizioni e interpretazioni fenomenologiche; modelli e correlazioni in *pool boiling*; meccanismi di crisi in convezione forzata ed effetto dei principali

parametri termoidraulici; effetto della distribuzione del flusso; modelli del DNB e correlazioni; modelli del *dryout* e correlazioni; correlazioni di progetto per PWR: W3, fattore di Tong, fattore di griglia; correlazioni per bassissime portate e in transitorio; correlazioni di progetto per BWR: Hench Levy, CISE, GEXL; crisi termica limitata dal *flooding*; asportazione di altissimi flussi termici nel divertore dei reattori a fusione; meccanismi fisici, modelli e confronto con dati sperimentali. [22 ore]

7. Metodi statistici applicati alle tecnologie nucleari: determinazione dei fattori di canale caldo ingegneristici; valutazione statistica del margine di crisi termica. [4 ore]

8. Mescolamento tra canali aperti adiacenti: meccanismi fisici; equazioni di conservazione secondo i codici COBRA e THINC; parametro di *mixing* turbolento e correlazioni; *mixing* bifase: modelli e correlazioni del codice MIXER; procedure di calcolo e tecniche numeriche dei codici termoidraulici a canali aperti. [10 ore]

9. Illustrazione dello schema di calcolo termoidraulico del canale caldo di un reattore ad acqua. [2 ore]

#### ESERCITAZIONI

Calcolo termoidraulico del sottocanale caldo del nocciolo di un LWR.

Calcolo di scambiatori di calore e di un generatore di vapore di reattori veloci.

Calcolo idraulico di reti complesse di tubazioni.

#### BIBLIOGRAFIA

Appunti del docente.

N.E. Todreas, M.S.Kazimi, *Nuclear systems. Vol. I, II*, Hemisphere, 1990.

R.T. Lahey, F.J. Moody, *The thermal-hydraulics of a boiling water reactor*, American Nuclear Society, New York, 1977.

L.S. Tong, J.Weisman, *Thermal analysis of pressurized water reactors*, American Nuclear Society, La Grange Park, 1979.

B. Panella, *Reattori nucleari ad acqua leggera*, CELID, Torino, 1981.

Yu S.Tang [et al.], *Thermal analysis of liquid metal fast breeder reactors*, American Nuclear Society, La Grange Park, 1978.

G. Melese, R. Katz, *Thermal and flow design of helium-cooled reactors*, American Nuclear Society, La Grange Park, 1984.

ESAME. La valutazione si basa sull'esame orale alla fine del corso e sulle esercitazioni svolte durante l'anno.

## Q6050 Trasporto di particelle e di radiazioni

Anno: periodo 5:2

Docente: Franco Porcelli

Lo studio della dinamica di sistemi a molti corpi, come i fluidi, i plasmi etc., richiede in linea di principio la soluzione di un gran numero di equazioni nonlineari accoppiate. L'impiego di metodi statistici permette di derivare modelli semplificati, che dipendono da un numero ridotto di parametri, e che descrivono correttamente la fisica di determinati fenomeni d'interesse.

Questo corso ha due obiettivi. Il primo è quello di introdurre gli studenti ai metodi ed ai concetti della fisica cinetica. Lo studente imparerà a riconoscere le scale spaziali e temporali caratteristiche di diversi processi fisici e a derivare modelli semplificati per la loro descrizione. Il secondo obiettivo è quello di discutere una serie di problemi, che vanno da fenomeni di trasporto nei gas neutri, il trasporto dei neutroni nei reattori a fissione, la propagazione e lo smorzamento di onde elettromagnetiche nei plasmi, e la fisica delle scariche elettriche nei gas.

### PROGRAMMA

*Equazione di Boltzmann per i gas.* [24 ore]

Teorema H. Distribuzione di Maxwell-Boltzmann. Momenti e leggi di conservazione. Sviluppo di Chapman-Enskog.

*Calcolo delle probabilità ed elementi di meccanica statistica.* [10 ore]

Fluttuazioni. *Random walk*. Spazio delle fasi ed equazione di Liouville. Entropia. Equilibrio termodinamico. Distribuzione di Maxwell-Boltzmann come distribuzione più probabile. Distribuzione di Gibbs.

*Equazione del trasporto per i neutroni.* [8 ore]

Equazione del trasporto lineare. Modello monocinetico. Soluzioni analitiche.

*Collisioni nei plasmi.* [6 ore]

Lunghezza di Debye. Collisioni coulombiane nei plasmi. Radiazione di frenamento.

*Equazioni cinetiche per i plasmi.* [14 ore]

Il parametro di plasma (numero di particelle in una sfera di Debye). Equazione di Klimontovich-Dupré. Catena di Bogolyubov-Born-Green-Kirkwood-Yvon. Equazione di Vlasov. Funzioni di correlazione. Integrale collisionale. Equazione di Fokker-Planck. Limite di Landau.

*Leggi di conservazione nei plasmi.* [10 ore]

Momenti dell'equazione di Fokker-Planck. Modelli fluidi.

*Onde nei plasmi.* [14 ore]

Approssimazione fluida. Tensore dielettrico. Teoria di Vlasov. Smorzamento di Landau.

Verranno inoltre discusse alcune delle seguenti applicazioni, a secondo degli interessi degli studenti:

*Esempi di instabilità nei plasmi.* [8 ore]

*Two-stream instability.* Onde di deriva ed instabilità universale. *Gentle-bump instability.* *Loss-cone instability.*

*Rallentamento dei prodotti di fusione nei plasmi.* [8 ore]

Teoria di Fokker-Planck. Limite di alta energia. Metodo delle caratteristiche. Tempi di rilassamento.

*Cenni a fenomeni di trasporto collisionale nei plasmi.* [8 ore]

*Scariche elettriche nei gas ionizzati.* [8 ore]

Guaine elettrostatiche. Condizioni al contorno. Quasineutralità ed il criterio di Bohm.

#### BIBLIOGRAFIA

K. Huang, *Statistical mechanics*, Wiley, New York, 1979.

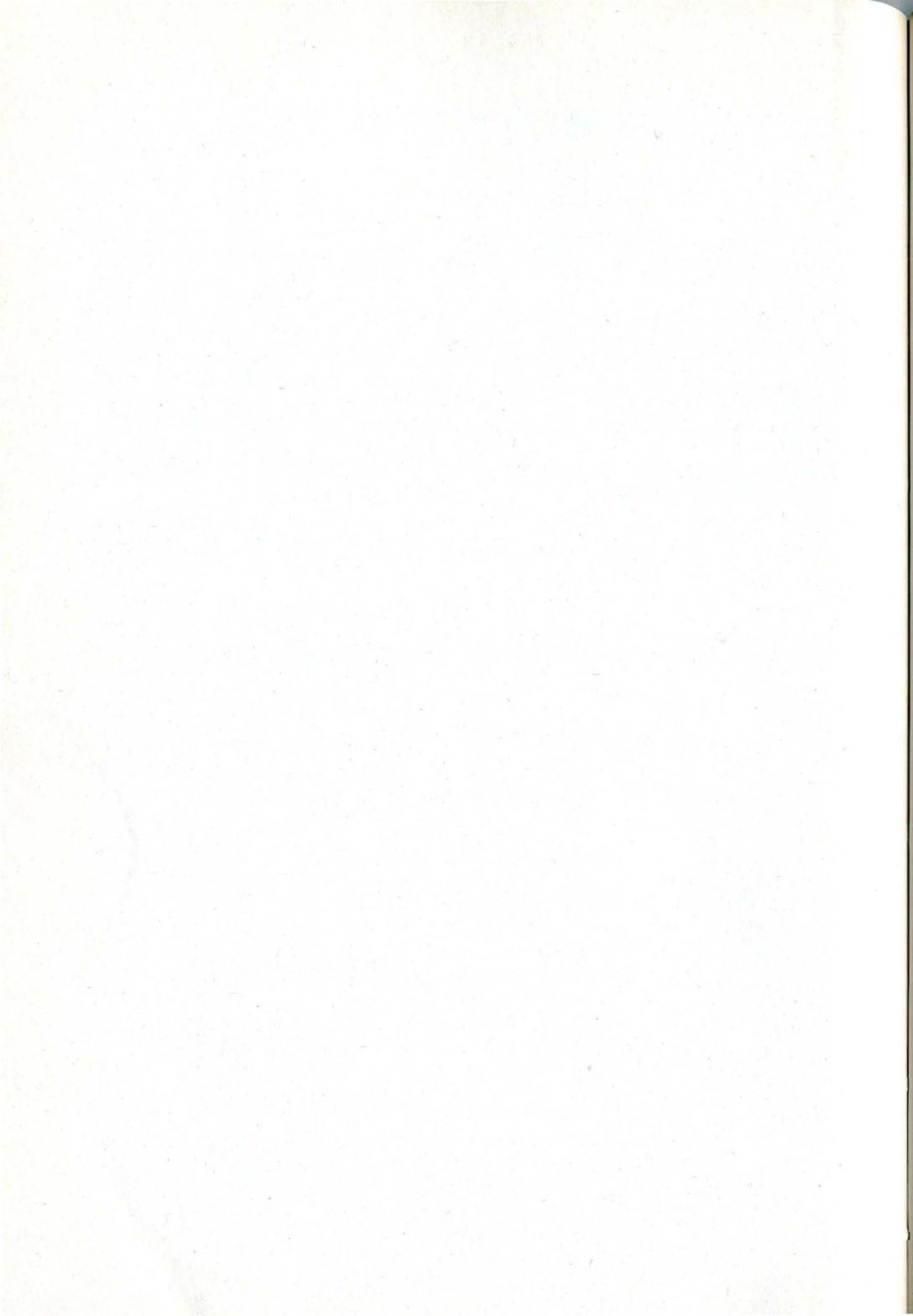
D.R. Nicholson, *Introduction to plasma theory*, Dover, New York, 1993.

F.F. Chen, *Introduction to plasma physics*, 2nd ed., Plenum, New York, 1974.

G. Schmidt, *Physics of high temperature plasmas*, 2nd ed., Academic Press, New York, 1979.

N.A. Krall, A.W. Trivelpiece, *Principles of plasma physics*, San Francisco Press, 1986.

ESAME. Esame scritto (discussione di due temi trattati nel corso), seguito da discussione orale sugli stessi temi.



# Tavola alfabetica dei docenti

Docente (*dipartimento*) // codice : *corso* [anno:periodo] // modalità di contatto con gli studenti

---

Prof. Franco **Algostino** (*Ing. strutturale*)

p. 37 Q4600 : *Scienza delle costruzioni* [3:1]

TEL 564'4848. Orario di ricevimento: tutti i giorni lavorativi, 9-12.

Prof. Giuseppe **Amongero** (*Ing. automatica e informatica*)

p. 29 Q2170 : *Fondamenti di informatica* [2:1]

TEL 564'7069.

Prof. Margherita **Appendino Montorsi** (*Scienza dei materiali e ing. chimica*)

p. 33 Q4670 : *Scienza e tecnologia dei materiali nucleari* [2:2]

TEL 564'4662. Orario di ricevimento: mercoledì 9-12.

Prof. Edoardo **Barbisis** (*Ing. elettrica industriale*)

p. 42 Q1790 : *Elettrotecnica* [3:2]

Prof. Carla **Buzano** (*Fisica*)

p. 73 L3050 : *Istituzioni di meccanica quantistica* [x:1]

TEL 564'7332, EM buzano@polito.it. Orario di ricevimento: martedì 10:30-12:30.

Prof. Paolo **Campanaro** (*Energetica*)

p. 53 Q3110 : *Macchine* [4:2]

Prof. Gianni **Coppa** (*Energetica*)

p. 78 Q3470 : *Metodi matematici per i reattori nucleari* [5:1]

Prof. Graziano **Curti** (*Ing. meccanica*)

p. 54 Q0940 : *Costruzione di macchine* [4:2]

80 Q4240 : *Progetti e costruzioni nucleari* [4,5:2]

Orario di ricevimento: lunedì, venerdì 10:30-12:30. (F. Raffa: mercoledì 8:30-10:30).

Prof. Riccardo **D'Auria** (*Fisica*)

p. 19 Q1901 : *Fisica I* [1:2]

Prof. Mario **De Salve** (*Energetica*)

p. 62 Q1290 : *Dinamica e controllo degli impianti nucleari* [5:2]

92 Q5680 : *Tecnologie e applicazioni nucleari* [5:1]

Docente (dipartimento) // codice : corso [anno:periodo] // modalità di contatto con gli studenti

Prof. **Giovanni Del Tin** (Energetica)

- p. 70 Q2772 : *Impianti nucleari 2* [5:1]  
86 Q4740 : *Sicurezza e analisi di rischio* [4:2]

Prof. **Pier Paolo Delsanto** (Fisica)

- p. 57 Q0010 : *Acceleratori di particelle* [5:1]

Prof. **Giovanni Fiorio** (Ing. automatica e informatica)

- p. 59 N0841 : *Controlli automatici (generale)* [x:1]

TEL 564'7011, EM fiorio@polito.it. Orario di ricevimento: venerdì 10:30-12:30.

Prof. **Donato Firrao** (Scienza dei materiali e ing. chimica)

- p. 90 P5584 : *Tecnologia dei materiali metallici* [x:2]

TEL 564'4675. Orario di ricevimento: tutti i pomeriggi.

Prof. **Dina Giublesi** (Matematica)

- p. 13 Q0231 : *Analisi matematica I* [1:1]

TEL 564'7525, FAX 564'7599. Orario di ricevimento: consultare la bacheca del Dipartimento.

Prof. **Luigi Gonella** (Fisica)

- p. 81 Q4410 : *Protezione e sicurezza negli impianti nucleari* [5:1]  
88 Q5310 : *Strumentazione fisica* [4:2]

TEL 564'7337. Orario di ricevimento: martedì 14:30-16:30.

Prof. **Paolo Gregorio** (Energetica)

- p. 40 Q5950 : *Termodinamica applicata* [3:1]

Prof. **Antonio Iannibello** (Scienza dei materiali e ing. chimica)

- p. 15 Q0620 : *Chimica* [1:1]

Orario di ricevimento: mercoledì 14-16.

Prof. **Giovanni Jacazio** (Ing. meccanica)

- p. 45 Q3210 : *Meccanica applicata alle macchine* [3:2]

Prof. **Evasio Lavagno** (Energetica)

- p. 64 Q1830 : *Energetica e sistemi nucleari* [4:2]  
74 Q3090 : *Localizzazione dei sistemi energetici* [5:1]

Prof. **Mario Malandrone** (Energetica)

- p. 51 Q5991 : *Termofluidodinamica negli impianti nucleari 1* [4:1]  
95 Q5992 : *Termofluidodinamica negli impianti nucleari 2* [4:2]

TEL 564'4439. (R. Zanino: TEL 564'4490. C. Bertani: TEL 564'4447).

Docente (*dipartimento*) // codice : *corso* [anno:periodo] // modalità di contatto con gli studenti

---

Prof. **Maria Mascarello** (*Matematica*)

p. 23 Q0232 : *Analisi matematica 2* [2:1]

Modalità di contatto con il docente:

a) frequentare le lezioni e le esercitazioni;

b) consultare l'orario di ricevimento del docente e di eventuali collaboratori (affisso presso la segreteria del Dipartimento di Matematica).

Prof. **Carla Massaza** (*Matematica*)

p. 17 Q2300 : *Geometria* [1:2]

TEL 564'7524, FAX 564'7599. Orario di ricevimento: un'ora settimanale, secondo l'orario esposto nella bacheca del Dipartimento.

Prof. **Enrica Mezzetti** (*Fisica*)

p. 25 Q1902 : *Fisica 2* [2:1]

Prof. **Bruno Minetti** (*Fisica*)

p. 83 Q4434 : *Radioattività* [5:2]

TEL 564'7317,7349, EM minetti@polito.it.

Prof. **Giovanni Monegato** (*Matematica*)

p. 36 Q0514 : *Calcolo numerico* [2:2]

TEL 564'7517, EM monegato@polito.it. Orario di ricevimento: mercoledì, venerdì 10:30-12.

Prof. **Bruno Panella** (*Energetica*)

p. 49 Q2775 : *Impianti nucleari + Ingegneria dei reattori nucleari a fusione* [4:1]

98 Q6010 : *Termotecnica del reattore* [5:2]

Prof. **Aldo Pasquarelli** (*Fisica*)

p. 55 Q5270 : *Strumentazione e misure per gli impianti nucleari* [5:1]

Prof. **Franco Piazzese** (*Fisica*)

p. 32 Q3204 : *Meccanica analitica* [2:2]

Prof. **Bruno Piombo** (*Ing. meccanica*)

p. 76 P3360 : *Meccanica delle vibrazioni* [x:1]

Prof. **Giovanni Podda** (*Sistemi di produzione ed economia dell'azienda*)

p. 21 Q1430 : *Disegno tecnico industriale* [1:2]

TEL 564'7239. Orario di ricevimento: lunedì, martedì 16:30-18:30.

Docente (*dipartimento*) // codice : *corso* [anno:periodo] // modalità di contatto con gli studenti

---

Prof. **Franco Porcelli** (*Energetica*)

- p. 67 Q2024 : *Fisica e ingegneria dei plasmi* [5:2]  
100 Q6050 : *Trasporto di particelle e di radiazioni* [5:2]

Prof. **Piero Quarati** (*Fisica*)

- p. 39 Q2040 : *Fisica nucleare* [3:1]

Prof. **Mario Rasetti** (*Fisica*)

- p. 77 Q3390 : *Meccanica statistica* [5:1]  
89 Q5404 : *Superconduttività* [5:2]

Prof. **Guido Rizzi** (*Fisica*)

- p. 68 Q2030 : *Fisica matematica* [4:2]

Prof. **Giorgio Scavino** (*Scienza dei materiali e ing. chimica*)

- p. 90 P5584 : *Tecnologia dei materiali metallici* [x:2]  
TEL 564'4675. Orario di ricevimento: tutti i pomeriggi.

Prof. **Alberto Tagliaferro** (*Fisica*)

- p. 65 L2000 : *Fisica dello stato solido* [x:2]  
TEL 564'7347, EM ataglia@polito.it. Orario di ricevimento: martedì e giovedì, 13:30-15:30.

Prof. **Armando Tuberga** (*Energetica*)

- p. 60 P1165 : *Criogenia + Tecnica del freddo* [x:1]  
TEL 564'4435. Orario di ricevimento: due ore settimanali.

Prof. **Maurizio Vallauri** (*Ing. automatica e informatica*)

- p. 47 Q1710 : *Elettronica applicata* [4:1]  
TEL 564'7028. Orario di ricevimento: affisso sulla porta dell'ufficio presso il Dipartimento. Di regola: lunedì 8:30-10:30, in altri giorni previo appuntamento.

Prof. **Roberto Zanino** (*Energetica*)

- p. 49 Q2775 : *Impianti nucleari + Ingegneria dei reattori nucleari a fusione* [4:1]  
72 Q2934 : *Ingegneria dei reattori nucleari a fusione 2* [5:2]

Prof. **Massimo Zucchetti** (*Energetica*)

- p. 81 Q4410 : *Protezione e sicurezza negli impianti nucleari* [5:1]  
TEL 564'4464.

## Tavola alfabetica degli insegnamenti

<i>p.</i>	<i>codice</i>	<i>corso [anno:periodo] // docenti</i>
57	Q 001 0	Acceleratori di particelle [5:1] Prof. Pier Paolo Delsanto
13	Q 023 1	Analisi matematica 1 [1:1] Prof. Dina Giublesi
23	Q 023 2	Analisi matematica 2 [2:1] Prof. Maria Mascarello
36	Q 051 4	Calcolo numerico (ridotto) [2:2] Prof. Giovanni Monegato
15	Q 062 0	Chimica [1:1] Prof. Antonio Iannibello
59	N 084 1	Controlli automatici (generale) [x:1] Prof. Giovanni Fiorio
54	Q 094 0	Costruzione di macchine [4:2] Prof. Graziano Curti
60	P 116 5	Criogenia + Tecnica del freddo (integrato) [x:1] Prof. Armando Tuberga
62	Q 129 0	Dinamica e controllo degli impianti nucleari [5:2] Prof. Mario De Salve
21	Q 143 0	Disegno tecnico industriale [1:2] Prof. Giovanni Podda
47	Q 171 0	Elettronica applicata [4:1] Prof. Maurizio Vallauri
42	Q 179 0	Elettrotecnica [3:2] Prof. Edoardo Barbisio
64	Q 183 0	Energetica e sistemi nucleari [4:2] Prof. Evasio Lavagno
19	Q 190 1	Fisica 1 [1:2] Prof. Riccardo D'Auria
25	Q 190 2	Fisica 2 [2:1] Prof. Enrica Mezzetti
46	Q 196 5	Fisica dei reattori a fissione + Fisica dei reattori a fusione (integr.) [3:2]
65	L 200 0	Fisica dello stato solido [x:2] Prof. Alberto Tagliaferro
67	Q 202 4	Fisica e ingegneria dei plasmi (ridotto) [5:2] Prof. Franco Porcelli
68	Q 203 0	Fisica matematica [4:2] Prof. Guido Rizzi
39	Q 204 0	Fisica nucleare [3:1] Prof. Piero Quarati

<i>p.</i>	<i>codice</i>	<i>corso [anno:periodo] // docenti</i>
29	Q 217 0	Fondamenti di informatica [2:1] Prof. Giuseppe Amongero
17	Q 230 0	Geometria [1:2] Prof. Carla Massaza
49	Q 277 5	Impianti nucleari + Ingegneria dei reattori nucleari a fusione (int.) [4:1] Prof. Bruno Panella, Roberto Zanino
70	Q 277 2	Impianti nucleari 2 [5:1] Prof. Giovanni Del Tin
72	Q 293 4	Ingegneria dei reattori nucleari a fusione 2 (ridotto) [5:2] Prof. Roberto Zanino
(56)	Q 304 0	Istituzioni di economia [5:2]
73	L 305 0	Istituzioni di meccanica quantistica [x:1] Prof. Carla Buzano
74	Q 309 0	Localizzazione dei sistemi energetici [5:1] Prof. Evasio Lavagno
53	Q 311 0	Macchine [4:2] Prof. Paolo Campanaro
32	Q 320 4	Meccanica analitica (ridotto) [2:2] Prof. Franco Piazzese
45	Q 321 0	Meccanica applicata alle macchine [3:2] Prof. Giovanni Jacazio
76	P 336 0	Meccanica delle vibrazioni [x:1] Prof. Bruno Piombo
77	Q 339 0	Meccanica statistica [5:1] Prof. Mario Rasetti
78	Q 347 0	Metodi matematici per i reattori nucleari [5:1] Prof. Gianni Coppa
31	Q 348 0	Metodi matematici per l'ingegneria [2:2]
80	Q 424 0	Progetti e costruzioni nucleari [4,5:2] Prof. Graziano Curti
81	Q 441 0	Protezione e sicurezza negli impianti nucleari [5:1] Prof. Luigi Gonella, Massimo Zucchetti
83	Q 443 4	Radioattività (ridotto) [5:2] Prof. Bruno Minetti
84	Q 446 0	Reattori nucleari avanzati [5:1]
37	Q 460 0	Scienza delle costruzioni [3:1] Prof. Franco Algotino
33	Q 467 0	Scienza e tecnologia dei materiali nucleari [2:2] Prof. Margherita Appendino Montorsi
86	Q 474 0	Sicurezza e analisi di rischio [4,5:2] Prof. Giovanni Del Tin

---

<i>p.</i>	<i>codice</i>	<i>corso [anno:periodo] // docenti</i>
55	Q 527 0	Strumentazione e misure per gli impianti nucleari [5:1] Prof. Aldo Pasquarelli
88	Q 531 0	Strumentazione fisica [4:2] Prof. Luigi Gonella
89	Q 540 4	Superconduttività (ridotto) [5:2] Prof. Mario Rasetti
90	P 558 4	Tecnologia dei materiali metallici (ridotto) [x:2] Prof. Donato Firrao, Giorgio Scavino
92	Q 568 0	Tecnologie e applicazioni nucleari [5:1] Prof. Mario De Salve
40	Q 595 0	Termodinamica applicata [3:1] Prof. Paolo Gregorio
51	Q 599 1	Termofluidodinamica negli impianti nucleari 1 [4:1] Prof. Mario Malandrone
95	Q 599 2	Termofluidodinamica negli impianti nucleari 2 [4:2] Prof. Mario Malandrone
98	Q 601 0	Termotecnica del reattore [5:2] Prof. Bruno Panella
100	Q 605 0	Trasporto di particelle e di radiazioni [5:2] Prof. Franco Porcelli