

# guide ai programmi dei corsi 1997/98



## **INGEGNERIA NUCLEARE**

**POLITECNICO  
DI TORINO**

Le Guide sono predisposte sulla base dei testi forniti dai Consigli di settore e di corso di laurea.

### **I Facoltà di ingegneria**

*Preside:* prof. Pietro Appendino

#### *Corso di laurea*

Ingegneria aerospaziale  
 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

Edito a cura del SERVIZIO STUDENTI

Politecnico di Torino

Corso Duca degli Abruzzi 24 - 10129 Torino - Tel. 564.6250

Stampato dalla AGIT - Beinasco (To) nel mese di giugno 1997

## SOMMARIO

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA NUCLEARE	7
PROGRAMMI DEGLI INSEGNAMENTI OBBLIGATORI	17
PROGRAMMI DEGLI INSEGNAMENTI D'ORIENTAMENTO	75
PROGRAMMI DELLE DISCIPLINE DELLE SCIENZE UMANISTICHE	119
INDICE ALFABETICO PER INSEGNAMENTO	131

### 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 1997/98 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. Un'altra novità introdotta già 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.

Ogni Consiglio di corso di laurea può 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 nella Guida dello Studente-*Manifesto degli Studi*.

## 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 ha previsto 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").

<sup>1</sup> Decreto Ministeriale del 22.05.1995, pubblicato sulla *Gazzetta ufficiale* n. 166 del 18.07.1995.

<sup>2</sup> Pubblicato sulla *Gazzetta ufficiale* n. 186 del 10.08.1989.

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

## Tesi di laurea

La tesi di laurea consiste nello svolgimento, sotto guida di un professore ufficiale, di un progetto o di uno studio di carattere tecnico o scientifico.

Gli allievi che hanno deciso di optare per tale tesi devono farne domanda al Presidente del Consiglio di corso di laurea con modulo giallo in distribuzione presso la Segreteria Didattica Unificata Area-Sud indicando l'argomento e consegnarla alla medesima Segreteria almeno sei mesi prima dell'esame ed entro le date sotto riportate:

SESSIONE DI LAUREA		SCADENZA FOGLIO GIALLO			
1° Sessione 97/98	turno unico	febbraio	1998	29 agosto	1997
2° Sessione 97/98	1° turno	maggio	1998	14 novembre	1997
	2° turno	luglio	1998	16 gennaio	1998
3° Sessione 97/98	1° turno	ottobre	1998	17 aprile	1998
	2° turno	dicembre	1998	12 giugno	1998

Alla domanda di ammissione agli esami di laurea, da presentare in Segreteria Generale Studenti, devono inoltre, allegare il foglio bianco, in distribuzione presso la suddetta Segreteria, con l'indicazione dell'argomento della tesi svolta, controfirmato dal relatore.

Inoltre coloro che hanno consegnato il modulo giallo alla Segreteria Didattica Unificata, dovranno, prima della consegna della domanda di laurea alla Segreteria Didattica Generale Studenti, fare apporre sul foglio bianco della suddetta Segreteria Didattica Unificata, un visto attestante il regolare deposito, nei termini previsti, del modulo giallo.

Una copia della tesi firmata dal relatore, deve essere consegnata alla Segreteria Generale Studenti alcuni giorni prima dell'inizio della sessione di laurea e comunque non oltre la data riportata sulla Guida dello studente - Manifesto agli studi 1997-98; una copia firmata deve essere consegnata al Presidente del Consiglio del corso di laurea; una copia deve essere portata dal laureando alla seduta di laurea.

Tesi e sintesi devono essere redatte in fogli di formato UNI A4.

## **Corso di laurea in Ingegneria nucleare**

### **Profilo professionale**

La laurea in Ingegneria nucleare è stata istituita con riferimento diretto alle applicazioni industriali e alla ricerca scientifica applicata dei processi nucleari, e in particolare alla produzione di energia ottenuta con reazioni nucleari di fissione o di fusione, nonché alle applicazioni delle radiazioni al settore biomedico e diagnostico industriale. I complessi fenomeni fisici legati alle reazioni nucleari richiedono sistemi avanzati dal punto di vista ingegneristico per essere sfruttati in modo sicuro ed economicamente competitivo. Pertanto, la formazione dell'ingegnere nucleare richiede la conoscenza approfondita di numerose discipline, dalla matematica, dalla fisica e dalla scienza dei materiali, alla neutronica, alla termoidraulica e termomeccanica, alla progettazione di componenti e impianti, alla sicurezza e affidabilità di sistemi complessi.

Nell'ambito del settore industriale a cui appartiene, il Corso di laurea in Ingegneria nucleare si caratterizza quindi 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 e di obiettivi: si pensi ai complessi problemi fisici e ingegneristici dei reattori a fusione e dei reattori nucleari a fissione a maggiore sicurezza, sui quali viene svolta un'intensa attività di ricerca a livello internazionale. Si richiede perciò all'ingegnere nucleare anche una buona propensione alla ricerca e allo sviluppo di soluzioni innovative.

Nel bagaglio culturale tecnico dell'ingegnere nucleare devono rientrare metodologie e strumenti forniti dalla fisica (nucleare, dei reattori nucleari, e dei plasmi) dalla termofluidodinamica (monofase e bifase), dall'impiantistica dei componenti e dei sistemi e dalle tecnologie nucleari. Sono inoltre trattate le problematiche connesse con la valutazione dell'impatto ambientale dei sistemi per la produzione di energia. Data l'importanza dell'affidabilità e della sicurezza nelle applicazioni nucleari, viene data particolare rilevanza alle tecniche di analisi affidabilistica e di valutazione del rischio. Inoltre, tecniche e metodologie sviluppate nell'ambito dell'ingegneria nucleare sono frequentemente utilizzate in altri settori dell'ingegneria: a titolo di esempio si possono citare le tecniche computazionali sofisticate, l'ingegneria delle radiazioni e degli acceleratori di particelle, i plasmi tecnologici, l'analisi fenomenologica e probabilistica di impianti caratterizzati da rischi rilevanti, la localizzazione degli impianti e la valutazione di impatto ambientale, il progetto termoidraulico e termomeccanico di componenti soggetti a svariate tipologie di sforzo, la garanzia della qualità.

Il profilo professionale dell'ingegnere nucleare è 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 viene svolta attività di ricerca applicata.

Piano ufficiale degli studi

Il piano ufficiale degli studi per gli studenti di ingegneria nucleare prevede 29 annualità, di cui 24 obbligatorie e 5 di orientamento. Esse comprendono gli insegnamenti comuni a tutti i corsi di laurea in ingegneria, quelli specifici del settore industriale, quelli caratterizzanti a livello nazionale il Corso di laurea in Ingegneria nucleare e, infine, gli insegnamenti di orientamento.

## Insegnamenti obbligatori

Poichè la formazione matematica deve essere sufficientemente approfondita, agli strumenti matematici, necessari ad ogni ingegnere, forniti negli insegnamenti di *Analisi matematica 1 e 2* 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 5 insegnamenti corrispondenti a 4,5 annualità. 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 (*Fisica 1 e 2* e *Fisica Nucleare*) forniscono, oltre alle basi generali per la comprensione dei fenomeni della fisica classica, nozioni di struttura della materia, di meccanica quantistica e di fisica nucleare, con elementi di fisica dello stato condensato e dei plasmi, per un totale di tre annualità. Due insegnamenti trattano i fondamenti generali della *Chimica* e le applicazioni di *Scienza e tecnologia dei materiali nucleari*, per un totale di ulteriori due annualità. 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 annualità).

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 elementi di macchine elettriche, dell'*Elettronica applicata* e della *Termodinamica applicata*, per un totale di cinque annualità. 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 quattro annualità.

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 annualità.

Il corso di fisica dei reattori 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 ai reattori nucleari, 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. 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 conoscenza della fluidodinamica e della termocinetica, fornendo le metodologie e gli strumenti di calcolo della meccanica dei fluidi e della trasmissione del calore.

Il quadro didattico degli insegnamenti obbligatori comprende quindi discipline rapportabili a 27 insegnamenti, raggruppate in 24 annualità, come è mostrato nella tabella riassuntiva seguente.

<p>03000 Fisica dei reattori a fissione</p> <p>03010 Fisica dei reattori a fusione</p> <p>03020 Impianti nucleari</p> <p>03030 Strumentazione e misure per gli impianti nucleari</p> <p>03040 Termofluidodinamica degli impianti nucleari I</p>	<p>03050 Impianti nucleari II</p> <p>03060 Strumentazione e misure per gli impianti nucleari II</p> <p>03070 Termofluidodinamica degli impianti nucleari II</p>
<p>03080 Impianti nucleari III</p> <p>03090 Strumentazione e misure per gli impianti nucleari III</p> <p>03100 Termofluidodinamica degli impianti nucleari III</p>	<p>03110 Impianti nucleari IV</p> <p>03120 Strumentazione e misure per gli impianti nucleari IV</p> <p>03130 Termofluidodinamica degli impianti nucleari IV</p>

## Quadro didattico degli insegnamenti obbligatori

### Corso di Laurea in Ingegneria Nucleare

Anno	1° periodo didattico	2° periodo didattico
1	<b>Q0231</b> Analisi matematica I <b>Q0620</b> Chimica	<b>Q2300</b> Geometria <b>Q1901</b> Fisica generale I <b>Q2170</b> Fondamenti di informatica
2	<b>Q0232</b> Analisi matematica II <b>Q1902</b> Fisica generale II <b>Q1430</b> Disegno tecnico industriale*	<b>Q3480</b> Metodi matematici per l'ingegneria <b>Q3204</b> Meccanica analitica (r) <b>Q4670</b> Scienza e tecnologia dei materiali nucleari <b>Q0514</b> Calcolo numerico (r)
3	<b>Q4600</b> Scienza delle costruzioni <b>Q2040</b> Fisica nucleare <b>Q5950</b> Termodinamica applicata	<b>Q1790</b> Elettrotecnica <b>Q3210</b> Meccanica applicata alle macchine <b>Q1965</b> Fisica dei reattori a fissione/Fisica dei reattori a fusione (i)
4	<b>Q7210</b> Elettronica industriale <b>Q2775</b> Impianti nucleari / Ingegneria dei reattori nucleari a fusione I (i) <b>QA552</b> Termoidraulica I	<b>Q3110</b> Macchine <b>Q0940</b> Costruzione di macchine <b>Y (1)</b> <b>Y (2)</b>
5	<b>Q8390</b> Misure e strumentazione nucleari <b>Y (3)</b> <b>Y (4)</b> <b>Y (5)</b>	<b>Q3040</b> Istituzioni di economia <b>Y (6)</b> <b>Y (7)</b> <b>Y (8)</b>

(i) Corso Integrato.

(r) Corso Ridotto.

\* Non attivato per l'a.a. 1997/98

## Professionalità e orientamenti

I corsi previsti negli orientamenti in cui si articola il corso di laurea in Ingegneria nucleare (*Fisica dei reattori e controllo, Fisico-strumentale, Impiantistico, Energetico*) approfondiscono le principali problematiche delle aree culturali di maggiore importanza del settore e rispondono alla esigenze di professionalità richieste.

### *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 a una attività di ricerca e alla progettazione nel campo della neutronica, della dinamica e controllo degli impianti nucleari, della fisica dei plasmi e dell'analisi di sicurezza.

A tale scopo, sono previsti corsi che trattano sia gli aspetti fisici che le applicazioni ingegneristiche della teoria. Altri approfondiscono invece i metodi matematici e di calcolo necessari.

Inoltre, vengono 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 della teoria 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*);

Sono inoltre svolte, in corsi a scelta, tematiche volte a:

- 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*).

L'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 a 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 nucleare 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 caratterizzato da corsi rivolti a:

- l'approfondimento della preparazione fisico-matematica con argomenti non trattati nei corsi di base (*Fisica matematica, Meccanica statistica*);
- l'utilizzazione della strumentazione basata sulle tecniche della fisica sperimentale (*Strumentazione fisica*);
- lo studio di macchine acceleratrici sia dal punto di vista costruttivo che applicativo (*Acceleratori di particelle*).

Sono inoltre svolte, in corsi a scelta, tematiche inerenti:

- l'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*);
- l'approfondimento della fisica e della tecnologia dei materiali utilizzati negli impianti nucleari (*Tecnologie e applicazioni nucleari, Radioattività + Superconduttività*).
- l'approfondimento della 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.

### ***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 sistemi e componenti degli impianti vengono analizzati dal punto di vista funzionale, termomeccanico e dell'affidabilità, in condizioni di esercizio e di incidente.

L'orientamento è caratterizzato da corsi rivolti a:

- l'analisi dei fenomeni termofluidodinamici in regime multifase (*Termofluidodinamica degli impianti nucleari 2*);
- la progettazione termoidraulica di componenti e sistemi attinenti all'impiantistica nucleare (*Termotecnica del reattore*);
- l'analisi di sicurezza degli impianti nucleari a fissione e fusione con metodologie deterministiche e probabilistiche (*Impianti nucleari 2*);
- l'approfondimento delle problematiche del ciclo del combustibile e delle tecnologie dei materiali per la fissione e la fusione (*Tecnologie ed applicazioni nucleari*).

Sono inoltre svolte, in corsi a scelta, tematiche inerenti:

- l'approfondimento della fisica e dell'ingegneria dei reattori nucleari a fusione (*Fisica e ingegneria dei plasmi + Ingegneria di reattori a fusione 2*);
- il calcolo strutturale di componenti soggetti a sforzi meccanici e termici (*Progetti e costruzioni nucleari*);
- l'analisi delle problematiche di radioprotezione e la progettazione delle relative salvaguardie (*Protezione e sicurezza negli impianti nucleari*);
- l'approfondimento dei diversi aspetti del rischio tecnologico e l'applicazione dell'analisi affidabilistica al progetto di componenti e sistemi ingegneristici complessi (*Sicurezza e analisi di rischio*).

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

Le metodologie di analisi dei fenomeni termoidraulici e termomeccanici e della sicurezza possono essere utilizzate per il progetto di impianti termici e lo studio di sistemi di tecnologia elevata.

### ***Orientamento energetico***

L'orientamento fornisce le conoscenze e gli strumenti metodologici per l'analisi, la modellistica e la valutazione tecnica, economica e ambientale di sistemi industriali finalizzati alla produzione di energia, sia da fonte nucleare che da fonti convenzionali.

La conoscenza delle caratteristiche funzionali di componenti e sistemi viene integrata dall'analisi degli aspetti connessi all'affidabilità e alla sicurezza e alle implicazioni di carattere ambientale, a scala locale e globali.

L'orientamento è caratterizzato da corsi rivolti a:

- l'analisi e la valutazione tecnica economica ed ambientale dei sistemi energetici (*Energetica e sistemi nucleari*);
- l'analisi dei fenomeni termofluidodinamici in regime multifase che si realizzano negli impianti di potenza (*Termofluidodinamica negli impianti nucleari 2*);
- la valutazione di impatto ambientale per l'inserimento nel territorio dei sistemi energetici (*Localizzazione dei sistemi energetici*);
- l'analisi di sicurezza degli impianti nucleari a fissione e fusione con metodologie deterministiche e probabilistiche (*Impianti nucleari 2*).

Sono inoltre svolte, in corsi a scelta, tematiche inerenti:

- il controllo e la regolazione degli impianti nucleari di potenza, inseriti in un sistema energetico complesso (*Dinamica e controllo degli impianti nucleari*);
- l'analisi delle problematiche di radioprotezione e la progettazione delle relative salvaguardie (*Protezione e sicurezza degli impianti nucleari*);
- l'approfondimento dei diversi aspetti del rischio tecnologico e l'applicazione dell'analisi affidabilistica al progetto di componenti e sistemi ingegneristici complessi (*Sicurezza e analisi di rischio*);
- la progettazione termoidraulica di componenti e sistemi attinenti all'impiantistica nucleare (*Termotecnica del reattore*).

L'orientamento è volto a preparare ad attività professionali nel settore energetico e nucleare, finalizzate alla progettazione, analisi e valutazione di sistemi energetici complessi e al loro inserimento ambientale.

Le conoscenze acquisite preparano anche ad attività connesse alla pianificazione energetica alle varie scale territoriali.

## Insegnamenti di orientamento

### *Orientamento Fisico-strumentale*

- Y (1) **Q2030** Fisica matematica  
 Y (2) **Q5310** Strumentazione fisica  
 Y (3) **Q3390** Meccanica statistica  
 Y (4) **Q0010** Acceleratori di particelle  
 Y (N) Insegnamento a scelta su Tabella A

### *Tabella A*

- 2 **Q4434** Radioattività (r) + **Q5404** Superconduttività (r)  
 2 **Q2024** Fisica e ingegneria dei plasmi (r) +  
**Q2934** Ingegneria dei reattori nucleari a fusione II (r)  
 1 **Q5680** Tecnologie e applicazioni nucleari  
 2 **Q6050** Trasporto di particelle e di radiazione

### *Orientamento Fisica dei reattori e controllo*

- Y (1) **Q6050** Trasporto di particelle e di radiazione  
 Y (3) **Q4460** Reattori nucleari avanzati  
 Y (4) **Q3470** Metodi matematici per i reattori nucleari  
 Y (6) **QA370** Dinamica e controllo degli impianti nucleotermoelettrici  
 Y (N) Insegnamento a scelta su Tabella B

### *Tabella B*

- 2 **Q4740** Sicurezza e analisi di rischio  
 1 **Q2772** Impianti nucleari II  
 2 **Q2024** Fisica e ingegneria dei plasmi (r) + **Q2934** Ingegneria dei reattori nucleari a fusione II (r)  
 2 **Q2030** Fisica matematica

### *Orientamento Impiantistico*

- Y (1) **QA552** Termoidraulica II  
 Y (3) **Q2772** Impianti nucleari II  
 Y (4) **Q5680** Tecnologie e applicazioni nucleari  
 Y (6) **Q6010** Termotecnica del reattore  
 Y (N) Insegnamento a scelta su Tabella C

### *Tabella C*

- 2 **Q2024** Fisica e ingegneria dei plasmi (r) +  
**Q2934** Ingegneria dei reattori nucleari a fusione II (r)  
 1 **Q4410** Protezione e sicurezza negli impianti nucleari  
 2 **Q4240** Progetti e costruzioni nucleari  
 2 **Q4740** Sicurezza e analisi di rischio

**Orientamento Energetico**

Y (1)	<b>Q1830</b>	Energetica e sistemi nucleari
Y (2)	<b>QA552</b>	Termoidraulica II
Y (3)	<b>Q3090</b>	Localizzazione dei sistemi energetici
Y (4)	<b>Q2772</b>	Impianti nucleari II
Y (N)		Insegnamento a scelta su Tabella D

**Tabella D**

2	<b>QA370</b>	Dinamica e controllo degli impianti nucleotermoelettrici
2	<b>Q4740</b>	Sicurezza e analisi di rischio
1	<b>Q4410</b>	Protezione e sicurezza negli impianti nucleari
2	<b>Q6010</b>	Termotecnica del reattore

## Programmi degli insegnamenti obbligatori

### Q0231 Analisi matematica 1

Anno: 1      Periodo: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**

- 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]
- 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]
- Successioni. Teoremi sulle successioni. Limiti fondamentali. Successioni monotone e legami tra estremo inferiore e superiore e i limiti. [4 ore]
- Definizione di continuità. Algebra delle funzioni continue. Esistenza zeri, valori intermedi e risultati su continuità globale. Continuità della funzione inversa. [4 ore]
- 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]

- 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]
- Integrali impropri. Criterio di convergenza del confronto, criterio del valore assoluto e criterio del confronto con infiniti o infinitesimi campione. [6 ore]
- 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. 1.*, 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.

**Q0232      Analisi matematica 2**

Anno: 2      Periodo: I      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**

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

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

*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.

*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.

*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.

*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.

*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.

*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.

*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.

*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.

**Q0514      Calcolo numerico**

(Corso ridotto)

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

Docente: *da nominare*

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 I, Geometria, Fondamenti di informatica.***PROGRAMMA***Aritmetica del calcolatore e algoritmi numerici. [3 ore]*

Errori di arrotondamento, operazioni di macchina.

Cancellazione numerica.

Condizionamento di un problema, stabilità di un algoritmo.

*Sistemi lineari. [8 ore]*

Metodo di eliminazione di Gauss.

Decomposizione di Gauss e fattorizzazione LU.

Determinazione matrice inversa.

Metodi iterativi: Jacobi, Gauss-Seidel, SOR.

*Autovalori di matrici. [4 ore]*

Metodo delle potenze.

Metodo delle potenze inverse.

Cenni sul metodo QR.

*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.

*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.

*Calcolo di integrali. [4 ore]*

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

Formule composte.

*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**

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. Negli appelli previsti dal calendario l'esame è solo orale.

## Q0620 Chimica

Anno: 1      Periodo: 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</sup></sup>*: esempi di molecole. Il legame dativo. La regola pratica dell'ottetto, formule di Lewis. Strutture di risonanza in molecole e ioni. Elettronegatività 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.

## Q0940 Costruzione di macchine

Anno: 4      Periodo:2

Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+4 (*ore settimanali*); 74+46 (*ore 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. Innessi. 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.

## Q1430 Disegno tecnico industriale

Anno: 1 Periodo: 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]

*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.

*Le proiezioni ortogonali.* [4 ore]

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

*Le proiezioni assonometriche.* [2 ore]

Il teorema di Pohlke. Le assonometrie ortogonali ed oblique.

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

*Le lavorazioni meccaniche.* [4 ore]

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

*La quotatura.* [4 ore]

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

*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.

*I collegamenti filettati.* [4 ore]

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

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

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

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

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

**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]

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.

## **Q7210      Elettronica industriale**

Anno: 4                  Periodo:1

Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+2 (*ore settimanali*); 70+20 (*ore nell'intero periodo*)

Docente: *da nominare*

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.

## Q1790 Elettrotecnica

Anno: 3

Periodo:2

Lezioni, esercitaz., laboratori: 6+2+2 (ore settimanali); 80+20+20 (ore 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 sinusoidale. [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.  
 DV. Daniele, A. Liberatore, R. Graglia, S. Manetti, *Elettrotecnica*, Monduzzi, Bologna.  
 K K. Kupfmuller, *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 *statino* 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.

**Q1901      Fisica 1**

Anno: 1            Periodo:2            Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+2 (*ore settimanali*)  
 Docenti: **Felice Iazzi**

Il corso si propone di fornire i primi rudimenti della teoria della misura e gli elementi per la comprensione delle leggi classiche di: meccanica del punto e dei sistemi, statica, fisica dei fluidi, elettrostatica e ottica geometrica, insieme agli strumenti per la soluzione dei relativi problemi.

**REQUISITI**

È opportuno che lo studente abbia seguito il corso di *Analisi I* e segua in contemporanea il corso di *Geometria*.

**PROGRAMMA***Teoria della misura e degli errori*

Misure e grandezze fisiche, sistemi di unità di misura ed equazioni dimensionali. Errore di misura assoluto e relativo, errore diretto e indiretto: propagazione dell'errore. Concetto probabilistico del valore medio e dello scarto quadratico medio: cenno al teorema del limite centrale. Istogrammi.

*Cinematica*

Sistemi di riferimento, grandezze vettoriali e loro componenti nei sistemi cartesiani. Rappresentazione vettoriale di posizione, velocità e accelerazione: equazioni del moto. Caduta libera dei gravi. Coordinate intrinseche e cilindriche. II e III legge di Keplero, Moti relativi: sistemi di riferimento inerziali e non. Trasformazioni galileiane; accelerazione di trascinamento e accelerazione di Coriolis. Effetti dell'accelerazione di Coriolis sulla Terra: cenni su caduta dei gravi verso oriente, erosione delle sponde dei fiumi.

*Dinamica*

Dinamica del punto: il punto fisico, massa e densità di massa. Forza: definizione statica. Principali tipi di forze: gravitazionale, elettrostatica, di attrito, vincolare, di funi, elastica e di Lorentz. I 3 principi della Dinamica. Forze fittizie in sistemi di riferimento non inerziali. Diagramma di corpo libero. Quantità di moto e impulso di una forza: teorema dell'impulso. Lavoro ed energia cinetica: teorema del lavoro. Forze conservative: energia potenziale, potenziale, teorema del lavoro per forze conservative. Energia meccanica. Principali tipi di forze conservative. Campi: definizione, campi conservativi, campo gravitazionale e campo elettrostatico, Campi centrali. Momento angolare e momento della forza: proprietà. Teorema del momento e teorema dell'impulso di momento. Sistemi di punti fisici: sistemi discreti e continui. Forze interne ed esterne. Centro di massa. I equazione della dinamica dei sistemi. Teorema dell'impulso per i sistemi. II equazione della dinamica dei sistemi. Lavoro, energia cinetica e potenziale di un sistema. Teorema del lavoro e teorema di König. Urti: forze impulsive, conservazione della quantità di moto. Urti elastici, anelastici e completamente anelastici. Sistemi a massa variabile. Corpo rigido: moto traslatorio e rotatorio attorno ad un asse fisso. Momento d'inerzia: teorema di Huyghens. Energia cinetica del corpo rigido. Momento angolare del corpo rigido: assi principali d'inerzia. II equazione cardinale della dinamica per il corpo rigido. Lavoro ed energia cinetica del corpo rigido.

Conservazione del momento angolare assiale nel corpo rigido. Giroscopio e trottola (cenni). Rotolamento puro e con strisciamento.

#### *Statica*

Statica dei sistemi: risultante dalle forze esterne e momento totale delle forze esterne nulli come condizione necessaria e sufficiente della statica. Equilibrio stabile e instabile.

#### *Fisica dei fluidi*

Il concetto di pressione. Definizione di fluidi ideali e reali. Statica dei fluidi: teorema di Stevino in forma generale. Applicazioni del teorema di Stevino al campo gravitazionale ed ai liquidi in sistemi non inerziali. Dinamica dei fluidi ideali: teorema di Bernoulli. Portanza di un aeroplano. Cenni sull'effetto Magnus.

#### *Elettrostatica*

La carica elettrica, distribuzione di cariche elettriche discrete e continue. Forza di Coulomb. Campo e potenziale elettrostatico. Campi vettoriali e scalari. Campi generati da una distribuzione di cariche. Dipolo elettrico: Campo e potenziale generato da un dipolo, forza subita da un dipolo in un campo elettrico. Teorema di Gauss, teorema della divergenza ed equazione di Poisson. Distribuzioni di carica a simmetria piana, cilindrica e sferica. Analogie col campo gravitazionale. Conduttori: proprietà e distribuzioni di carica all'interno. Condensatori: capacità, condensatori in serie e in parallelo, circuiti di condensatori, energia immagazzinata nel condensatore, forza tra le armature di un condensatore piano.

#### *Ottica geometrica*

Principio di Fermat. Leggi della riflessione e della rifrazione dedotti dal principio di Fermat. Compatibilità col principio di Huyghens. Riflessione totale. La formazione dell'immagine in specchio sferico e piano. Diottri e lenti sottili.

### **ESERCITAZIONI**

In aula: esercizi applicativi sul programma del corso, suddivisi in preliminari e fondamentali. In *laboratorio (computer online)*: misurazione dell'accelerazione di gravità mediante la caduta dei gravi e mediante il pendolo semplice, con applicazioni della teoria della misura.

### **BIBLIOGRAFIA**

- S. Rosati, *Fisica Generale I. Edizione* - Casa Editrice Ambrosiana Milano (CEAM)  
 G. Lovera, B. Minetti, A. Pasquarelli, *Fisica Generale I* - Editrice Levrotto e Bella  
 S. Rosati, L. Lovitch, *Fisica Generale II*. - Casa Editrice Ambrosiana Milano (CEAM)  
*Esercizi:*  
 S. Rosati, R. Casali, *Problemi di fisica Generale I*  
 B. Minetti, A. Pasquarelli, *Esercizi di Fisica I*. - Ed. Levrotto e Bella  
 S. Rosati, L. Lovitch, *Problemi di Fisica Generale II*

### **ESAME**

1. Ogni appello d'esame è costituito da 1 prova scritta e 1 orale: la prova scritta avviene nella data, nell'ora dell'appello. È consentito l'uso di libri e appunti durante la prova.
2. Subito dopo la consegna della prova scritta, avverrà la correzione della medesima nella stessa aula: al termine della correzione i candidati che ritengono opportuno possono ritirare la prova consegnata.
3. I candidati che non ritirano la prova sono tenuti a sostenere l'esame orale (nella data che sul momento si stabilisce): la prova scritta costituisce la prima domanda dell'esame.

4. La prova scritta del primo appello dopo il termine delle lezioni può fungere da esonero delle prove scritte degli appelli successivi su richiesta del candidato, il quale dovrà apporre la scritta ESONERO accanto al proprio nome: se la prova avrà esito superiore o uguale a 18/30 il candidato non dovrà più sostenere la prova scritta negli appelli successivi.
5. Gli studenti che intendono sostenere l'esame in un dato appello sono invitati a scrivere il proprio nome (in stampatello) sull'apposito foglio affisso nella bacheca interna del Dipartimento di Fisica entro 2 giorni prima dell'appello.
6. Tutti i candidati devono esibire libretto e statino alla prova orale.

## Q1902 Fisica 2

Anno: 2      Periodo: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.*

- 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].
- Il teorema di Gauss. Forma integrale e forma differenziale nel vuoto [3.11], nella materia [4.12].
- 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].
- Dielettrici [4.11]. Vettore intensità di polarizzazione **P**; cariche legate e campo elettrico risultante nello *slab*. Relazione tra densità di carica legata e **P** in sostanze uniformemente polarizzate e non. Significato della *div P*.
- Relazione tra **E**, **P**, **D** [4.12]. Prima equazione di Maxwell. Costante dielettrica e suscettività dielettrica [4.13].
- Passaggio da un dielettrico ad un altro [4.16]. Misurazioni dei vettori **E** e **D** [4.17]. Esempio del condensatore piano con due dielettrici [4.18]. Rigidità dielettrica [4.18].

- Energia elettrostatica di un condensatore e densità di energia del campo elettrico (verifica della validità della formula) [3.30]. Misura della  $\epsilonpsilon_r$  [4.19].
- 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].
- 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].
- 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].
- 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.
- 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].
- 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].
- 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].
- 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].
- 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].
- 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].
- Autoinduzione [8.6]. Mutua induzione. Extra-correnti di chiusura e apertura in un circuito induttivo. Carica e scarica di un condensatore.
- 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.
- Circuiti R, L, C in alternata [8.9-10]. Oscillazioni forzate. Oscillazioni smorzate. Risonanza [appunti distribuiti].
- Le quattro equazioni di Maxwell [9.2]. Il teorema di Poynting [9.5]. Vettore di Poynting: suo significato e sua definizione come grandezza dimensionata.
- 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.

– 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].

– 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].

– Interazione onda – materia: indice di rifrazione complesso, costante  $\epsilon_r$  e polarizzabilità atomica: legame [12.3]. Assorbimento nei dielettrici.

– Assorbimento nei metalli [12.6]. Caso delle basse frequenze. Caso delle alte frequenze.

– 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.

– 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.

– Corda continua [appunti distribuiti]. Dipendenza della velocità dalla tensione della fune e dalla densità lineare della fune. Quantizzazione delle lunghezze d'onda.

#### Ottica.

– 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.

– Metodo per osservare l'interferenza [14.1]. Interferenza in lamine sottili [14.2].

– Principio di Huyghens – Fresnel. Diffrazione: definizione generale. Diffrazione da una fenditura rettangolare indefinita e interpretazione fenomeno diffrazione [appunti distribuiti].

– Reticolo di diffrazione [appunti distribuiti]. Diffrattometro. Misura della lunghezza d'onda. Collimatore. Cannocchiale. Errore nella misurazione di  $\lambda$  [laboratorio].

– 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.

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

– 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.

– Gas perfetti [II.4]. Teoria cinetica dei gas [II.5, II.7]. Gas reali [II.10]. Cambiamenti di stato [II.14].

– Trasformazioni termodinamiche [III.6,-8]. Enunciazione del primo principio della termodinamica in forma differenziale.

– Dimostrazione sperimentale dell'equivalenza tra lavoro e calore ed espressione integrale del primo principio [III.9-10, III.12]. Energia interna.

- Calori specifici a volume costante e a pressione costante: loro relazione [III.12-13].  $C_p$ ,  $C_v$  per gas "perfetti" monoatomici e biatomici.
  - Ciclo di Carnot [IV.1-8]. Rendimento ciclo di Carnot. Enunciazione del secondo principio della termodinamica. Enunciazione del teorema di Carnot. Temperatura termodinamica.
  - Enunciazione del secondo principio della termodinamica: enunciati di Clausius e di Kelvin, loro equivalenza. Teorema di Carnot [IV.4].
  - 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.*
- 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.

**Q1965      Fisica dei reattori a fissione +  
Fisica dei reattori a fusione**  
(Corso integrato)

Anno: 3      Periodo:2  
Docente: **Silvio Corno**

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 i fenomeni collettivi 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**

- 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.
- 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.
- 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.
- Reattori eterogenei: necessità ed effetto dell'eterogeneità; catture in risonanza, moltiplicazioni veloci, utilizzazione dei neutroni termici nei reticoli.
- 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.
- Metodi perturbativi nella statica e nella dinamica: funzione importanza dei neutroni; applicazioni ad uno e due gruppi energetici.

- 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

- Fusione dei nuclei leggeri: tipi di reazioni sfruttabili nell'energetica industriale; bilanci energetici; criteri di ignizione di un plasma.
- Fondamenti di elettrodinamica classica: equazioni di Maxwell; potenziali elettrodinamici; teoremi di conservazione; propagazione dell'energia raggiante.
- Orbite di particelle cariche in presenza di campo elettromagnetico esterno.
- Applicazione della teoria delle orbite allo studio di alcuni tipi di macchine per la fusione nucleare (mirror, tokamak).
- Formulazione delle equazioni di base della magnetofluidodinamica ideale.
- Esempi di applicazione della magnetofluidodinamica.

### 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.  
 S.E. Corno, *Appunti alle lezioni dei corsi di Fisica dei reattori a fissione e a fusione*.  
 F.F. Chen, *Plasma Physics and controlled Fusion*, Plenum, New York, 1984.

**Q2040      Fisica nucleare**

Anno: 3      Periodo: 1  
 Docente: **Piero Quarati**

**PROGRAMMA**Meccanica quantistica e fisica atomica.

*Fenomenologia.* [12 ore]

Spettro del corpo nero. Effetti Compton e fotoelettrico. Spettroscopia.

*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.

*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.

*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.

Problemi unidimensionali. [6 ore]

Gradino di potenziale e barriera impenetrabile. Barriera rettangolare di altezza finita o infinita. Coefficiente di riflessione e trasmissione.

*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.

*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.

*Campi centrali e atomi idrogenoidi.* [10 ore]

Interazione a due corpi. Forze a simmetria centrale. Campi coulombiani. Numeri quantici atomici.

Fisica nucleare.

*Fenomenologia nucleare.* [4 ore]

Sistematica nucleare. Massa, carica, energia di legame, spin isotopico, momento angolare del nucleo.

*Modelli nucleari.* [6 ore]

Modello a goccia liquida. Formula semiempirica delle masse. Linea di stabilità. Modello a *shell*. Accoppiamento *spin* - orbita.

*Decadimento radioattivo.* [12 ore]

Decadimento alfa, effetto *tunnel*. Decadimento beta e cattura elettronica. Decadimento gamma.

*Forze nucleari.* [4 ore]

Modello del deutone. Interazione protone - neutrone. Stato virtuale. Teoria mesonica delle forze nucleari.

*Reazioni nucleari.* [8 ore]

Sezioni d'urto. Teoria dello *scattering*. Reazioni dirette e indirette. Reazioni indotte da neutroni e da raggi gamma.

*Fissione e fusione nucleare.* [4 ore]

Modelli macroscopici. Energia rilasciata.

*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.

## Q2170 Fondamenti di informatica

Anno: 2      Periodo: 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 elaboratori 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,  $\mu$ 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 ciberspazio: *gopher*, *veronica*, *wais*, *www*); sistemi *client-server*.

### ESERCITAZIONI

1. 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]
2. Operazioni aritmetiche: addizioni e sottrazioni in binario puro ed in complemento a due; [2 ore]
3. Logica booleana: verifica di espressioni logiche, costruzione e minimizzazione di funzioni logiche; [2 ore]
4. Architettura degli elaboratori elettronici: dimensionamento di componenti e calcolo di prestazioni; [2 ore]
5. *I personal computer* MS-DOS: configurazione *software* di un PC, scrittura di *file* di comandi; [4 ore]
6. 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.

**ESERCITAZIONI**

1. Collezioni dell'informazione: collezione per base fissata, collezione di numeri interi, collezione di informazioni generali, livello di collezione di dati generali.
2. Operazioni aritmetiche: addizione e sottrazione in base fissa ed in complemento a due.
3. Logica booleana: verità di espressioni logiche, costruzione e interpretazione di funzioni logiche.
4. Architettura degli elaboratori elettronici: dimensionamento di componenti e calcolo di prestazioni.
5. I programmi: comando MS-DOS, programmazione in un LC, calcolo in un LC.
6. Programmazione in linguaggio C: istruzioni e modi, operazioni di livello basso, uso di strutture di dati, uso di funzioni, uso di variabili, uso di operatori, uso di costanti, uso di espressioni.
7. Programmazione in linguaggio C: istruzioni e modi, operazioni di livello basso, uso di strutture di dati, uso di funzioni, uso di variabili, uso di operatori, uso di costanti, uso di espressioni.
8. Programmazione in linguaggio C: istruzioni e modi, operazioni di livello basso, uso di strutture di dati, uso di funzioni, uso di variabili, uso di operatori, uso di costanti, uso di espressioni.

Il corso di programmazione in linguaggio C è articolato in due parti: una parte teorica e una parte pratica. La parte teorica è articolata in otto moduli, mentre la parte pratica è articolata in quattro moduli. Il corso di programmazione in linguaggio C è articolato in due parti: una parte teorica e una parte pratica. La parte teorica è articolata in otto moduli, mentre la parte pratica è articolata in quattro moduli.

**LABORATORIO**  
L'uso del comando MS-DOS (4 ore)  
Programmazione in linguaggio C (14 ore)  
Uso di strumenti di produttività individuale (4 ore)  
Uso di strumenti per la produttività in rete (2 ore)  
Uso di strumenti per la produttività in rete (2 ore)

**BIBLIOGRAFIA**  
Yellin G. (1990) "L'architettura degli elaboratori elettronici", McGraw-Hill, Milano.  
Dipartimento di Informatica (1990) "Programmazione in linguaggio C", McGraw-Hill, Milano.  
P. Foracchia, G. Vignati, M. Zaccaro, "Architettura degli elaboratori elettronici", McGraw-Hill, Milano.  
E. Kemmerling, E. Kitzinger, W. Lang, "L'architettura degli elaboratori elettronici", McGraw-Hill, Milano.  
Festo per approfondimento.  
L'uso di strumenti per la produttività in rete (2 ore)

## Q2300 Geometria

Anno: 1      Periodo: 2      Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+4 (*ore settimanali*)  
 Docenti: (I corso) **Paolo Valabrega** Esercitori: Letterio Gatto, Roberto Notari  
 (II corso) **Carla Massaza** Esercitori: Roberto Notari, Valter Ebagezio

### PROGRAMMA

Vettori del piano e dello spazio: operazioni, componenti, prodotto scalare, vettoriale, misto. [4-5 ore]

Numeri complessi: operazioni, rappresentazione trigonometrica, radici n-esime. [3-4 ore]

Polinomi ed equazioni algebriche in campo reale e complesso: radici, principio di identità, teorema fondamentale dell'algebra. [1-2 ore]

Spazi vettoriali: proprietà elementari, sottospazi, somma e intersezione, dipendenza e indipendenza, basi e generatori, dimensione. [5-7 ore]

Matrici: operazioni, spazi di matrici, matrici simmetriche e antisimmetriche, matrici invertibili. [4-5 ore]

Sistemi lineari: compatibilità e teorema di Rouchè-Capelli, metodi di risoluzione, sistemi ad incognite vettoriali, matrici inverse, determinanti e matrici. [7-8]

Applicazioni lineari: definizione, nucleo e immagine, suriettività, iniettività, applicazione inversa, applicazioni lineari e matrici, matrici simili e cambiamenti di base. [4-6 ore]

Autovalori e autovettori: polinomio caratteristico e minimo, teorema di Caley-Hamilton, autospazi, endomorfismi semplici, diagonalizzazione. [5-6 ore]

Spazi con prodotto scalare e matrici simmetriche. [3-5 ore]

Forma canonica di Jordan [cenni]. [2-4 ore]

Cenni su equazioni e sistemi differenziali lineari. [2-4]

Coordinate cartesiane sulla retta e nel piano. Coordinate polari nel piano. [1 ora]

Rette e circonferenze nel piano. [1-3 ore]

Coniche in forma canonica e generale. [4-5 ore]

Coordinate cartesiane e polari nello spazio [1-2 ore]

Rette e piani nello spazio. [4-5 ore]

Sfere e circonferenze. [1-2 ore]

Quadriche in forma canonica. Quadriche rigate. [3-5 ore]

Superficie nello spazio: coni, cilindri, superficie di rotazione. [4-6 ore]

Curve nello spazio e curve piane. [1-2 ore]

Funzioni vettoriali di una variabile. [2-3 ore]

Curve regolari e biregolari: vettori tangente, normale e binormale, piano osculatore. [3-4 ore]

Il corso, di *6 ore settimanali*, è completato da esercitazioni [*4 ore settimanali*], per un totale complessivo di circa 120 ore. Nelle esercitazioni, oltre ad esercizi relativi ad argomenti delle lezioni, potranno essere svolti oppure ripresi e approfonditi alcuni argomenti delle lezioni.

**BIBLIOGRAFIA**

1. S.Greco-P.Valabrega- *Lezioni di Algebra Lineare e Geometria*.  
Vol I - *Algebra lineare*  
Vol II- *Geometria Analitica e Differenziale* Ed. Levrotto & Bella , Torino , 1994
2. A.Sanini- *Lezioni di Geometria* - Ed. Levrotto & Bella , Torino , 1994  
(Libri di esercizi adatti ai corsi)
3. S.Greco-P.Valabrega - *Esercizi risolti di Algebra lineare, geometria analitica e differenziale* - Ed. Levrotto & Bella , Torino , 1994
4. A. Sanini. *Esercizi di Geometria*. Ed. Levrotto & Bella , Torino , 1994
5. N. Chiarli-S.Greco-P.Valabrega.  
*100 Esercizi di Algebra lineare*  
*100 Esercizi di Geometria analitica piana e numeri complessi*  
*100 Esercizi di Geometria dello spazio* - Ed. Levrotto & Bella , Torino , 1994
6. G. Tedeschi.-*Prove scritte di Geometria risolte* - Ed.CELID, Torino, 1989
7. N.Chiarli - *L'esame di Geometria* - Ed. Levrotto & Bella , Torino , 1986
8. G.Cervelli- A. DiLello- *Geometria :esercizi risolti* - Ed. Clut., Torino, 1994.

-----  
(Per maggiori approfondimenti su testi adatti a matematici)

9. E.Sernesi - *Geometria 1*- Ed Bollati Boringhieri, Torino,1990.
10. E.Sernesi - *Geometria 2* - Ed Bollati Boringhieri, Torino,1994.
- 11.(Per approfondire aspetti teorici dell'algebra lineare e migliorare il proprio inglese)  
S. Lang- *Linear Algebra*- Addison-Wesley Publ. Comp.,Reading, Mass.1966. [trad.it. *Algebra Lineare*, Ed.Bollati Boringhieri, Torino, 1970].
- 12.(per approfondire aspetti concreti dell'algebra lineare)  
G.Strang- *Algebra lineare e sue applicazioni*- Ed Liguori, Napoli,1982.
- 13.(Per approfondire l'algebra lineare su un testo adatto ai matematici)  
C. Ciliberto - *Algebra Lineare* - Ed. Bollati Boringhieri, Torino, 1994.

-----  
Sono inoltre disponibili presso le cooperative interne al Politecnico [CELID, CLUT; CUSL] raccolte di test dati negli ultimi anni.

Chi desidera invece i compiti scritti assegnati in appelli d'esame recenti, può richiederli allo sportello esterno del Dipartimento di Matematica [III piano lato aule pari].

**ESAME**

L'esame si può sostenere con due modalità diverse. All'inizio di ogni prova scritta, qualunque sia la modalità, lo studente dovrà esibire un documento d'identità con foto, possibilmente il tesserino o il libretto del Politecnico.

**B1. Esame con due prove scritte durante il semestre.**

Lo studente potrà sostenere due prove scritte, che si svolgeranno a metà ed al termine del corso, durante le quali sarà vietato usare libri o appunti.

I prova scritta [metà corso- durata un'ora circa]: sarà un test a risposta multipla, riguardante la prima parte del corso [Algebra lineare e numeri complessi];

II prova scritta [fine corso- durata 60-90 minuti] :lo studente dovrà svolgere esercizi di geometria analitica piana e spaziale [inclusa eventualmente la geometria differenziale delle curve].

Chi raggiungerà un punteggio - 15/30 in ogni prova scritta potrà sostenere direttamente la prova orale in un qualunque appello di esame fra giugno e settembre, ripetendola

eventualmente due volte senza ulteriori prove scritte. Per esami orali di questo tipo sarà previsto un servizio prenotazioni presso lo sportello esterno del Dipartimento di Matematica [III piano lato aule pari] .

### B2. Esame con prova scritta tradizionale.

Lo studente che non possa o non voglia utilizzare le prove di cui in B1 si presenterà all'esame , in uno degli appelli previsti dal calendario, per sostenere una prova scritta, nella quale dovrà risolvere esercizi e problemi sugli argomenti del corso. Al termine della prova i partecipanti riceveranno un foglio contenente le soluzioni ai quesiti proposti e avranno 10 minuti per esaminare tali soluzioni e decidere se ritirare il compito già consegnato [nel qual caso non resterà traccia della partecipazione] ovvero consegnarlo definitivamente, con lo statino d'esame, per sostenere la prova orale, necessariamente nello stesso appello. Durante queste prove sarà consentito usare libri e appunti. Anche per questa prova sarà istituito un servizio prenotazioni presso lo sportello esterno del Dipartimento di Matematica [III piano, aule pari] In sede di orale [con modalità B1 o B2 indifferentemente] agli studenti [soprattutto a quelli con scritto insufficiente] potrà essere richiesto di svolgere un esercizio scritto, preliminare all'orale vero e proprio.

### *Servizio consulenze e comunicazioni agli studenti.*

È previsto un servizio consulenze con orario esposto nelle bacheche [III piano lato aule dispari]. Nelle stesse bacheche si trovano tutte le informazioni e comunicazioni relative ai corsi ed agli esami. Il recapito dei docenti è presso il Dipartimento di Matematica, al terzo piano lato aule dispari. Il recapito telefonico è il seguente:

prof. Valabrega 5647520      prof.sa Massaza 5647524

[rispettivamente 7520 e 7524 se si usa uno dei due telefoni collocati presso le porte esterne del Dipartimento].

## Q2775 Impianti nucleari + Ingegneria dei reattori nucleari a fusione I (Corso integrato)

Anno: 4 Periodo: 1

Lezioni, esercitazioni, laboratori: 7+2 (ore settimanali); 90+24+2 (ore nell'intero periodo)

Docente: da nominare

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

- 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. [4 ore]
- Richiami di fisica del reattore; calcoli energetici e consumo di combustibile; reattori termici e autofertilizzanti: confronto con i combustibili fossili. [4 ore]
- 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]
- 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]
- 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]
- Reattori ad acqua pesante: descrizione dei CANDU. Reattori a gas grafite: Magnox, AGR, HTGR. [4 ore]

- Reattori veloci a metallo liquido: caratteristiche principali; descrizione del Superphenix. [4 ore]
- 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; incidenti 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]
- Metodologia di progettazione, normativa nucleare, garanzia della qualità, ingegneria dei circuiti. Classi sismiche. [2 ore]
- 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]
- 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

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

### ESERCITAZIONI

- Calcolo strutturale di alcuni componenti di impianti nucleari. [10 ore]
- Calcolo termoidraulico del circuito primario di un reattore ad acqua pressurizzata. [2 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. [2 ore]
- 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 I* un compito può sostituire l'esame finale.

## Q3040 Istituzioni di economia

Anno: 5      Periodo: 2  
 Docente: **Loretta Rosso**

### PROGRAMMA

Gli strumenti per l'analisi del sistema economico (indici modelli, *input-output*, contabilità nazionale).

Cenni di storia dell'analisi economica; crescita e sviluppo dei sistemi economici.

Elementi di microeconomia: i comportamenti degli operatori; la formazione dei prezzi; l'impresa e le decisioni produttive; i mercati dei fattori produttivi; le forme di mercato: mercati concorrenziali e mercati non concorrenziali.

Elementi di macroeconomia: macroeconomia di piena occupazione; macroeconomia con disoccupazione; il ruolo dello Stato e la politica economica: teorie keynesiane e sviluppi recenti.

**Q3110     Macchine**

Anno: 4       Periodo:2

Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+4 (ore settimanali);78+42 (ore 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. [10 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. [10 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. [15 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. [14 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. [14 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.

## Q3204 Meccanica analitica (Corso ridotto)

Anno: 2      Periodo: 2

Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+2 (ore settimanali); 44+12 (ore 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.

## Q3210 Meccanica applicata alle macchine

Anno: 3      Periodo: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**

#### *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.

#### *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.

#### *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.

#### *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.

## Q3480      **Metodi matematici per l'ingegneria**

Anno: 2              Periodo: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 prerequisites 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.

## Q8390 Misure e strumentazione nucleari

Anno: 5 Periodo: I

Docente: Aldo Pasquarelli

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

*Definizione di sensore; definizione di trasduttore.*

*Misure di tempo.*

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

*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.

*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.

*Sensore di umidità.*

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

*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.

*Trasduttori di pressione.*

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

*Trasduttori di spostamento.*

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

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

*Trasduttore ad effetto Hall.*

*Convertitori raggiX - luce.*

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

*Strumentazione.*

Misuratore del numero di giri di un albero motore. Voltmetro digitale a 3 cifre e mezzo. Voltmetro digitale a 4 cifre e mezzo. Periodometro. 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.

## Q4600      **Scienza delle costruzioni**

Anno: 3                  Periodo:1                  Lezioni, esercitazioni, laboratori: 4+4+2 (*ore settimanali*)  
 Docente: **Franco Algostino** (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.

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

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

Docente: **Margherita Appendino**

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 nitruro 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 incamiciamento dei combustibili nucleari: leghe di alluminio e di magnesio; leghe di zirconio. [3 ore]

– Scorie radioattive e loro sistemazione. [2 ore]

## ESERCITAZIONI

1. Calcoli sulla durezza delle acque. Calcoli sull'abbattimento della durezza delle acque. Calcoli per il degasaggio chimico e la dolcificazione con resine delle acque. [3 ore]

2. Calcoli sulla combustione. [3 ore]

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

4. Calcoli sui moduli dei cementi. [2 ore]

5. 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.

**Q5950 Termodinamica applicata**

Anno: 3      Periodo: 1

Lezioni, esercitazioni, laboratori: 4+4 (ore settimanali); 56+56+8 (ore 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.

**QA552 Termoidraulica 1**

Anno: 4      Periodo: I

Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+2 (ore settimanali); 76+28 (ore nell'intero periodo)

Docente: **Mario Malandrone**

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:

1. problemi di statica dei fluidi; [1 ora]
2. applicazioni delle equazioni integrali di conservazione; [4 ore]
3. moto di fluidi ideali; [1 ora]
4. moto dei fluidi reali in condotti e studio della circolazione in circuiti adiabatici; [3 ore]
5. 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]
6. scambio termico per irraggiamento; [4 ore]
7. conduzione del calore nei solidi in regime stazionario; [2 ore]
8. calcolo di alettature; [2 ore]
9. conduzione del calore in regime transitorio, metodi numerici nella conduzione; [2 ore]
10. calcoli di dimensionamento e verifica di scambiatori di calore; [4 ore]
11. 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.

## Programmi degli insegnamenti d'orientamento

### Q0010 Acceleratori di particelle

Anno: 5            Periodo: 1

Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6 (*ore settimanali*); 70+10 (*ore 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.

## QA370 Dinamica e controllo degli impianti nucleotermoelettrici

Anno: 5 Periodo:2

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

Docente: **Mario De Salve**

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:

- sistemi per la produzione di energia elettrica: caratteristiche funzionali ed interconnessione con la rete elettrica;
- elementi di teoria dei controlli automatici;
- cinetica puntiforme;
- modelli termoidraulici dinamici per componenti e sistemi;
- analisi della stabilità di impianti e sistemi;
- instabilità termoidrauliche;
- aspetti dinamici della strumentazione termoidraulica e nucleare,
- 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**

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]

- 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]  
 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]

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]

– 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]

– 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]

– 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: 4      Periodo:2      Lezioni, esercitazioni, laboratori: 4+2+2 (*ore settimanali*)

Docente: *da nominare*

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**

– *Elementi introduttivi.* [14 ore]

*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.

*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.

*Fondamenti di energetica.* [8 ore]

Energia ed exergia.

Metodologie per l'analisi energetica ed exergetica dei cicli e delle trasformazioni termodinamiche.

– *Le fonti primarie di energia e la loro utilizzazione.* [20 ore]

*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.

*Le modalità di vettoriamento.*

*Gli usi finali.*

– *Le nuove tecnologie.* [10 ore]

*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.

*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.

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

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

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.

## Q2024      Fisica e ingegneria dei plasmi

(Corso ridotto)

Anno: 5      Periodo: 2

Docente: **Francesco 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: 4      Periodo: 2

Lezioni, esercitaz., laboratori: 6+2(3) (*ore settimanali*); 60+40(50) (*ore 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, algebra 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.

- Cenni 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). Cenni 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: 5<sup>a</sup> Periodo: 1

Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+2 (ore settimanali); 78+24 (ore 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 CONEMPT e CONEMPT-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: 5 Periodo: 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  $t_{E}$ . [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.

PROGRAMMA

1. - Confinamento e riscaldamento del plasma

Definizione e soluzioni particolari dell'equazione di Grad-Schlueter-Schepfer. [4 ore]

Equazioni di trasporto per la derivazione puntuale della conduttività termica. [2 ore]

Richiami sui tipi di confinamento e riscaldamento. [2 ore]

Calcolo di un campo magnetico necessario a mantenere un plasma in equilibrio. [2 ore]

2. - Confinamento del plasma

2.1. - Sollecitazioni sul plasma. [2 ore]

Magneti superconduttori e loro caratteristiche. Problemi di tecnologia. [2 ore]

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

2.2. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.3. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.4. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.5. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.6. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.7. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.8. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.9. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.10. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.11. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.12. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.13. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.14. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.15. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.16. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.17. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.18. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.19. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.20. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.21. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.22. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.23. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.24. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.25. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.26. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.27. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.28. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.29. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.30. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.31. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.32. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.33. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.34. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.35. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.36. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.37. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.38. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.39. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.40. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.41. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.42. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.43. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.44. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.45. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.46. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.47. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.48. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.49. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.50. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.51. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.52. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.53. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.54. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.55. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.56. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.57. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.58. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.59. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.60. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.61. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.62. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.63. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.64. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.65. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.66. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.67. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.68. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.69. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.70. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.71. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.72. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.73. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.74. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.75. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.76. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.77. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.78. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.79. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.80. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.81. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.82. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.83. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.84. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.85. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.86. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.87. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.88. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.89. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.90. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.91. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.92. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.93. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.94. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.95. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.96. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.97. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.98. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.99. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

2.100. - Riscaldamento del plasma. [2 ore]

3. - Confinamento inerziale

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

Impulsi e requisiti di simmetria inerzionale. [2 ore]

Fusione inerziale a raggioamento interno e indotto da fasci di ion. [2 ore]

Coef. di inerziale inerziale e profilo dei bersagli. [2 ore]

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

## Q3090 Localizzazione dei sistemi energetici

Anno: 5      Periodo: 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

*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*).

– Elementi di ecologia \*

Gli ecosistemi. Gli elementi costitutivi dell'ambiente naturale e i principali cicli materiali nell'ambiente naturale. Le perturbazioni naturali e antropogeniche.

– 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.

– 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.

– 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.

*Gli impianti, i cicli ed i sistemi energetici. [20 ore]*

– 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.

– Schemi di impianto.

Descrizione di alcune schemi particolarmente significativi in merito alle soluzioni tecnologiche adottate per la riduzione dell'impatto e del rischio ambientali.

- Valutazioni qualitative e quantitative dei rilasci di esercizio e dei rilasci incidentali.

Tecniche di controllo e riduzione delle emissioni

- La prevenzione del rischio.

- Le infrastrutture necessarie per la gestione dei cicli energetici.

Il vettoriamento dell'energia e le reti energetiche. Le interconnessioni sovranazionali.

- Il ciclo completo del combustibile e l'impatto ambientale complessivo.

*Il contesto normativo in merito ai processi di localizzazione dei sistemi energetici e agli standards ambientali.* [8 ore]

- Norme e procedure della legislazione nazionale ed internazionale.

Gli *standards* di qualità ambientale. Normativa USA, CEE ed italiana.

- Analisi critica di alcuni casi rilevanti di processi localizzativi.

Le localizzazioni di impianti elettronucleari.

*Analisi di impianti e sistemi energetici.* [24 ore]

- Definizione dei parametri di valutazione.

In termini di validità: tecnologica, energetica, socio-economica, territoriale, ambientale. Le analisi costi/benefici.

- 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.

- 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.

## Q3390 Meccanica statistica

Anno: 5      Periodo:1    Lezioni, esercitazioni, laboratori: 90 (ore nell'intero periodo)  
 Docente: **Mario Rasetti** (collab. Corrado Agnes)

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 (*caos*) 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 meteorologici (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 (includere 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 *plasm*i. 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 prerequisiti essenziali i corsi di matematica e fisica generali, i complementi di matematica, almeno un corso di "fisica moderna". Nonostante 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.

## ESAME

Verifica orale sui temi trattati a lezione; occasionalmente, tesina scritta su argomento monografico.

## Q3470 Metodi matematici per i reattori nucleari

Anno: 5 Periodo: I

Lezioni, esercitazioni, laboratori: 70+20+20 (ore nell'intero periodo)

Docente: **Gianni Coppa**

Scopo del corso è di fornire gli approfondimenti indispensabili per la preparazione di un laureato in Ingegneria che debba fare uso di tecniche numeriche e di simulazione avanzate. Il corso si propone di fornire una preparazione sull'argomento di tipo sia teorico che pratico. Una parte consistente del corso è dedicata allo sviluppo di programmi di calcolo e all'uso di software applicativo.

### PROGRAMMA

*Tecniche numeriche per la soluzione di equazioni alle derivate parziali [25ore]*

- Metodi alle differenze finite
- Analisi di consistenza, accuratezza, stabilità ed efficienza
- rappresentazione discretizzata degli operatori differenziali
- Problemi ellittici, parabolici e iperbolici
- Problemi non lineari
- Tecniche variazionali
- Griglie adattative

*Metodi di simulazione Particle-in-Cell [15ore]*

- Uso di superparticelle computazionali nella simulazione di sistemi costituiti da molte particelle
- Funzioni di forma e di assegnazione
- Soluzione delle equazioni del moto in presenza di campi elettromagnetici
- Analisi della stabilità

*Applicazioni dell'analisi spettrale (15ore)*

- Relazione tra trasformata di Fourier e trasformata discreta; campionamento e aliasing
- Fast Fourier Transform e sue applicazioni
- Analisi spettrale basata sulle wavelet
- Discrete Wavelet Transform e sue applicazioni

*Metodi di simulazione nella fluidodinamica dei gas debolmente ionizzati [15ore]*

- Modelli fisico-matematici per la modellizzazione dei gas ionizzati
- Tecniche numeriche per la soluzione di equazioni fluidodinamiche in regime stazionario e nei transitori
- Simulazione numerica di dispositivi per le applicazioni tecnologiche dei plasmi.

### ESERCITAZIONI

Viene introdotto l'ambiente di programmazione MATEAB. Sono sviluppate dei programmi di calcolo relativi agli argomenti trattati a lezione.

**ESAME**

Per sostenere l'esame occorre consegnare una relazione relativa ai 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.

**BIBLIOGRAFIA**

W. Press, S. Teukolsky, W. Vetterling, B. Flannery, *Numerical Recipes*, Cambridge University Press, New York, 1994.

J. Penny, G. Lindfield, *Numerical Methods Using Matlab*, Ellis Horwood, 1995.

R.W. Hockney, J.W. Eastwood, *Computer Simulation Using Particles*, Adam Hilger, Bristol, 1988.

J.H. Ferziger, M. Peric, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer, Berlino, 1996.

I. Daubechies, *Ten Lectures on Wavelets*, SIAM, Washington, 1992.

## Q4240      Progetti e costruzioni nucleari

Anno: 4,5      Periodo:2

Lezioni, esercitazioni, laboratori: 4+4 (ore settimanali); 52+44 (ore nell'intero periodo)

Docente: da nominare

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.

1. Esercizi di ripasso di scienza delle costruzioni. [4 ore]

2. Cerchi di Mohr. Ipotesi di rottura. Esercizi. [4 ore]

3. Tensioni tangenziali nella flessione. Tensioni principali. Calcolo delle curve isostatiche. Esercizi. [8 ore]

4. Travi curve. Esercizi. [4 ore]

5. 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: 5 Periodo: 1

Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+(2) (ore settimanali) 78+18 (ore nell'intero periodo)

Docente: da nominare

La protezionistica 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 i 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 permissibile e principio Alara. Livelli di riferimento e stati di emergenza. Concentrazioni permissibili 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 miscela-

nee. 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: 5      Periodo:2

Lezioni, esercitazioni, laboratori: 3+1 (ore settimanali); 34+12 (ore nell'intero periodo)

Docente: da nominare

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: 5 Periodo: I Lezioni, esercitazioni, laboratori: 70+40 +10 (ore nell'intero periodo)

Docente: **Piero Ravetto**

Il corso affronta le problematiche tipiche della progettazione neutronica dei reattori nucleari. Le tecniche fisico-matematiche presentate trovano applicazione in numerosi campi dell'ingegneria e delle scienze applicate.

### PROGRAMMA

*Trattamento di insiemi di dati sperimentali* [12 ore]

- Incertezze di dati sperimentali; momenti, varianze e correlazioni; misure differenziali e integrali; tecniche di aggiustamento di misure differenziali mediante dati integrali: applicazione del metodo dei minimi quadrati e del principio della massima verosimiglianza; varianza-covarianza dei dati aggiustati.
- Librerie di sezioni d'urto; applicazione delle tecniche di aggiustamento alle librerie di dati nucleari.

*Metodo Monte Carlo* [è8 ore]

- Algoritmi per la generazione di numeri casuali, metodo *rejection*.
- Simulazione del comportamento di sistemi statistici; *unbiased estimators* e fondamenti del metodo Monte Carlo; convergenza statistica e varianza; calcolo di integrali in più dimensioni; problemi connessi allo studio di eventi rari e principali metodi di riduzione della varianza, *importance sampling*.
- Applicazioni allo studio dell'affidabilità di sistemi complessi; applicazioni a calcoli di trasporto neutronico e fotonico e al problema del reattore critico; applicazioni agli schermi e ai blanket dei reattori a fusione di geometria complessa.

*Teoria del trasporto* [18 ore]

- L'equazione del trasporto per i neutroni e i fotoni in forma integro-differenziale ed integrale; 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*; il codice ANISN.
- Il metodo dell'iterazione di sorgente; procedure di accelerazione.

*Teoria delle perturbazioni* [16 ore]

- Il problema aggiunto di un modello fisico; l'equazione aggiunta all'equazione del trasporto integro-differenziale e la funzione importanza; generalizzazione del problema aggiunto: concetto di *detector*.
- Teoria delle perturbazioni generalizzate per funzionali lineari; problemi di radiazione e di trasporto del calore, problemi di affidabilità di sistemi, studio dell'evoluzione di nuclidi, calcolo di barre di controllo nei reattori nucleari.

*Dinamica dei reattori* [16 ore]

- Metodi di separazione: deduzione delle equazioni della cinetica puntiforme, definizione dei parametri cinetici, metodi adiabatici e quasistatici, metodi degli co-modes. Metodi modali e nodali; cinetica inversa.

- Il problema della non linearità; fondamenti fisici della controreazione; risonanze ed effetto Doppler; effetti di temperatura e di concentrazione di nuclidi nei reattori; il funzionale di feedback; metodi modali e nodali, metodi a parametri distribuiti per il calcolo termico.
- Dinamica spaziale in approssimazione asintotica; applicazioni con diversi modelli di rallentamento; teoria della criticità.
- Modelli fisico-matematici per la dinamica di reattori innovativi.

### ESERCITAZIONI E LABORATORI

Nell'ambito del corso, sono proposte due esercitazioni che riguardano applicazioni degli argomenti trattati nelle lezioni del corso. Allo studente è richiesto di mettere a punto i metodi, 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 statistico mediante 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 di trasporto mediante un codice alle ordinate discrete.

Verranno svolte alcune esercitazioni di laboratorio per introdurre gli studenti ai programmi di gestione delle librerie di sezioni d'urto, di trasporto neutronico e fotonico e di simulazione.

### BIBLIOGRAFIA

- \* Y.Yeivin, *Experimental Data Uncertainties; The Adjustment Formalism; Consistency of Parameter and Response Data*, The Hebrew University, Jerusalem (1992).
- \* D.L.Smith, *Probability, Statistics, and Data Uncertainties in Nuclear Science and Technology*, American Nuclear Society, LaGrange Park (1991).
- \* *Monte Carlo Methods in Nuclear Reactor Analysis*, Ispra Course, CCR, Ispra (1984).
- \* A.F.Henry, *Nuclear Reactor Analysis*, MIT Press, Cambridge, MA (1975).
- \* J.J.Duderstadt, L.J.Hamilton, *Nuclear Reactor Analysis*, Wiley, New York (1976).
- \* R.V.Meghreblian, D.K.Holmes, *Reactor Analysis*, Mc-Graw-Hill, New York (1960).
- \* ANISN-PC Manual, *NEA Data Bank*, Gif-sur-Yvette (1990).
- \* M.Salvatores, *La Théorie des Perturbations et les Analyses de Sensibilité*, IRDI/DEDR, CEN, Cadarache (1988).
- \* Z.Ackasu, G.S.Lellouche, L.M.Shotkin, *Mathematical Methods in Nuclear Reactor Dynamics*, Academic Press, New York (1971).

## Q4740 Sicurezza e analisi di rischio

Anno: 4,5      Periodo:2

Lezioni, esercitazioni, laboratori: 4+4 (*ore settimanali*); 90+20 (*ore nell'intero periodo*)

Docente: *da nominare*

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: 4      Periodo: 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**

– *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.

– *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.

– *Ottica applicata.*

*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.

*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 gussiane.

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.

Doppietti acromatici.

*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: 5      Periodo: 2      Lezioni, esercitazioni, laboratori: 60 (ore nell'intero periodo)  
 Docente: da nominare

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 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 e "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.

### PROGRAMMA

– *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.

### ESAME

Verifica orale sui temi trattati a lezione; occasionalmente, tesina scritta su argomento monografico.

## Q5680      **Tecnologie e applicazioni nucleari**

Anno: 5                      Periodo: 1

Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+2 (*ore settimanali*); 76+24 (*ore nell'intero periodo*)

Docente: *da nominare*

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 delle concentrazioni 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 processi 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 triziogeni (*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.

## QA552 Termoidraulica 2

Anno: 4 Periodo: 2

Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+2 (ore settimanali); 80+18+6 (ore nell'intero periodo)

Docente: **Mario Malandrone**

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

– *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]

– *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 termodraulica bifase sui seguenti argomenti:

1. regimi di deflusso, frazione di vuoto e cadute di pressione di miscele bifase; elaborazione dei dati sperimentali acquisiti in laboratorio; [4 ore]
2. applicazione di modelli di calcolo dell'efflusso critico di miscele bifase; [2 ore]
3. scambio termico in regime di ebollizione stagnante; elaborazione dei dati sperimentali acquisiti in laboratorio; [4 ore]
4. scambio termico in regime di ebollizione con deflusso; [3 ore]
5. crisi termica e scambio termico in ultracrisi; [2 ore]
6. condensazione e calcolo di un condensatore; [3 ore]
7. soluzione al calcolatore (facoltativa, v. oltre) di un problema di conduzione-convezione.

## LABORATORIO

Svolgimento di esperienze relative a:

1. regimi di deflusso, frazione di vuoto e cadute di pressione in miscele aria-acqua; [4 ore]
2. 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 Termotecnica del reattore

Anno: 5      Periodo:2

Lezioni, esercitazioni, laboratori: 6+2 (ore settimanali); 80+26 (ore 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 sottocanali aperti.

### PROGRAMMA

- Richiami di impiantistica nucleare; circuito primario di raffreddamento; tipologie geometriche dei sottocanali; 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]
- 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]
- 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]
- 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]
- 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]

– 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]

– Metodi statistici applicati alle tecnologie nucleari: determinazione dei fattori di canale caldo ingegneristici; valutazione statistica del margine di crisi termica. [4 ore]

– 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]

– Illustrazione dello schema di calcolo termoidraulico del canale caldo di un reattore ad acqua. [2 ore]

### ESERCITAZIONI

1. Calcolo termoidraulico del sottocanal caldo del nocciolo di un LWR.
2. Calcolo di scambiatori di calore e di un generatore di vapore di reattori veloci.
3. 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 radiazione**

Anno: 4      Periodo:2

Lezioni, esercitazioni, laboratorio: 80+30+10 (ore nell'intero periodo)

Docente: da nominare

Lo studio dei sistemi fisici costituiti da un numero molto elevato di particelle (quali i neutroni nella materia, i fluidi e i gas ionizzati) linea di principio richiede l'uso di un numero altrettanto elevato di variabili per la loro descrizione. Sovente però i fenomeni di interesse possono venire descritti correttamente per mezzo di pochi parametri macroscopici. Lo scopo principale del corso è appunto mostrare come l'analisi statistica e l'esistenza di scale temporali diverse nell'evoluzione di un sistema permettano una descrizione semplificata ma appropriata ai diversi fenomeni. Inoltre, saranno descritti i modelli cinetici più importanti nello studio dei fenomeni fisici peculiari dei reattori nucleari, inquadrandoli da un punto di vista unitario

**PROGRAMMA***Equazione di Boltzmann per i gas* [15 ore]

Modello semplificato monodimensionale per una miscela di gas, dinamica delle collisioni e sezioni d'urto, derivazione dell'equazione di Boltzmann, teorema H, distribuzione di Maxwell-Boltzmann condizioni al contorno, discussione di apparenti paradossi del modello.

*Derivazione rigorosa delle equazioni cinetiche* [15ore]

Funzioni di densità ad una e più particelle, equazione di Liouville, catena di Bogolyubov-Born-Green-Kirkwood-Yvon, campo autoconsistente, integrale degli urti, ipotesi di Bogolyubov, metodo multiple-time scale.

*Elementi di meccanica statistica* [5ore]

Calcolo delle proprietà macroscopiche di un sistema in equilibrio termodinamico per mezzo di medie temporali, ipotesi ergodica e sue giustificazioni, sistemi non isolati, distribuzione canonica.

*Derivazione delle equazioni dei fluidi a partire dalle equazioni cinetiche* [15ore]

Derivazione e interpretazione fisica dei parametri macroscopici di un fluido a partire dalla distribuzione microscopica, equazioni di continuità, metodo di Chapman-Enskog e soluzioni di ordine zero (equazioni dei fluidi ideali) e di ordine uno (modello di Navier-Stokes-Fourier).

*Equazione del trasporto per i neutroni* [5ore]

Equazione del trasporto lineare, formulazione integrale dell'equazione, modello monocinetico, soluzioni analitiche elementari.

*Distribuzione energetica dei neutroni nella materia e degli elettroni in un gas parzialmente ionizzato* [15ore]

Equazione fondamentale, rallentamento dei neutroni (in idrogeno, rallentamento continuo, funzione di Placzek, calcolo delle risonanze e studio dei mezzi eterogenei), distribuzione energetica degli elettroni (analisi dei diversi processi elementari di interazione, effetto del campo elettrico approssimazione PI).

*Equazioni cinetiche i plasmi* [10 ore]

Equazione di Vlasov, evoluzione di perturbazioni in plasmi non collisionali, two-stream instability smorzamento di Landau, cenni alla propagazione di onde elettromagnetiche nei plasmi non magnetizzati.

## ESERCITAZIONI

Le esercitazioni prevedono: a) la soluzione di problemi relativi alla teoria presentata a lezione b) l'utilizzo di programmi al computer per la simulazione di fenomeni di tipo cinetico.

## BIBLIOGRAFIA

P. Schram, *Kinetic Theory of Gases and Plasmas*, Kluwer Academic Publisher, Londra, 1991.  
 G. Coppa, *Lezioni sull'equazione di Boltzmann*, Politecnico di Torino, 1997. B. Montagnini, *Lezioni di Fisica dei Reattori Nucleare*, Pisa, 1977. K. Huang, *Statistical Mechanics*, Wiley, New York, 1963. Yu. Raizer, *Gas Discharge Physics*, Springer, Berlino, 1991.

## PROGRAMMA

Il corso si svolgerà attraverso l'esame di alcuni casi studio rilevanti della storia del pensiero scientifico (come hanno fatto in fondo Kuhn con la rivoluzione copernicana, Feynabend con il metodo in modo da mettere in luce l'epistemologia e la codifica del metodo scientifico a diversi livelli di astrazione dalle congetture empiriche ai modelli matematici, alle teorie e alle leggi, e quelle generali. Per definire la natura della epistemologia scientifica, si discuteranno le diverse funzioni e tipi dei modelli, l'organizzazione e la portata degli esperimenti, la natura delle teorie, affrontando quindi i temi classici della verifica, falsificazione e talvolta rifiuto delle ipotesi. Su questa base si potranno affrontare anche i temi più generali del rapporto tra scienza e metafisica, del riduzionismo, delle rivoluzioni scientifiche, nonché il ruolo delle influenze sociali e dei condizionamenti psicologici. Questo allargamento di orizzonti potrà essere realizzato anche in forma seminariale, con coinvolgimenti di gruppi di studenti interessati all'uno o all'altro dei temi.

## BIBLIOGRAFIA

K. G. J. van Driel, *Understanding Scientific Reasoning*, Holt, Rinehart and Winston, New York, 1981.

## Programmi delle discipline delle scienze umanistiche

### UM001 Metodologia delle scienze naturali (Il metodo scientifico)

Il corso si propone di introdurre le problematiche della filosofia della scienza. Nella cultura contemporanea, il metodo scientifico è stato riconosciuto come una complessa manifestazione di tecniche e ragionamenti - non regole che garantiscono la certezza - con una maggiore consapevolezza anche delle influenze culturali, delle politiche delle istituzioni e della struttura psicologica del ricercatore.

La filosofia della scienza ha visto negli ultimi anni una reazione al neopositivismo e un periodo di discussioni storiche e filosofiche su scienza normale e rivoluzioni, progresso e incommensurabilità delle teorie; quindi si è rivolta alle condizioni al contorno, materiali e culturali, del lavoro scientifico, arricchendosi di contributi della sociologia e delle scienze cognitive; i nomi portanti di questo sviluppo sono quelli di Popper, Quine, Kuhn, Feyerabend, Barnes e Latour.

Il riconoscimento della varietà e storicità del metodo scientifico non significa tuttavia che non si possa riconoscere nell'attività dello scienziato un arsenale di criteri, tecniche e procedure che caratterizzano la proposizione e la verifica di ipotesi e teorie, e che le distinguono dall'argomentazione non scientifica, puramente retorica, o semplicemente sbagliata. Il tentativo di caratterizzare questo "metodo scientifico", se non di giustificarlo, è l'obiettivo della filosofia della scienza.

#### **PROGRAMMA**

Il corso si svolgerà attraverso l'esame di alcuni case studies rilevanti della storia del pensiero scientifico (come hanno fatto in fondo Kuhn con la rivoluzione copernicana, Feyerabend con Galileo) in modo da mettere in luce l'articolazione e la codifica del metodo scientifico a diversi livelli di astrazione, dalle correlazioni statistiche ai modelli matematici, alle teorie a medio raggio, a quelle generali. Per definire la natura della spiegazione scientifica, si preciseranno le diverse funzioni e tipi dei modelli, l'organizzazione e la portata degli esperimenti, la natura delle teorie, affrontando quindi i temi classici della verifica, corroborazione o falsificazione delle ipotesi. Su questa base si potranno affrontare anche i temi più generali del rapporto tra scienza e metafisica, del riduzionismo, delle rivoluzioni scientifiche, nonché il ruolo delle influenze sociali e dei condizionamenti psicologici.

Questo allargamento di orizzonti potrà essere realizzato anche in forma seminariale, con approfondimenti di gruppi di studenti interessati all'uno o all'altro dei temi.

#### **BIBLIOGRAFIA**

R.N. Giere, *Understanding Scientific Reasoning*, Holt, Reinhart and Winston, New York, 1985

G. Lolli, *Capire la matematica*, Il Mulino, Bologna, 1996

T. L. Wolpert, *The Unnatural Nature of Science*, Faber&Faber, London, 1992  
 oltre a una scelta di alcuni classici della filosofia della scienza  
 contemporanea sopra citati

### ESAME

L'esame prevederà a fianco della prova orale anche la presentazione di una relazione scritta su un autore o un tema su cui gli studenti abbiano svolto una ricerca o una lettura di approfondimento, secondo le loro preferenze.

### PROGRAMMA

Il corso si svolgerà attraverso l'analisi di alcuni casi studio rilevanti della storia del pensiero scientifico (come hanno fatto in fondo Kahn con la rivoluzione cognitiva, Popper con l'fallibilismo in modo da mettere in luce l'ambiguità e la complessità del metodo scientifico e diversi livelli di astrazione, dalle correlazioni statistiche ai modelli matematici, alle teorie a medio raggio, a quelle generali). Per definire la natura della spiegazione scientifica si discuteranno le diverse funzioni e tipi dei modelli, l'organizzazione e la portata degli esperimenti, la natura delle teorie, affrontando punti e temi classici della verifica, corroborazione o falsificazione delle ipotesi. Se questa parte si parlano altrettanto anche i tenti più generali del rapporto tra scienza e istituzioni, del riduzionismo, delle rivoluzioni scientifiche, nonché il ruolo delle influenze sociali e dei condizionamenti psicologici. Questo abbinamento di orizzonti potrà essere realizzato anche in forma seminariale, con approfondimenti di gruppi di studenti interessati al suo o all'altro dei temi.

### BIBLIOGRAFIA

R. W. Coare, *Understanding Scientific Reasoning*, Holt, Reinhart and Winston, New York, 1982

## UM002 Propedeutica filosofica

Il corso si propone di illustrare, ad un livello elementare, concetti, metodi ed esempi della ricerca filosofica attuale, in vari campi ( metafisica, filosofia del linguaggio, filosofia della mente, filosofia morale). Verrà sottolineata la struttura argomentativa del discorso filosofico, cioè si cercherà di mettere in evidenza in che modo-con quali argomenti-vengono sostenute le varie tesi filosofiche di volta in volta esaminate.

### PROGRAMMA

- Filosofia( possibili definizioni di filosofia, esempi di ciò che la filosofia è stata in passato, che cos'è la filosofia oggi).
- Linguaggio, concetti e significati (che cos'è un concetto? Concetti e parole. Regole. Concetti come enti mentali. Concetti e realtà).
- Mente e cervello (dualismo-riduzionismo- funzionalismo).
- Verità, giustificazione, verificaione (realismo metafisico, realismo interno, verificazionismo).
- Progresso( scientifico, tecnologico, sociale, morale).
- Il bene e la giustizia.
- Senso della storia e senso della vita.

### BIBLIOGRAFIA

T.Nagel. *Una brevissima introduzione alla filosofia*. Il Saggiatore.

Verranno inoltre letti un certo numero di testi filosofici contemporanei, parecchi dei quali si trovano in M.Messeri. *Filosofia contemporanea*. Zanichelli

### ESAME

Una prova scritta alla fine del corso, e una breve relazione (10-12 cartelle) su un argomento concordato con il docente.

## UM007 Teoria dei linguaggi

### PROGRAMMA

- Alcuni concetti fondamentali  
   sintassi, semantica, pragmatica  
   sintagma, enunciato; proposizione, termine singolare (nomi propri, descrizioni)
- Punti di vista sul linguaggio :  
   linguistica  
   teoria dei linguaggi formali  
   filosofia del linguaggio (semantica filosofica)  
   psicologia (psicolinguistica)  
   intelligenza artificiale (elaborazione del linguaggio naturale)  
   semiologia
- Sintassi  
   L'evoluzione del programma di Chomsky  
   La fase attuale della grammatica generativa  
   Altre teorie sintattiche
- Semantica  
   Concetti introduttivi: senso, denotazione, forma logica  
   Stereotipi e prototipi  
   Semantica formale e sua applicazione alle lingue naturali  
   Semantica linguistica (analisi componenziale, relazioni di senso)  
   Strutture semantiche impiegate in intelligenza artificiale
- Pragmatica  
   Teoria degli atti linguistici  
   Teoria della conversazione

### BIBLIOGRAFIA

- M.Santambrogio (a cura di), *Introduzione alla filosofia analitica del linguaggio*, (Laterza), Roma-Bari 1992;  
 P.Casalegno, *Filosofia del linguaggio*, (la Nuova Italia Scientifica), Roma 1997.

### ESAME

L'esame prevederà a fianco della prova orale anche la presentazione di una relazione scritta.

## UM004 Sociologia delle comunicazioni di massa

Il corso mira a dotare gli studenti di strumenti critici utili

- da un lato a usare e comprendere fattivamente gli usi e le funzioni della comunicazione nei diversi ambiti produttivi nei quali si troveranno a operare,
- dall'altro ad acquistare consapevolezza critica della presenza e del ruolo dei media nei diversi aspetti della vita sociale, una consapevolezza oggi necessaria per una responsabile partecipazione civica, qual è richiesta in particolare a chi esercita funzioni direttive e gestionali.

Il Corso avrà pertanto carattere interdisciplinare (con punti di vista sociologici, economici, culturali) e sarà dedicato non ad alcuni singoli mezzi di comunicazione, ma all'intero quadro sistemico dei media. Verrà fornita un'analisi d'insieme delle relazioni e interdipendenze organizzative, economiche e sociali, esistenti fra i diversi comparti dell'industria della comunicazione: i "vettori" (posta e telecomunicazioni), il "broadcasting" (radio, TV, TV-cavo), l'"editoria" (incluso in questo concetto non solo libri e giornali, ma anche produzione discografica, cinematografica, home video, fino al software informatico), l'"hardware", ovvero i beni strumentali.

Particolare attenzione sarà dedicata da un lato alle strutture professionali e all'organizzazione dei vari settori dell'industria dei media, dall'altro alle nuove tecnologie oggi emergenti e ai nuovi settori produttivi nascenti dall'incontro o "convergenza" tra i media in precedenza separati.

### PROGRAMMA

- Comunicazione: definizioni e quadro teorico
- Le comunicazioni di massa e l'industrializzazione della cultura
- La comunicazione e la vita delle imprese
- L'attuale sistema dei media
- Prospettive di evoluzione
- Il caso italiano.

### BIBLIOGRAFIA

P.Ortoleva, *Comunicazione e cambiamento sociale nel mondo contemporaneo*, (Pratiche), Parma 1995;

G.Cesareo e P.Roda, *Il mercato dei sogni*, (Il Saggiatore), Milano 1996;

E.Pucci (a cura di), *L'industria della comunicazione in Italia*, (Guerini), Milano 1996

### ESAME

L'esame prevederà a fianco della prova orale anche la presentazione di una relazione scritta.

## UM003 Sociologia del lavoro

Scopo del corso è esaminare modi e forme di utilizzazione economica e sociale delle innovazioni tecnologiche. Particolare attenzione verrà dedicata all'analisi delle relazioni esistenti tra innovazioni tecnologiche e innovazioni organizzative nelle imprese dell'industria e dei servizi. L'idea di fondo è che la diffusione delle innovazioni tecnologiche richiede adattamenti e innovazioni radicali nelle strutture organizzative delle imprese economiche, oltre a notevoli investimenti in istruzione e formazione professionale. A loro volta, le innovazioni organizzative - dal mutamento dei sistemi manageriali di controllo e dell'organizzazione del lavoro sino alle modifiche delle interfacce uomo-macchina - adattano le tecnologie alle esigenze produttive e del lavoro umano e contribuiscono a modificarle in misura rilevante.

### PROGRAMMA

1. Alcuni concetti fondamentali della sociologia dell'azione sociale e della metodologia della ricerca sociologica;
2. Le relazioni tra processi di globalizzazione, innovazioni tecnologiche e occupazione - nei paesi europei e negli USA. Particolare attenzione verrà dedicata all'analisi delle politiche (riguardanti l'istruzione e la formazione professionale, il mercato del lavoro, le politiche pubbliche di *welfare*, l'innovazione di prodotti e di processi) messe in atto in questi paesi al fine di stimolare lo sviluppo economico e l'occupazione;
3. Le innovazioni organizzative (come il *re-engineering* o i programmi di *total quality management*) che accompagnano, stimolano e modificano l'introduzione delle tecnologie dell'informazione nelle organizzazioni industriali e dei servizi.
4. Le patologie dei sistemi tecnologici complessi - illustrate negli ultimi decenni da una serie di incidenti maggiori, da Seveso a Three Mile Island, Chernobyl, Bophal etc. Verranno in particolare definiti i concetti di interfaccia e di interazione uomo-macchina, di logica della progettazione e logica di utilizzazione dei sistemi tecnologici complessi, di organizzazione affidabile ed esaminate alcune teorie organizzative degli incidenti tecnologici.

Gli studenti saranno invitati a scrivere e presentare studi del caso riguardanti uno o più incidenti tecnologici maggiori. In questo caso saranno esonerati dal presentare all'esame il testo a scelta sub 4.

### BIBLIOGRAFIA

R. Boudon (a cura di), *Trattato di sociologia*, Bologna, Il Mulino, 1995 (solo la "Introduzione" (pp. 13-26) e i capp. 1: "Azione", pp. 27-62, e VIII: "Organizzazione", pp. 323-358 e XII: "Conoscenza", pp. 461-500).

A. Marradi, *Concetti e metodi per la ricerca sociale* in M. Cardano, R. Miceli, *Il linguaggio delle variabili*, Torino, Rosenberg & Sellier, 1991, par. 1 e 2, pp. 17-53.

A. Baldissera, *La tecnologia difficile*, Torino, Tirrenia Stampatori, 1992.

Un testo a scelta tra:

A. Baldissera, *La modernizzazione difficile*, Torino, Tirrenia Stampatori, 1992.

Hammer & J. Champy, *Ripensare l'azienda. Un manifesto per la rivoluzione manageriale*, Milano, Sperling & Kupfer, 1994.

Landes D.S., *Prometeo liberato. Trasformazioni tecnologiche e sviluppo industriale nell'Europa occidentale dal 1750 ai giorni nostri*, Torino, Einaudi, 1978.

T. Ohno, *Lo spirito Toyota*, Einaudi, Torino, 1993.

N. Rosenberg, *Exploring the black box: technology, economics and history*, Cambridge, Cambridge University Press, 1994.

de Terssac, *Come cambia il lavoro. Efficacia, autonomia, valorizzazione delle competenze*, Milano, Etas Libri, 1994.

## UM008 Storia del diritto italiano

Il corso intende presentare ad uno studente privo di veri concetti giuridici alcuni principi basilari per la conoscenza del nostro attuale diritto attraverso la riflessione storica della loro formazione. Esso si prefigge di illustrare alcuni punti di partenza essenziali per conoscere il nostro attuale diritto e quindi eventuali futuri approfondimenti sui problemi specifici.

### PROGRAMMA

- Fondamenti del diritto. Dimensione storica del valore di: giustizia, equità, diritto, fonti del diritto, norma giuridica, ordinamento giuridico, legge, consuetudine, giurisprudenza, dottrina giuridica, ordinamento giudiziario, principi generali del diritto.
- Interpretazione del diritto. La norma e la sua applicazione al caso concreto. La statualità del diritto. Posizione del giudice. Interpretazione e sue diverse manifestazioni. Norma, giudice, giurista nell'esperienza giuridica italiana.
- Lo Stato. Formazione dello Stato moderno e sua evoluzione. Elementi costitutivi. Tipi di Stato. Ordinamenti sovrastatali.
- Il sistema giuridico italiano. Dimensione storica del fenomeno e passaggio dalla situazione dell'età moderna a quella contemporanea.
- Evoluzione delle diverse fonti del diritto. Situazione attuale e gerarchia delle norme. Costituzione, codici, leggi, decreti ecc.; la decodificazione. Presentazione della situazione presente e dell'approccio alla conoscenza del diritto vigente. Il sistema giuridico italiano nel panorama europeo: passato e presente. I grandi sistemi giuridici contemporanei.

### BIBLIOGRAFIA

Non esistendo uno specifico manuale, i testi di riferimento saranno indicati nel corso dell'anno e potranno essere reperiti con fotocopie o altri strumenti con riferimento ai singoli argomenti trattati.

### BIBLIOGRAFIA

- R. Bondon (a cura di), *Trattato di sociologia*, Bologna, il Mulino, 1993 (solo la "Introduzione" (pp. 13-26) e i capp. I, "Azione", pp. 27-62, e VIII, "Organizzazione", pp. 323-338 e XII, "Conoscenza", pp. 461-500).
- A. Miccili, *Cooperare e metodi per la ricerca sociale* in M. Cauteris, A. Miccili, *Il linguaggio delle variabili*, Torino, Rosenberg & Sellier, 1991, par. 1 e 2, pp. 17-33.
- A. Baldassera, *La tecnologia difficile*, Torino, Tirrena Stampatori, 1992.
- Un testo a scelta tra:
- A. Baldassera, *La modernizzazione difficile*, Torino, Tirrena Stampatori, 1992.

## UM005 Storia della filosofia contemporanea

### PROGRAMMA

Breve storia della filosofia novecentesca centrato sul tema del rapporto tra "humanities" e mondo tecnico-scientifico: il filo conduttore è dunque ciò che la filosofia novecentesca (e non solo la filosofia in senso stretto: anche autori e testi di campi affini, come: letteratura, sociologia, tecnologia...) ha pensato circa la configurazione principalmente tecnoscientifica del mondo contemporaneo: posizioni polemiche, spesso, ma anche teorie che guardano alla scienza sperimentale come modello di conoscere "vero", e alla tecnologia come a luogo di sperimentazione per una nuova forma di umanità. Il corso non privilegia (anche se non ignora) le riflessioni filosofiche sulla scienza, non è cioè un corso di epistemologia; e anzi ritiene indispensabile allargare la prospettiva sulla storia delle idee nel senso più generale della parola.

### ESAME

L'esame prevederà a fianco della prova orale anche la presentazione di una relazione scritta.

## UM006 Storia della tecnica

Il corso vuole fornire agli studenti la capacità di inquadrare gli oggetti e i sistemi tecnici nella loro prospettiva storica. A tal fine il corso prende l'avvio da alcune fondamentali premesse sul concetto di storia, sul ruolo e sulle finalità della ricerca storica, e specificamente sul significato della storia della tecnologia e sulla sua storiografia. Nel seguito sono passati in rassegna i sistemi tecnici più significativi, a partire da alcuni cenni sul mondo antico sino a focalizzare l'attenzione sul mondo contemporaneo. È dato ampio spazio alle problematiche della tecnica nel XIX e XX secolo.

### PROGRAMMA

- La storia come scienza. Le scritture, i documenti, la ricerca storica.
  - I temi e le idee della storia. Cronologia e storia. La storia e "le storie". Le scritture come fondamento della storia: il documento. La storia della tecnica e la sua storiografia. La storia della tecnica e la storia della scienza. Gli strumenti della storia della tecnica.
- Dal mondo antico al Medioevo (cenni).
- Dal Rinascimento al Seicento.
  - La "scienza nuova" e il passaggio "dal mondo del pressappoco all'universo della precisione" (A.Koyré): La nascita della metallurgia nel '500; la "meccanica" da Guidobaldo del Monte a Galilei a Newton; la nascita delle Accademie e delle istituzioni scientifiche.
- Il Settecento e la coscienza della tecnologia.
  - L'Illuminismo e le Enciclopedie. La Rivoluzione industriale in Gran Bretagna. L'industria dei metalli e gli arsenali. Il vapore. L'istruzione tecnica.
- L'Ottocento e il trionfo delle macchine.
  - Il macchinismo e la diffusione del sistema di fabbrica: Inghilterra, Francia, Germania, Italia. La nascita dell'elettricità. I sistemi tecnici: il telegrafo; le ferrovie; l'industria chimica. I politecnici e le scuole di ingegneria. La diffusione del sapere tecnico: le Esposizioni industriali; i brevetti. L'ottimismo "fin-de-siècle".
- Le crisi e le speranze del XX secolo
  - Le costruzioni in ferro e in cemento armato. La nascita dell'aeronautica. Il sistema industriale e il modello tayloristico. I grandi sistemi tecnici: elettricità, telecomunicazioni, trasporti. I limiti dello sviluppo. Le rivoluzioni informatiche.

### LABORATORIO

Durante il corso, gli studenti a gruppi affronteranno la lettura critica di testi significativi della storiografia dei sistemi tecnici, con particolare riferimento al secolo XX e i cui risultati saranno oggetto di discussione collettiva durante le esercitazioni.

**BIBLIOGRAFIA**

Marchis, *Storia delle macchine*, (Ed. Laterza), Roma-Bari 1994;

V. Marchis (a cura di), *Storia delle scienze. vol.V (Conoscenze scientifiche e trasferimento tecnologico)*, (Einaudi), Torino 1995.

**ESAME**

L'esame prevederà a fianco della prova orale anche la presentazione di una relazione scritta.

00132 Analisi matematica 2	19
00514 Calcolo numerico	21
00628 Chimica	13
00949 Costruzione di macchine	26
01436 Disegno tecnico industriale	27
01715 Elettronica industriale	19
01750 Elettrotecnica	31
01901 Fisica 1	38
01902 Fisica 2	36
01965 Fisica dei reattori a fissione + Fisica dei reattori a fusione	42
02040 Fisica nucleare	44
02176 Fondamenti di informatica	46
02380 Geometria	41
02775 Impianti nucleari + Ingegneria dei reattori nucleari a fissione I	52
02940 Intuisioni di economia	55
03150 Macchine	56
03161 Meccanica analitica	58
03169 Meccanica applicata alle macchine	60
03200 Metodi matematici per l'ingegneria	62
03270 Misure e strumentazione nucleari	65
03300 Scienza delle costruzioni	45
03370 Scienza e tecnologia dei materiali nucleari	67
03400 Termodinamica applicata	78
03410 Teoria dei fluidi	75

## Indice alfabetico per insegnamento

<b>PROGRAMMI DEGLI INSEGNAMENTI OBBLIGATORI</b>	<b>16</b>
Q0231 Analisi matematica 1	17
Q0232 Analisi matematica 2	19
Q0514 Calcolo numerico	21
Q0620 Chimica	23
Q0940 Costruzione di macchine	26
Q1430 Disegno tecnico industriale	27
Q7210 Elettronica industriale	29
Q1790 Elettrotecnica	31
Q1901 Fisica 1	35
Q1902 Fisica 2	38
Q1965 Fisica dei reattori a fissione + Fisica dei reattori a fusione	42
Q2040 Fisica nucleare	44
Q2170 Fondamenti di informatica	46
Q2300 Geometria	49
Q2775 Impianti nucleari + Ingegneria dei reattori nucleari a fusione I	52
Q3040 Istituzioni di economia	55
Q3110 Macchine	56
Q3204 Meccanica analitica	58
Q3210 Meccanica applicata alle macchine	60
Q3480 Metodi matematici per l'ingegneria	62
Q8390 Misure e strumentazione nucleari	63
Q4600 Scienza delle costruzioni	65
Q4670 Scienza e tecnologia dei materiali nucleari	67
Q5950 Termodinamica applicata	70
QA552 Termoidraulica 1	72

## PROGRAMMI DEGLI INSEGNAMENTI D'ORIENTAMENTO

	75
Q0010 Acceleratori di particelle	75
QA370 Dinamica e controllo degli impianti nucleotermoelettrici	76
Q1830 Energetica e sistemi nucleari	79
Q2024 Fisica e ingegneria dei plasmi	81
Q2030 Fisica matematica	82
Q2772 Impianti nucleari 2	85
Q2934 Ingegneria dei reattori nucleari a fusione 2	87
Q3090 Localizzazione dei sistemi energetici	89
Q3390 Meccanica statistica	91
Q3470 Metodi matematici per i reattori nucleari	93
Q4240 Progetti e costruzioni nucleari	95
Q4410 Protezione e sicurezza negli impianti nucleari	96
Q4434 Radioattività	98
Q4460 Reattori nucleari avanzati	100
Q4740 Sicurezza e analisi di rischio	102
Q5310 Strumentazione fisica	104
Q5404 Superconduttività	106
Q5680 Tecnologie e applicazioni nucleari	108
QA552 Termoidraulica 2	111
Q6010 Termotecnica del reattore	114
Q6050 Trasporto di particelle e di radiazione	116

<b>PROGRAMMI DELLE DISCIPLINE DELLE SCIENZE UMANISTICHE</b>	<b>119</b>
UM001 Metodologia delle scienze naturali (Il metodo scientifico)	119
UM002 Propedeutica filosofica	121
UM007 Teoria dei linguaggi	122
UM004 Sociologia delle comunicazioni di massa	123
UM003 Sociologia del lavoro	124
UM008 Storia del diritto italiano	126
UM005 Storia della filosofia contemporanea	127
UM006 Storia della tecnica	128