

CORSO DI LAUREA IN
INGEGNERIA
NUCLEARE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA NUCLEARE

Il corso di laurea in Ingegneria Nucleare è senza dubbio tra quelli di più recente istituzione. Solo dopo la seconda guerra mondiale apparve chiaro nelle società maggiormente industrializzate che il problema energetico avrebbe condizionato lo sviluppo e che le riserve fossili non avrebbero tardato a rivelarsi inadeguate alla crescente domanda.

Fra tutte le tecnologie di approvvigionamento energetico quella, ormai consolidata, dei reattori di potenza a fissione e quella, ancora in fase di ricerca e sviluppo, dei reattori a fusione apparvero, fin da quegli anni, le due principali, cui si potesse razionalmente demandare la soluzione del problema energetico mondiale, sia nel futuro immediato che lontano. Ciò almeno per quanto riguarda quella cospicua frazione del fabbisogno energetico totale, che viene utilizzata previa conversione in elettricità.

In base a queste considerazioni, a partire dalla fine degli anni '50, vennero istituiti anche in Italia, presso i Politecnici e numerose Facoltà di Ingegneria, i corsi di laurea in Ingegneria Nucleare. Nel loro ambito sono oggi sistematicamente approfonditi gli studi sugli aspetti impiantistici dei reattori di potenza cosiddetti provati, sia per quanto attiene alla specificità termotecnica e meccanica di questi impianti, dal punto di vista dell'ingegneria della produzione-trasformazione energetica, sia per gli aspetti fisici, legati alla natura nucleare e non chimica della fonte primaria.

La categoria di ingegneri che la laurea nucleare ambirebbe formare è, in certa misura, inconsueta. Oltre ai fondamenti dell'impiantistica convenzionale, essi devono conoscere un po' più a fondo dei colleghi le leggi fisiche della struttura del nucleo, dei legami atomici nelle molecole e nei cristalli, l'interazione tra il campo elettromagnetico e le particelle elementari, coll'obiettivo di poter valutare, gestire e eventualmente perfezionare macchine, materiali e sistemi di controllo, per il cui funzionamento le leggi di cui sopra sono fondamentali e non soltanto accessorie.

Dato che prestazioni, affidabilità e sicurezza degli impianti nucleari devono poter raggiungere livelli molto elevati, e che spesso non esiste ancora una netta delimitazione tra progresso della ricerca e realizzazione industriale, è evidente che nella propria formazione e professione l'ingegnere nucleare dovrà affrontare metodologie teoriche e di calcolo di una certa sofisticazione. È auspicabile che ne possa estendere in futuro l'applicazione ad altri settori della energetica e dell'ingegneria in generale.

Esiste inoltre, per così dire, una seconda anima dell'ingegneria nucleare: quella che le proviene dall'essersi cimentata fin dall'origine in campi nei quali esisteva una forte spinta all'innovazione. Ciò ha prodotto, nell'allievo e nel professionista nucleare, una maggiore propensione ed attitudine ad occuparsi di ricerca, in molti settori della fisica applicata, dell'ingegneria avanzata, dei controlli, dei materiali, delle radiazioni, della sicurezza, ecc..

Ciò non deve tuttavia indurre chi si accinge a frequentare questo Corso di laurea a considerarla in qualche modo una variante di un corso di laurea in Fisica (Applicata). Qui la finalizzazione ingegneristico-impiantistica è netta e prevalente, a prescindere dal fatto che alcuni dei tre indirizzi si presentino con una caratterizzazione apparentemente più teorica e con rilevanti implicazioni di tipo fisico e fisico-matematico.

Gli indirizzi sono tre, sufficientemente diversificati da rispondere alla maggior parte della domanda culturale degli allievi, ed orientati a dare una formazione professionale che permetta loro di trovare sbocco in qualcuno dei settori caratteristici dell'industria o dei laboratori di ricerca.

- **Indirizzo termoidraulico-strutturistico.** L'indirizzo termoidraulico-strutturistico è impiantistico, cioè finalizzato alla progettazione, costruzione ed esercizio degli impianti nucleari di potenza. Viene approfondito lo studio del funzionamento dell'impianto dal punto di vista termofluidodinamico per preparare alla progettazione termoidraulica del nocciolo, sia dei reattori termici che veloci, e dei suoi componenti principali dal punto di vista del progetto meccanico-strutturale e dell'affidabilità, in condizioni d'esercizio e di incidente. È posta inoltre particolare enfasi sui metodi numerici di calcolo delle strutture, sia in campo statico, sia in campo dinamico. La preparazione è finalizzata a svolgere attività professionale in settori in cui è richiesta una conoscenza dei moderni metodi di progettazione, termoidraulica e termomeccanica, utilizzabili anche per componenti convenzionali e particolarmente per sistemi complessi.
- **Indirizzo neutronico-controllistico.** Approfondisce gli aspetti essenziali della fisica dei reattori e della neutronica applicata, sia statica sia dinamica, con lo scopo di preparare alla progettazione neutronica delle centrali di potenza e a svolgere lavoro di ricerca applicata anche nel settore del ciclo di combustibile. Vengono in particolare approfonditi, anche con metodi di teoria del trasporto, quei problemi connessi con la dinamica neutronica spaziale che sono fondamentali per il calcolo della potenza locale nei reattori di incidente. Analizza inoltre i problemi della stabilità, della regolazione e del controllo degli impianti di potenza nel loro complesso, con particolare riguardo alla protezione e sicurezza nucleare. Sono affrontati i criteri e i metodi per la progettazione dei sistemi di controllo e regolazione negli impianti termoidraulici, convenzionali e non, e per lo studio del comportamento dinamico di sistemi complessi.
- **Indirizzo fisico strumentale.** È orientato alla formazione di tecnici e ricercatori in vari settori della fisica applicata, in modo particolare della fisica del nucleo e degli stati aggregati della materia. Fornisce inoltre strumenti di base per operare nel settore energetico in senso lato, approfondendo problematiche fisiche non solo dell'energia nucleare convenzionale, ma dei plasmi (fusione) e della conversione fotovoltaica dell'energia solare. Fornisce infine una preparazione specialistica nel campo delle radiazioni e della strumentazione fisica.

Uno spazio crescente è dedicato in molti corsi all'analisi di nuovi tipi di reattori, sia avanzati che a sicurezza intrinseca.

È previsto inoltre che gli allievi nucleari, mediante una appropriata scelta di corsi esistenti in statuto, possano conseguire una preparazione, almeno propedeutica, nel settore dei materiali, energetici e non, rilevanti per l'industria nucleare.

Nei principali corsi specialistici verranno dedicati alcuni capitoli alla fusione nucleare sia dal punto di vista dei principi fisici (fisica dei plasmi, campi magnetici) che dal punto di vista tecnologico (attivazione neutronica e resistenza dei materiali, scambio termico), con particolare riferimento alle problematiche delle attuali macchine per lo studio sperimentale della fusione nucleare controllata. Bisogna segnalare infine che nell'ambito del Corso di Perfezionamento in Energetica vengono tenuti numerosi seminari sulla fusione nucleare e sull'impatto ambientale dei sistemi energetici.

GUIDA ALLA PREPARAZIONE DEI PIANI DI STUDIO INDIVIDUALI E AGLI INDIRIZZI DEL CORSO DI LAUREA

Le osservazioni qui riportate intendono evidenziare i criteri seguiti dalla Commissione per l'esame dei piani individuali nella formulazione del giudizio di accettazione dei singoli piani presentati dagli studenti nucleari. Queste considerazioni possono consentire al singolo allievo di preparare con maggior precisione e consapevolezza il proprio piano individuale senza far riferimento a notizie non controllate o a tradizioni di scelta consolidate nel tempo ma forse non più giustificate.

Sulla base dei criteri di approvazione dei piani individuali degli studenti nucleari (criteri riportati sulla Guida dello Studente), si osserva che le norme per l'approvazione dei piani individuali prevedono l'inserimento nel piano stesso di:

- un gruppo di 15 materie obbligatorie per legge, da mantenere in ogni caso nel piano di studio.

Il gruppo comprende, oltre alle materie propedeutiche e a quelle di base del Triennio di Ingegneria, comuni ai vari Corsi di Laurea della Facoltà secondo le attuali disposizioni di legge, le 3 discipline, Complementi di Matematica, Fisica del Reattore Nucleare, Impianti Nucleari. Queste tre materie sono essenziali per un corretto orientamento dell'allievo ai problemi dell'Ingegneria Nucleare. Nel campo della matematica con il corso di Complementi di Matematica, indirizzato esclusivamente agli allievi nucleari, si completa e si rende specifica la preparazione del biennio; nel campo della fisica dei reattori nucleari, la disciplina omonima fornisce le basi per comprendere il funzionamento statico e dinamico dei reattori a fissione dal punto di vista del bilancio neutronico; nel campo dell'impiantistica il corso di Impianti Nucleari raccorda gli insegnamenti del Triennio con i corsi applicativi specialistici degli indirizzi.

- un gruppo di 8 materie le quali, pur facendo parte delle discipline di base dell'ingegneria convenzionale e nucleare, possono in alcuni casi particolari di piano individuale essere scelte in numero più limitato (ma non inferiore a 6), per consentire un più ampio spazio alle materie di indirizzo.

L'eventuale riduzione nel numero di tali materie non va comunque operata con criteri casuali, ma deve salvaguardare la logica dell'indirizzo che l'allievo intende seguire.

A titolo di esempio la scelta dell'indirizzo Termoidraulico-strutturistico non dovrebbe prescindere dall'inserimento di Complementi di Impianti Nucleari, di Costruzione di macchine e Macchine, la scelta dell'indirizzo Neutronico-controllistico dall'inserimento di Elettronica Nucleare, e Complementi di Impianti Nucleari, la scelta dell'indirizzo Fisico-strumentale dall'inserimento di Fisica Atomica e Fisica Nucleare.

- un blocco coordinato di almeno 6 insegnamenti di indirizzo, da desumere da un elenco di 28 materie comprendente tutte le discipline presenti nei vari indirizzi del Corso di Laurea Nucleare, alle quali sono state aggiunte discipline di altri corsi di laurea in Ingegneria, di interesse per un ingegnere nucleare; gli argomenti relativi a quest'ultime discipline trattano di scienza dei materiali, fisica dello stato solido, fisica dei plasmi, teoria e pratica delle misure, vibrazioni, ingegneria sismica, ecc.

L'allievo ha ampia discrezionalità nello scegliere tra le 28 materie dell'elenco sopracitato il gruppo di discipline che lo interessino particolarmente (in un numero compreso tra 6 e 8), con l'unica avvertenza che tale scelta non vanifichi l'esistenza degli indirizzi del Corso di Laurea Nucleare, nella forma proposta dalla Facoltà.

È richiesto pertanto che non meno di 6 delle discipline da scegliere in tale blocco coordinato appartengano ad un unico indirizzo del Piano Ufficiale e che tale indirizzo venga segnalato dallo studente.

La grande varietà di sbocchi professionali cui è portato un ingegnere nucleare è la ragione per la quale la Commissione ha mantenuto operativo il principio che consente allo studente di inserire nel proprio piano di studi di 29 materie una disciplina libera da vincoli, relativa ad altri corsi di laurea in Ingegneria, o addirittura tratta da altre Facoltà (Architettura, Scienze Fisiche, Matematiche, Naturali, Medicina, Economia e Commercio, ...). È richiesto naturalmente che la disciplina in oggetto si inquadri nel piano di studio individuale in modo corretto e che si possa riconoscere in tale scelta il raggiungimento di un obiettivo logico e coerente.

INDIRIZZO TERMOIDRAULICO-STRUTTURISTICO

L'indirizzo termoidraulico-strutturistico è caratterizzato da corsi rivolti:

- all'approfondimento della conoscenza dei fenomeni di scambio termico e del moto dei fluidi in regime monofase con particolare, anche se non esclusivo, riferimento alle applicazioni nucleari (Termocinetica degli impianti nucleari);
- all'analisi dei fenomeni di fluidodinamica e di scambio termico associati ai deflussi in regime bifase tipici dei reattori ad acqua ma importanti ai fini del progetto e del corretto esercizio di tutti gli impianti termoelettrici e più in generale dell'impiantistica termotecnica ove il fluido di processo sia soggetto a cambiamento di fase (Termoidraulica bifase degli impianti nucleari);
- alla progettazione termoidraulica di componenti e sistemi attinenti all'impiantistica nucleare con riferimento ai reattori termici e veloci e ai reattori a fusione (Termotecnica del reattore);
- all'analisi dei processi fondamentali del ciclo del combustibile nucleare e alla tecnologia dei materiali sia per reattori a fissione che a fusione (Tecnologie nucleari);
- al calcolo di componenti soggetti a sforzi meccanici e termici (Calcolo strutturale di componenti nucleari).

La preparazione acquisita nell'ambito di questo indirizzo è orientata al calcolo, alla progettazione termoidraulica e termomeccanica, all'analisi di sicurezza degli impianti (componenti e sistemi); tale preparazione è particolarmente adatta ad un inserimento professionale nell'industria nucleare, termoenergetica e termomeccanica e nel settore aeronautico e spaziale per gli aspetti più propriamente termomeccanici e termoidraulici.

INDIRIZZO NEUTRONICO-CONTROLLISTICO

È caratterizzato da insegnamenti destinati a:

- approfondire gli aspetti fisico-matematici della migrazione e moltiplicazione neutronica in condizioni statiche e dinamiche e a evidenziare analogie di approccio e procedimento con altri settori della ricerca tecnologica e della progettazione avanzata (Reattori Nucleari);
- sviluppare insieme alle metodologie computazionali classiche quelle più recenti; queste ultime sono specifiche per l'analisi fisica e la progettazione neutronica degli impianti nucleari attuali, per gli studi di fattibilità di quelli innovativi, nonché per la fisica dei reattori a fusione (Calcolo numerico e Programmazione, Metodi numerici dell'Ingegneria Nucleare);
- raccordare le problematiche neutroniche e quelle termoidrauliche ai fini dell'approfondimento dei problemi delle retroazioni intrinseche, del controllo e della sicurezza delle installazioni elettronucleari di potenza esaminate nella loro globalità (Termocinetica degli Impianti Nucleari, Dinamica e Controllo degli Impianti Nucleari);
- approfondire le tematiche di radioprotezione e sicurezza con particolare riferimento allo schermaggio delle radiazioni e all'impatto radiologico delle centrali (Protezione e Sicurezza negli Impianti Nucleari).

Questo indirizzo, dedicato ad approfondire alcuni degli aspetti più caratterizzanti dell'energetica nucleare dal punto di vista fisico-matematico e del controllo e regolazione degli impianti, si prefigge sia di fornire strumenti per l'analisi e la progettazione avanzata nel settore neutronico, sia di familiarizzare lo studente con metodologie scientifiche che sono oggi caratteristiche della ricerca tecnologica e fondamentale, a prescindere dal settore cui si rivolge.

La «professionalità» è interdisciplinare poichè sono coinvolte le tematiche degli indirizzi termoidraulico e neutronico integrate da una conoscenza di elettronica, di strumentazione convenzionale e nucleare e di una cultura di base sulle tecniche di regolazione, di protezione e di sicurezza.

Di conseguenza, opportunità di impiego per i laureati con questo indirizzo si aprono non solo nell'industria nucleare specifica e negli Enti di sorveglianza e controllo, ma anche presso le industrie a tecnologia avanzata e i laboratori di ricerca pura e applicata.

INDIRIZZO FISICO STRUMENTALE

L'indirizzo fisico strumentale è caratterizzato da corsi rivolti:

- ad approfondire e completare la preparazione fisico-matematica con argomenti non trattati nei corsi di base (Fisica matematica, Meccanica statistica applicata);
- alla utilizzazione delle strumentazioni direttamente basate sulle tecniche della fisica sperimentale (Strumentazione fisica, Misure nucleari e Rivelatori di radiazione, trasduttori e sensori);
- allo studio di macchine acceleratrici sia dal punto di vista costruttivo che applicativo (Sorgenti di radiazioni e macchine acceleratrici).

L'indirizzo fornisce una preparazione particolarmente adatta ad un insegnamento professionale nell'industria nucleare, in laboratori medici ed industriali ed in laboratori di ricerca, sia di base che applicata.

PRESIDENTE DEL CONSIGLIO DI CORSO DI LAUREA

Bruno PANELLA
Dip. di Energetica

**COMMISSIONE PER L'ESAME DEI PIANI DI STUDIO INDIVIDUALI
E COMMISSIONE PER LE PROVE DI SINTESI**

<u>Carlo ARNEODO</u>	Dip. di Energetica
Graziano CURTI	Dip. di Meccanica
Francesca DEMICHELIS	Dip. di Fisica
Mario DE SALVE	Dip. di Energetica
Luigi GONELLA	Dip. di Fisica

PROGRAMMI

Riportiamo di seguito i programmi degli insegnamenti del Corso di Laurea in Ingegneria Nucleare in ordine alfabetico con il titolo dell'insegnamento, il nome del docente, il dipartimento di appartenenza, l'anno di corso e il periodo didattico, l'impegno didattico e l'indirizzo.

Degli insegnamenti ufficiali di altro Corso di Laurea, ma previsti nel piano individuale, è riportato il solo elenco alfabetico con i relativi riferimenti:

- IN082** Controlli automatici
 vedi Corso di laurea in Ingegneria Elettrotecnica
- IN168** Fisica dei fluidi e magnetofluidodinamica
 vedi Corso di laurea in Ingegneria Aeronautica
- IN170** Fisica dello stato solido
 vedi Corso di laurea in Ingegneria Elettronica
- IN524** Ingegneria sismica e problemi dinamici speciali
 vedi Corso di laurea in Ingegneria Civile
- IN273** Meccanica delle vibrazioni
 vedi Corso di laurea in Ingegneria Meccanica
- IN284** Metallurgia fisica
 vedi Corso di laurea in Ingegneria Chimica
- IN402** Tecnica delle costruzioni industriali
 vedi Corso di laurea in Ingegneria Meccanica
- IN411** Tecnologia dei materiali metallici
 vedi Corso di laurea in Ingegneria Meccanica
- IN413** Tecnologia meccanica
 vedi Corso di laurea in Ingegneria Aeronautica
- IN570** Teoria e pratica delle misure
 vedi Corso di laurea in Ingegneria Elettronica

IN459 ANALISI MATEMATICA I

Prof. Marco CODEGONE

DIP. di Matematica

I ANNO

1° PERIODO DIDATTICO

Corso di Laurea: ING. NUCLEARE

Impegno didattico

Annuale (ore)

Settimanale (ore)

Lez.

84

6

Es.

56

4

Lab.

—

—

Finalità del corso è fornire gli strumenti di base del calcolo differenziale, propedeutici ai corsi della Facoltà di Ingegneria, utilizzando il linguaggio moderno della matematica ed insegnando come affrontare i problemi con rigore e spirito critico. Il corso si svolgerà con lezioni ed esercitazioni.

Nozioni propedeutiche: le nozioni fondamentali di algebra, di geometria, di trigonometria, secondo i programmi di scuola secondaria superiore.

PROGRAMMA

Teoria degli insiemi: nozioni di base.

Applicazioni fra insiemi: definizioni e proprietà.

L'insieme dei numeri reali e l'insieme dei numeri complessi.

Funzioni elementari di variabile reale e di variabile complessa.

Successioni, limiti di successioni.

Le proprietà locali delle funzioni reali di variabile reale: continuità, limiti, derivabilità. Confronto locale di funzioni.

Teoremi fondamentali del calcolo differenziale e le loro applicazioni.

Approssimazione locale di funzioni: formula di Taylor.

Cenni sulla approssimazione globale di funzioni reali di variabile reale.

Ricerca degli zeri di una funzione reale di variabile reale.

Teoria dell'integrazione: definizione di integrale indefinito, proprietà.

Regole di integrazione; l'integrale definito e le sue proprietà.

I teoremi della media; applicazioni numeriche, formula dei trapezi.

Integrazione delle funzioni elementari.

Sistemi dinamici discreti, sistemi dinamici continui, equazioni differenziali ordinarie.

ESERCITAZIONI

Esercizi relativi agli argomenti sviluppati nelle lezioni con applicazioni d'utilizzo di strumenti informatici (LAIB).

TESTI CONSIGLIATIA.R. Scarafioti, *14 settimane di Analisi I*, Ed. Levrotto & Bella, Torino, nuova edizione, 1985/86.

IN460 ANALISI MATEMATICA II

Prof. Maria Teresa GALIZIA ANGELI DIP. di Matematica

II ANNO	Impegno didattico	Lez.	Es.	Lab.
1° PERIODO DIDATTICO	Annuale (ore)	80	56	—
Corso di Laurea: ING. NUCLEARE	Settimanale (ore)	6	4	—

Il corso si propone di completare la formazione matematica di base dello studente, con riferimento in particolare all'integrazione in più dimensioni, alla risoluzione di sistemi di equazioni differenziali ed ai metodi di sviluppi in serie, ponendo in risalto quegli aspetti che preparano e preludono alla comprensione di tecniche matematiche specialistiche indispensabili nella moderna ingegneria.

Il corso comprende, oltre alle ore di lezione, ore di esercitazione.

Propedeutici sono i corsi di Analisi matematica I e di Geometria.

PROGRAMMA:

Integrazione di funzioni di più variabili. Nozione di misura di un insieme e di integrale di una funzione. Formule di cambiamento di variabile.

Integrali impropri. Integrali dipendenti da un parametro.

Integrale di una funzione definita su una curva o su una superficie.

Teoremi di Guldino.

Forme differenziali lineari. Nozione di forma esatta e di integrale curvilineo di una forma.

Teorema di Green.

Campi vettoriali nello spazio. Rotore e divergenza di un campo. Flusso di un campo attraverso una superficie orientata. Teoremi di Gauss e Stokes.

Serie numeriche: proprietà e criteri di convergenza. Serie di funzioni.

Convergenza: proprietà e criteri relativi. Serie di potenze; raggio di convergenza. Sviluppi di Taylor e Mac Laurin. Applicazioni.

Serie di Fourier: proprietà e criteri di convergenza; esempi di analisi armonica.

Matrici. Serie di matrici. Matrice esponenziale.

Equazioni differenziali. Alcune equazioni particolari. Equazioni e sistemi differenziali lineari. Proprietà delle soluzioni. Equazioni e sistemi lineari a coefficienti costanti.

ESERCITAZIONI

Parallelamente agli argomenti delle lezioni vengono svolti esercizi in aula e/o (se possibile) col calcolatore.

TESTI CONSIGLIATI

A. Bacciotti-F. Ricci, *Lezioni di Analisi matematica 2*, Ed. Levrotto & Bella, Torino.

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

H.B. Dwight, *Tables of integrals and other mathematical data*, The Mac Millan Company, 1961.

IN041 CALCOLO NUMERICO E PROGRAMMAZIONE

Prof. Giovanni MONEGATO

DIP. di Matematica

IV ANNO

2° PERIODO DIDATTICO

INDIRIZZO: Neutronico-Controllistico

Impegno didattico

Annuale (ore)

Settimanale (ore)

Lez.

80

6

Es.

50

4

Lab.

—

—

Il corso ha lo scopo di preparare gli allievi soprattutto alla risoluzione numerica di modelli matematici con i mezzi del calcolo automatico. Gli allievi vengono inoltre addestrati alla programmazione scientifica con il linguaggio Fortran. Nel corso vengono affrontati i temi fondamentali del Calcolo numerico e la programmazione scientifica con il linguaggio Fortran.

*Il corso si svolgerà con lezioni, esercitazioni e laboratorio (uso del calcolatore).
Nozioni propedeutiche: Analisi matematica I e II, Geometria.*

PROGRAMMA

Rappresentazione dei numeri e operazioni aritmetiche in un calcolatore.

Errori, condizionamento di un problema e stabilità numerica di un algoritmo.

Risoluzione di sistemi di equazioni lineari. Metodo di Gauss, fattorizzazione LU e Choleski.

Metodi iterativi: Jacobi, Gauss-Seidel, SOR.

Calcolo degli autovalori e autovettori di matrici: metodi delle potenze e potenze inverse, trasformazioni di similitudine (Householder), caso delle matrici tridiagonali simmetriche.

Approssimazione di funzioni e di dati. Interpolazione polinomiale e funzioni spline. Metodo dei minimi quadrati.

Derivazione numerica.

Calcolo delle radici di equazioni: metodi di bisezione, secanti, Newton; metodi iterativi in generale.

Alcuni metodi per la risoluzione di sistemi di equazioni non lineari.

Integrazione numerica: formule di Newton-Cotes e Gaussiane. Polinomi ortogonali.

Equazioni differenziali ordinarie. Problemi con valori iniziali: metodi one-step e multistep.

Sistemi Stiff. Problemi con valori ai limiti: metodi alle differenze e shooting.

Equazioni differenziali alle derivate parziali: metodi alle differenze e dei residui pesati; cenni sui metodi degli elementi finiti.

ESERCITAZIONI

Breve presentazione degli elaboratori elettronici. Linguaggio Fortran. Analisi ed implementazione dei metodi numerici presentati nelle lezioni. Risoluzione di problemi.

LABORATORI

Un elaboratore elettronico è a disposizione (quotidianamente) degli studenti per la messa a punto e sperimentazione dei programmi di calcolo realizzati.

RICERCATORI ADDETTI ALLE ESERCITAZIONI E/O LABORATORI

A. ORSI PALAMARA

TESTI CONSIGLIATI

G. Monegato, *Calcolo numerico*, Ed. Levrotto & Bella, Torino, 1985.

A. Orsi Palamara, *Programmare in Fortran 77*, Ed. Levrotto & Bella, Torino, 1987.

IN042 CALCOLO STRUTTURALE DI COMPONENTI NUCLEARI

Prof. Graziano CURTI

DIP. di Meccanica

IV ANNO

2° PERIODO DIDATTICO

INDIRIZZO: Termoidraulico-Strutturistico

Impegno didattico

Annuale (ore)

Settimanale (ore)

Lez.

Es.

Lab.

52

32

—

4

2

—

Il corso ha lo scopo di preparare strutturisti e progettisti di componenti meccanici per l'industria nucleare al calcolo ed alla costruzione, con riferimento sia ai metodi delle normative sia ai moderni procedimenti di calcolo su elaboratore.

Il corso si svilupperà in circa 52 ore di lezioni e 32 ore di esercitazioni.

Nozioni propedeutiche: Scienza delle costruzioni, Meccanica razionale, Disegno meccanico.

PROGRAMMA

Richiami di meccanica del continuo; integrazione numerica; soluzione dei sistemi lineari e loro significato fisico; calcolo sistematico delle strutture; caratterizzazione per integrazione diretta e mediante principio dei lavori virtuali; scrittura di rigidità e deformabilità; principio dei lavori virtuali a spostamenti assegnati; sistemi tubieri; travature; cilindri in parete spessa; piastre; gusci in campo membranale; effetti locali nei vessel, teoria di Coates; normativa ASME; cenni di meccanica della frattura; elementi finiti, elementi monodimensionali: travi, piastre, gusci; elementi bidimensionali: triangolari, quadrangolari, elementi isoparametrici a 4 e 8 nodi, elementi assialsimmetrici isoparametrici, elemento piastra; problemi dinamici; frequenza proprie; calcolo di autovalori; analisi modale; integrazione al passo.

ESERCITAZIONI

Progetto di uno scambiatore di calore secondo le normative ASME.

TESTI CONSIGLIATI

M.M. Gola - A. Gugliotta, *Introduzione al calcolo strutturale sistematico*, Ed. Levrotto & Bella, Torino, 1980.

IN465 CHIMICA

Prof. Cesare BRISI

DIP. di Scienza dei Materiali e Ingegneria
Chimica

I ANNO

1° PERIODO DIDATTICO

Corso di Laurea: ING. NUCLEARE

Impegno didattico

Annuale (ore)

Settimanale (ore)

Lez.

Es.

Lab.

90

45

—

6

3

—

Il corso si propone di fornire le basi teoriche necessarie per la comprensione e l'interpretazione dei fenomeni chimici e di dare una breve rassegna delle proprietà degli elementi più comuni e dei loro principali composti. Esso si articola di conseguenza in tre parti: una di chimica generale alla quale vengono dedicate circa 60 ore di lezione; una di chimica inorganica (circa 20 ore di lezione) ed una di chimica organica (5-10 ore di lezione).

Il corso prevede 90 ore di lezione, 40 ore di esercitazione, 10 ore di proiezioni didattiche. Per seguire con profitto il corso sono sufficienti le nozioni di base relative alle leggi generali della chimica, alla simbologia e alla nomenclatura.

PROGRAMMA

Chimica generale: Sistemi omogenei ed eterogenei. Concetto di fase, di composto, di elemento. Leggi fondamentali della chimica. Teoria atomico-molecolare. Legge di Avogadro. Determinazione dei pesi atomici e molecolari. Concetto di mole. Calcoli stechiometrici.

Il sistema periodico degli elementi. Il modello atomico di Bohr. L'atomo secondo la meccanica quantistica. Interpretazione elettronica del sistema periodico. I raggi X.

Legame ionico, covalente, metallico. Legami intermolecolari. Grado di ossidazione.

Isotopia. Energia di legame dei nucleoni. Radioattività. Fenomeni di fissione e di fusione nucleare.

Leggi dei gas. Dissociazione termica. Teoria cinetica dei gas. Legge di Graham. Calore specifico dei gas.

Lo stato solido. Reticolo cristallino e cella elementare. Difetti reticolari. Soluzioni solide. Lo stato liquido. Equazione di Clausius-Clapeyron. Tensione di vapore delle soluzioni. Crioscopia. Pressione osmotica.

Energia interna ed entalpia. Effetto termico delle reazioni. Entropia ed energia libera di reazione. Velocità di reazione. Catalisi. Legge dell'azione di massa. Principio dell'equilibrio mobile.

Regola delle fasi. Diagrammi di stato a uno e due componenti. Applicazione della legge delle fasi agli equilibri chimici eterogenei.

Soluzioni di elettroliti. Elettrolisi. Costante di ionizzazione. Prodotto ionico dell'acqua. Acidi e basi. pH. Idrolisi. Prodotto di solubilità. Soluzioni tampone. Potenziale d'elettrodo. Serie elettrochimica. Tensioni di decomposizione. Potenziali di ossido-riduzione.

Chimica inorganica: Proprietà e metodi di preparazione industriale dei seguenti elementi e dei loro principali composti: idrogeno, ossigeno, sodio, rame, calcio, zinco, alluminio, carbonio, silicio, azoto, fosforo, cromo, uranio, zolfo, manganese, alogeni, ferro.

Chimica organica: Cenni su idrocarburi saturi e insaturi e derivati alogenati; alcoli, aldeidi, chetoni, acidi organici, esteri, ammine, ammidi, nitrili; benzene e suoi omologhi, fenoli, nitroderivati, ammine aromatiche.

ESERCITAZIONI

Le esercitazioni sono dedicate all'ampliamento di alcuni argomenti oggetto di lezione, ad esperienze di laboratorio e a calcoli relativi agli argomenti di chimica generale. Esse vengono integrate dalla proiezione di film didattici.

TESTI CONSIGLIATI

C. Brisi - V. Cirilli, *Chimica generale e inorganica*, Levrotto & Bella, Torino, 1977.

M.J. Sienko - R.A. Plane, *Chimica: principi e proprietà*, Piccin, Padova, 1980.

C. Brisi, *Esercitazioni di Chimica*, Levrotto & Bella, Torino, 1977.

P. Silvestroni, *Fondamenti di Chimica*, Librerie Eredi Virginio Veschi, Roma, 1980.

L. Rosemberg, *Teoria e applicazioni di chimica generale*, Collane Schaum, Etas Kompass, 1966.

M. Montorsi, *Appunti di Chimica Organica*, Celid, Torino, 1987.

IN047 CHIMICA APPLICATA

Prof. Cesare BRISI

DIP. di Scienza dei Materiali e Ingegneria
Chimica

II ANNO

2° PERIODO DIDATTICO

Corso di Laurea: ING. NUCLEARE

Impegno didattico

Annuale (ore)

Settimanale (ore)

Lez.

80

6

Es.

30

3

Lab.

15

—

Il corso verte sullo studio delle proprietà, dei metodi di elaborazione e delle caratteristiche d'impiego dei materiali di più comune utilizzazione nella pratica ingegneristica. Il corso si sviluppa su 80 ore di lezione; 25-40 ore di esercitazione e laboratorio. Nozioni propedeutiche: è indispensabile la conoscenza della chimica generale e inorganica e di alcune nozioni fondamentali di chimica organica, nonché dei concetti base della fisica. Esami propedeutici: Chimica, Fisica I.

PROGRAMMA

Acque per uso industriale. Determinazione, calcolo e metodi di abbattimento della durezza. Degasazione. Deionizzazione con resine scambiatrici. Metodi di distillazione. Elettrodialisi. Osmosi inversa. Cenni sulle acque potabili.

Combustione e combustibili. Potere calorifico. Aria teorica di combustione. Volume e composizione dei fumi. Calcolo dell'aria in eccesso. Temperatura teorica di combustione. Perdita al camino. Caratteristiche e metodi di elaborazione dei principali combustibili solidi, liquidi, gassosi. Carburanti. Lubrificanti.

Sistemi eterogenei. Regola delle fasi. Diagrammi di stato binari e ternari.

Materiali ceramici e refrattari. Refrattari silicei, silico-alluminosi, magnesiaci, cromitici, cromomagnesiaci, grafitici. Saggi sui refrattari. Materiali ceramici di uso industriale.

Materiali leganti. Calce aerea e gesso d'opera. Cemento Portland, pozzolanico e d'alto forno: preparazione e caratteristiche chimico-fisiche. Meccanismi di idratazione. Cenni sui calcestruzzi. Vetro e vetroceramiche.

Materiali ferrosi. Produzione della ghisa d'alto forno. Diagrammi di stato ferro-cementite e ferro-grafite. Affinazione della ghisa. Trattamenti termici degli acciai. Cementazione e nitrurazione. Ghise da getto. Classificazione UNI. Cenni sugli acciai speciali.

Alluminio. Metallurgia. Principali leghe da getto e da bonifica.

Rame. Proprietà fisico-meccaniche. Ottoni e bronzi.

Materie plastiche. Polimeri e polimerizzazione. Principali tipi di resine termoplastiche e termoindurenti. Siliconi.

ESERCITAZIONI

Calcoli numerici e illustrazione di prove di laboratorio riguardanti gli argomenti sopra elencati.

LABORATORI

Saggi analitici e tecnologici su acque, combustibili, lubrificanti, materiali leganti e metalli.

TESTI CONSIGLIATI

C. Brisi, *Chimica applicata*, Ed. Levrotto & Bella, Torino, 1981.

IN049 CHIMICA DEGLI IMPIANTI NUCLEARI

Prof. Giovanni Battista SARACCO

DIP. di Scienza dei Materiali e Ingegneria
Chimica

III ANNO

1° PERIODO DIDATTICO

Corso di laurea: ING. NUCLEARE

Impegno didattico

Annuale (ore)

Settimanale (ore)

Lez.

70

5

Es.

14

1

Lab.

20

4

Il corso intende illustrare i più importanti concetti della chimica industriale, in senso termodinamico e processistico, che formano la base per la definizione di sviluppo delle tecnologie industriali.

Una prima parte del corso, di tipo generale, tratta alcuni concetti di base in equilibri di fase e separazione, e ne sviluppa sia la definizione teorica, sia le modalità realizzative.

Una seconda parte del corso, più applicativa e tecnologica, illustra l'applicazione dei principi sopra ricordati a processi di produzione di materiali di interesse nucleare, di riprocessamento dei combustibili esauriti, di innocuizzazione dei prodotti di fissione e di produzione dell'acqua pesante.

PROGRAMMA

Metodi di separazione fondati sulla formazione di complessi, sulla distillazione frazionata, sulla cristallizzazione, sullo scambio ionico: principi e tecnologie.

Principali materiali di interesse nelle tecnologie nucleari e loro applicazioni.

Processi di produzione di combustibili nucleari (uranio, plutonio, torio).

Produzione di deuterio e di acqua pesante secondo diverse tecnologie: distillazione, elettrolisi, scambio isotopico.

Riprocessamento del combustibile per via umida (cicli Redex, Purex, TTA); reprocessing per via secca.

ESERCITAZIONI

Durante le esercitazioni in aula si svolgono calcoli numerici su distillazione, cristallizzazione, relazioni stechiometriche e bilanci di materia, operazioni di trasferimento.

Ad ulteriore chiarimento, in laboratorio vengono eseguite esperienze di estrazione con solvente e separazioni per precipitazione, e sui risultati analitici vengono eseguite valutazioni numeriche.

TESTI CONSIGLIATI

Dispense del corso editate dalla Clut.

IN070 COMPLEMENTI DI IMPIANTI NUCLEARI

Prof. Giovanni DEL TIN

DIP. di Energetica

V ANNO

1° PERIODO DIDATTICO

INDIRIZZO: Termoidraulico - Strutturistico

Impegno didattico

Annuale (ore)

Settimanale (ore)

Lez.

Es.

Lab.

75

25

—

6

2

—

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

Sono inoltre forniti elementi di ingegneria dei reattori a fusione nucleare.

Il corso prevede lezioni ed esercitazioni in aula.

Nozioni propedeutiche: Fisica del reattore nucleare, Impianti nucleari, Termocinetica degli I.N., Termoidraulica bifase degli I.N., Termotecnica del reattore.

PROGRAMMA

Reattori nucleari a fissione. Criteri neutronici, termoidraulici e meccanici per la scelta dei parametri di progetto del reattore.

Regimi transitori e analisi di sicurezza. Transitori di reattività. Transitori di perdita di carico elettrico. Transitori di perdita di portata. Transitori conseguenti alla riduzione della capacità di asportazione del calore dal circuito primario (LOHS). Transitori di perdita di refrigerante (LOCA). Sistemi di protezione. Sistemi ausiliari. Sistemi di refrigerazione di emergenza. Sistemi di contenimento. Forze di getto e forme di reazione. Affidabilità degli impianti. Alberi degli eventi e dei guasti. Analisi di sicurezza con metodologie probabilistiche. PRA.

Impatto ambientale degli impianti nucleari e confronto con altri impianti energetici.

Reattori nucleari a fusione. Tipi di reazioni e loro dinamica. Ciclo del combustibile. Caratteristiche principali delle macchine a confinamento magnetico. Descrizione e parametri dei Tokamak. Problemi ingegneristici e limitazioni tecnologiche. Problemi di sicurezza e impatto ambientale.

ESERCITAZIONI

Verifiche di flessibilità dei sistemi di tubazioni. Calcolo contenitore di sicurezza. Normativa ASME.

TESTI CONSIGLIATI

M. Cumo, *Impianti nucleari*, Ed. Utet, Torino, 1976.

Thompson and Bekerley, *The technology of nuclear safety*, vol. 1 e 2, Ed. The Mit. Press, Massachusetts, 1973.

L.S. Tong - J. Weisman, *Thermal analysis of pressurized water reactor*, Ed. ANS, La Grange Park, 1979.

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

IN073 COMPLEMENTI DI MATEMATICA

Prof. Luciano PANDOLFI

DIP. di Matematica

II ANNO

2° PERIODO DIDATTICO

Corso di Laurea: ING. NUCLEARE

Impegno didattico

Annuale (ore)

Settimanale (ore)

Lez.

80

6

Es.

40

4

Lab.

—

—

Il corso si propone di provvedere gli strumenti matematici che risulteranno utili alla comprensione dei corsi successivi.

Il corso prevede lezioni ed esercitazioni.

Nozioni propedeutiche: Analisi matematica I e II, Geometria.

PROGRAMMA

Funzioni di variabile complessa: Funzioni olomorfe; Formula integrale di Cauchy e conseguenze; singolarità isolate; sviluppo di Laurent e residui; principio dell'argomento e teorema di Rouché; trasformate ed antitrasformate di Laplace e di Fourier.

Equazioni a derivate parziali: Equazioni quasilineari del primo ordine; equazioni del secondo ordine omogenee o no; equazioni ellittiche, paraboliche ed iperboliche (esemplificate dall'equazioni di Laplace, del calore e delle onde); metodo della separazione di variabili.

Funzioni di Bessel.

Cenni sull'integrale di Lebesgue.

Spazi di Hilbert: Definizioni e proprietà fondamentali; sistemi ortonormali completi e sviluppi in serie; spazi L^2 con peso e polinomi ortogonali; operatori lineari negli spazi di Hilbert.

ESERCITAZIONI

Le esercitazioni verteranno sugli argomenti trattati a lezione.

TESTI CONSIGLIATI

Gli studenti potranno disporre degli appunti delle lezioni.

IN093 COSTRUZIONE DI MACCHINE

Prof. Graziano CURTI

DIP. di Meccanica

V ANNO
 2° PERIODO DIDATTICO
 Corso di laurea: ING. NUCLEARE

Impegno didattico	Lez.	Es.	Lab.
Annuale (ore)	80	60	—
Settimanale (ore)	6	4	—

Il corso si propone di fornire agli allievi gli insegnamenti metodologici e le nozioni tecniche necessari per affrontare il problema della progettazione in campo meccanico. Nel corso vengono trattati argomenti di carattere generali quali il comportamento a fatica, lo scorrimento a caldo e lo smorzamento interno dei materiali, le vibrazioni flessionali e torsionali e le velocità critiche degli alberi rotanti e argomenti di carattere particolare riferiti ai principali organi di macchine.

Il corso prevede lezioni ed esercitazioni.

Nozioni propedeutiche: Scienza delle costruzioni, Meccanica applicata, Disegno meccanico.

PROGRAMMA

Materiali e loro caratteristiche.

La resistenza dei materiali a fatica e allo scorrimento.

Tensioni principali, stati biassiali e triassiali di tensione, ipotesi di rottura.

Effetti di intaglio.

Saldature: resistenza statica e a fatica.

Collegamenti forzati.

Chiavette, linguette, accoppiamenti scanalati.

Filettature, viti e bulloni.

Molle.

Risultati della teoria di Hertz.

Cuscinetti generalità e montaggio degli stessi.

Assi e alberi.

Giunti: generalità; giunti rigidi, semirigidi, elastici, giunti cardanici.

Innesti: generalità; innesti a denti, innesti a frizione (piana, conica), innesti centrifughi e ruote libere.

Ingranaggi ad evolvente; ruote a denti diritti ed elicoidali, normali e corrette; ruote coniche: condizioni geometriche-cinematiche e verifiche di resistenza.

Dischi rotanti a forte velocità e sottoposti a gradienti termici.

Tubi spessi.

Vibrazioni flessionali e velocità critiche di sistemi a masse concentrate e distribuite.

Oscillazioni torsionali.

Valvole ed organi di intercettazione.

ESERCITAZIONI

Consiste nella progettazione di un gruppo meccanico, normalmente destinato ad applicazioni in campo nucleare, e comprende un dimensionamento di massima (disegno e calcoli) degli organi principali del gruppo.

TESTI CONSIGLIATI

R. Giovannozzi, *Costruzione di Macchine*, vol. 1 e 2, Ed. Pàtron, Bologna.

IN114 DINAMICA E CONTROLLO DEGLI IMPIANTI NUCLEARI

Prof. Mario DE SALVE

DIP. di Energetica

V ANNO

2° PERIODO DIDATTICO

INDIRIZZO: Neutronico-Controllistico

Impegno didattico

Annuale (ore)

Settimanale (ore)

Lez.

Es.

Lab.

84

20

6

6

2

—

Il corso si propone di fornire le metodologie per l'analisi della dinamica delle centrali nucleotermoelettriche e per il controllo automatico delle stesse. Esso si propone di sviluppare: a) caratteristiche funzionali delle centrali nucleo termoelettriche; b) elementi di teoria dei controlli automatici; c) cinetica puntiforme; d) modelli termoidraulici dinamici per sistemi e componenti; e) instabilità termoidrauliche; f) strumentazione termoidraulica e nucleare.

Il corso prevede lezioni ed esercitazioni.

Nozioni propedeutiche: Complementi di impianti nucleari, Reattori nucleari.

PROGRAMMA

Parte 1^a - Analisi delle caratteristiche funzionali delle centrali nucleo termoelettriche. Requisiti e caratteristiche dei sistemi di regolazione e protezione. Programmi di regolazione ed inserzione in rete delle centrali nucleo termoelettriche. Cenni sui problemi connessi alla gestione di una rete elettrica.

Parte 2^a - Cenni di teoria dei sistemi e della regolazione. Regolatori; funzioni di trasferimento; sistemi di retroazione. Metodi per lo studio della stabilità dei sistemi a retroazione.

Parte 3^a - Cenni di cinetica puntiforme; inserzione a gradino; a rampa; sinusoidale della reattività. Funzione di trasferimento di un reattore a potenza zero senza effetti di retroazione. Coefficienti di temperatura della reattività; coefficiente dei vuoti, della pressione; coefficienti composti. Difetto di temperatura; difetto di potenza; margini di spegnimento. Funzioni di trasferimento di un reattore con retroazioni della temperatura del combustibile e del moderatore. Analisi delle condizioni di stabilità. Instabilità da Xenon. Barre di controllo.

Parte 4^a - Strumentazione nucleare in core ed ex core. Misure di flussi neutronici, periodo, efficacia delle barre di controllo. Misure termiche e fluidodinamiche.

Parte 5^a - Regolazione dei circuiti primari e secondari di una centrale. Comportamento dinamico del BWR. Instabilità termofluidodinamica. Mappa di regolazione di un BWR. Cenni sui comportamenti dinamici di componenti tradizionali dell'impianto. Procedure di avviamento e spegnimento. Cenni sulla simulazione analogica. Transitori ATWS.

ESERCITAZIONI

Applicazioni della teoria dei controlli automatici e della cinetica puntiforme.

TESTI CONSIGLIATI

A. Novelli, *Elementi di controllo del reattore nucleare*, Ed. Clup, Milano, 1980.
Appunti del Docente.

J. Lewins, *Nuclear Reactor Kinetics and Control*, Pergamon Press, 1978.

D.C. Hetrick, *Dynamics of Nuclear Reactor*, University Chicago Press, 1971.

IN468 DISEGNO

Prof. Rita QUENDA

DIP. di Meccanica

I ANNO
1° e 2° PERIODO DIDATTICO
Corso di Laurea: ING. NUCLEARE

Impegno didattico	Lez.	Es.	Lab.
Annuale (ore)	30	120	—
Settimanale (ore)	1	4	—

Il corso è diretto a fornire le nozioni teoriche ed applicative di rappresentazione grafica e la conoscenza delle norme fondamentali per l'esecuzione e l'interpretazione di disegni e progetti di elementi che interessano l'ingegneria. Viene dato particolare rilievo alla normazione nazionale ed internazionale. Il corso è propedeutico agli insegnamenti di disegno sviluppati negli anni seguenti nei vari indirizzi.

Il corso si svolgerà con lezioni ed esercitazioni.

Nozioni propedeutiche: i contenuti dei corsi di Geometria piana e solida.

PROGRAMMA

Caratteristiche del disegno. Strumenti e mezzi tecnici. Condizionamenti formali nella normativa nazionale ed internazionale.

Tecnica operativa di rappresentazione nel sistema Europeo ed Americano: assonometrie generiche ed unificate, proiezioni ortogonali, ausiliarie e sezioni, viste esplose.

Quotatura e sistemi di quotatura: convenzioni, caratteristiche, funzionalità.

Tecnologie di base: cenni sui sistemi di produzione emergenti.

Dimensioni normali e tolleranze dimensionali: normativa nazionale ed internazionale per i diversi accoppiamenti.

Collegamenti smontabili: filettatura, convenzioni e caratteristiche geometriche e funzionali; bulloneria, rosette ed elementi di sicurezza.

Collegamenti fissi: chiodature e saldature.

Finitura superficiale e rugosità.

Studio di composizione e scomposizione di complessivi.

Scelta degli elementi unificati nella progettazione di nodi strutturali e di semplici insiemi.

Elementi di C.A.D. (Disegno assistito dal calcolatore).

ESERCITAZIONI

Disegno a mano libera e con attrezzi di elementi meccanici. Rilievo dal vero. Rappresentazione di complessivi e relativi particolari. Impostazione di grafici e diagrammi.

TESTI CONSIGLIATI

Maifreni, *Il disegno meccanico*, vol. 1 e 2, Paravia, Torino (ultima edizione).

Chevalier, *Manuale del disegno tecnico*, SEI, Torino.

Straneo - Consorti, *Il disegno tecnico*, vol. unico, Principato, Milano (ultima edizione).

IN481 DISEGNO MECCANICO

Prof. Silvio MANZONI

DIP. di Tecnologia e Sistemi di Produzione

II ANNO
1° PERIODO DIDATTICO
Corso di Laurea: ING. NUCLEARE

Impegno didattico	Lez.	Es.	Lab.
Annuale (ore)	30	110	—
Settimanale (ore)	—	—	—

L'insegnamento ha lo scopo di fornire agli allievi i fondamenti del disegno tecnico, inteso come linguaggio, nonché le prime indicazioni sul proporzionamento di elementi e di gruppi meccanici. Viene dato particolare rilievo alla normazione nazionale ed internazionale.

Nozioni propedeutiche: Disegno.

PROGRAMMA

Le fasi del progetto meccanico: l'influenza del calcolo, della lavorazione meccanica e dell'unificazione sul disegno dei pezzi meccanici.

Rugosità delle superfici, misura e unificazione, relazioni con le tolleranze.

Tolleranze di lavorazione: dimensionali e geometriche di forma e di posizione; catene di tolleranze e loro calcolo.

Assi e alberi: raccordi e smussi; generalità sul fissaggio di un organo meccanico su di un albero.

Chiavette, linguette, accoppiamenti scanalati, tipi, particolarità, unificazione, quotatura.

Spine e perni; spine elastiche; chiavette trasversali.

Cuscinetti a strisciamento e loro lubrificazione.

Cuscinetti idrostatici.

Cuscinetti pneumostatici.

Cuscinetti magnetostatici.

Cuscinetti a rotolamento; tipi, particolarità ed unificazione.

Montaggio e scelta dei cuscinetti a rotolamento.

La lubrificazione e la protezione dei cuscinetti a rotolamento; anelli da tenuta e tenute a labirinto.

Dispositivi antisvitamento; rosette a piastrine, rosette elastiche, coppiglie e dadi speciali.

Cenni su ruote di frizione; catene, cinghie piane e trapezoidali.

Ruote dentate; generalità e parametri fondamentali; ruote dentate cilindriche esterne ed interne; coppia rochetto-dentiera; ruote dentate coniche.

Coppia vite senza fine-ruota elicoidale.

Le molle; tipi principali e particolarità.

La chiodatura; generalità, tipi di chiodi e di giunti chiodati ed unificazioni.

La saldatura; generalità e principali procedimenti tecnologici.

ESERCITAZIONI

Le esercitazioni consistono nello studio, nella elaborazione e nel disegno di gruppi meccanici di complessità via via crescente e sempre diversi nei vari anni. Agli allievi sono forniti schemi di tali gruppi meccanici che servono per il disegno dei complessivi dei gruppi stessi; successivamente vengono disegnati i particolari dei gruppi, corredati di tutte le indicazioni necessarie per la loro costruzione.

TESTI CONSIGLIATI

E. Chevalier - E. Chirone - V. Vullo, *Manuale del disegno tecnico*, SEI, Torino, 1976.

E. Chirone - V. Vullo, *Cuscinetti a strisciamento*, Ed. Levrotto & Bella, Torino, 1979.

IN145 ELETTRONICA NUCLEARE

Prof. Maurizio VALLAURI

DIP. di Elettronica

V ANNO

1° PERIODO DIDATTICO

Corso di laurea: ING. NUCLEARE

Impegno didattico

Annuale (ore)

Settimanale (ore)

Lez.

Es.

Lab.

70

20

—

6

2

—

Il corso è organizzato come insegnamento di Elettronica applicata per non elettronici; in quanto inserito nel corso di laurea in Ingegneria nucleare esso ha lo scopo di presentare i principi della Elettronica con accento sulle applicazioni che interessano precipuamente la tecnica nucleare.

Il corso prevede ore di lezione ed esercitazione.

Nozioni propedeutiche: Elettrotecnica, Complementi di matematica.

PROGRAMMA

- 1) Fondamenti. Circuiti e sistemi. Reti lineari resistive. Sorgenti dipendenti. Amplificatori operazionali. Capacità e induttanze.
- 2) Elettronica lineare. Processi di conduzione elettrica. Circuiti a diodi e applicazioni. Elettronica fisica dei transistori bipolari, FET, MOS. Circuiti con transistori: modelli per grandi e piccoli segnali. Reazione nei sistemi fisici, reazione e stabilità negli amplificatori. Risposta in frequenza degli amplificatori.
- 3) Elettronica non lineare. Circuiti digitali: algebra binaria, realizzazioni circuitali integrate di funzioni logiche. Applicazioni della tecnica digitale: multivibratori, contatori, registri. Realizzazioni digitali dei multivibratori. Conversione analogica-digitale e digitale-analogica.
- 4) Elettronica della tecnica nucleare. Elementi base di una catena di conteggio: amplificatore per impulsi, circuiti di coincidenza e anticoincidenza, discriminazione integrale e differenziale, misura di cadenza di conteggio. Analizzatori multi-canali. Sistema di regolazione automatica del reattore e suoi componenti.

ESERCITAZIONI

Le esercitazioni comprendono applicazioni di calcolo, progetto e verifica di massima relative ai principali argomenti del corso.

TESTI CONSIGLIATI

Per eventuale consultazione:

J. Millman, *Microelectronics*, McGraw Hill International Book Co., 1979.

R.J. Smith, *Circuits, Devices, and Systems*, 4th Edition, John Wiley & Sons, 1984.

U. Tietze - C. Schenk, *Halbleiter-Schaltungstechnik*, 7. Auflage, Springer Verlag, 1985.

Gli allievi avranno a disposizione note manoscritte riproducibili, sui principali argomenti del Corso.

IN483 ELETTRTECNICA

Prof. Michele TARTAGLIA

DIP. di Elettrotecnica

III ANNO

2° PERIODO DIDATTICO

Corso di laurea: ING. NUCLEARE

Impegno didattico

Annuale (ore)

Settimanale (ore)

Lez.

60

4

Es.

60

4

Lab.

8

—

Il corso ha lo scopo di fornire i fondamenti teorici dell'Elettrotecnica per affrontare le applicazioni relative alle macchine ed agli impianti elettrici. Per quanto concerne gli aspetti applicativi degli impianti particolare attenzione è dedicata alla loro protezione ed alla prevenzione di infortuni con particolare riguardo agli impianti elettrici. Gli argomenti trattati fanno riferimento a concetti fondamentali esposti nei corsi del biennio propedeutico con particolare riguardo a Fisica II pertanto è consigliabile che l'esame sia svolto dopo quello dei corsi propedeutici del biennio. Corsi propedeutici: tutti quelli del biennio.

PROGRAMMA

Reti elettriche in regime stazionario: Richiamo delle equazioni di Maxwell, introduzione del potenziale elettrico, definizione e proprietà delle grandezze elettriche fondamentali. Bipoli e loro caratteristiche, collegamento di bipoli serie e parallelo. Reti di bipoli, leggi generali, reti di bipoli lineari. Principio di sovrapposizione degli effetti; teoremi di Thévenin, Norton, Millman. Potenze elettriche. Trasformazioni stella-triangolo. Conduttori filiformi, equilibrio termico e scelta densità di corrente. Linee elettriche in corrente continua.

Reti elettriche in condizioni quasi stazionarie: Richiami delle equazioni di Maxwell. Introduzione di resistori, induttori, condensatori e loro equazioni di funzionamento.

Reti elettriche e regime sinusoidale: Rappresentazione funzionale delle grandezze sinusoidali. Impedenze, ammettenza. Potenza attiva, reattiva, apparente, complessa. Sistemi trifase simmetrici. Rifasamento.

Macchine elettriche: Principi di funzionamento delle macchine elettriche. Trasformatore, funzione struttura e principi di funzionamento; circuito elettrico, equivalente, funzionamento in condizioni normali, a vuoto e in corto circuito. Macchina asincrona: struttura e principi di funzionamento, circuito elettrico equivalente, caratteristica meccanica, avviamento e regolazione velocità. Macchina sincrona: struttura e principio di funzionamento, circuito equivalente funzionamento a regime, diagramma circolare.

Impianti elettrici: Cenni sulla generazione dell'energia elettrica; linee elettriche descrizione e circuito elettrico equivalente. Protezione degli impianti da sovraccarico e corto circuito. Sicurezza negli impianti, impianti di terra, protezione differenziale.

ESERCITAZIONI

Le esercitazioni consistono nello svolgimento di esempi numerici sui vari argomenti e sulla descrizione di alcune applicazioni pratiche.

TESTI CONSIGLIATI

Lezioni:

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

Esercitazioni:

A. Laurentini-A.R. Meo-R. Pomé, *Esercizi di Elettrotecnica*.

IN473 FISICA I

Docente da nominare

DIP. di Fisica

I ANNO

Impegno didattico

Lez.

Es.

Lab.

2° PERIODO DIDATTICO

Annuale (ore)

75

28

24

Corso di Laurea: ING. NUCLEARE

Settimanale (ore)

6

2

2

Come corso istituzionale del 1° anno, il corso è inteso a illustrare i principi fondamentali della meccanica e termodinamica, e fornire una base sufficiente a comprendere i problemi relativi, risolvere i più semplici, e poter sviluppare nei corsi successivi le tecniche specifiche di soluzione dei più complessi.

Il corso si svolgerà con lezioni, esercitazioni, laboratori.

Nozioni propedeutiche: per la buona comprensione del corso si richiede la conoscenza di Analisi matematica I.

PROGRAMMA

Cenni di metrologia: misurazione e incertezza di misura, sistemi di unità; valutazione dell'incertezza in misurazioni indirette.

Interpretazione ed uso dei vettori in fisica.

Cinematica del punto: velocità e accelerazione nei moti rettilinei e curvilinei; moto relativo; cambiamento del sistema di riferimento.

Dinamica del punto: leggi di Newton; forza, massa, quantità di moto, sistemi inerziali; conservazione delle quantità di moto; forze di campo (gravità e forze elastiche), vincoli e attriti, forze inerziali; lavoro; teorema dell'energia cinetica; campi conservativi ed energia potenziale. Dinamica dei sistemi: centro di massa; conservazione della quantità di moto, dell'energia e del momento angolare; moto nel sistema del centro di massa; urti; oggetti a massa variabile; dinamica rotatoria dei corpi rigidi e momento d'inerzia.

Statica dei corpi rigidi; statica dei fluidi.

Moto armonico; oscillazioni forzate e risonanza; cenni alle onde elastiche.

Dinamica dei fluidi perfetti; tensione superficiale.

Campo gravitazionale e leggi del moto planetario.

Termometria: dilatazione termica; scale di temperatura; teoria cinetica dei gas.

Calorimetria: conduzione del calore; sistemi termodinamici; equazione di stato dei gas perfetti e di Van der Waals; cambiamenti di stato.

Primo principio della termodinamica e problematica relativa.

Secondo principio della termodinamica: macchine termiche; ciclo e teorema di Carnot; teorema di Clausius; entropia.

ESERCITAZIONI

Esercitazioni numeriche a squadre sul programma del corso.

LABORATORI

Esercitazioni a mezza squadre in laboratorio. Esperienze di cinematica e dinamica mediante l'impiego di rotaia a cuscino d'aria. Acquisizione ed elaborazione di dati sperimentali (caduta dei gravi e oscillazioni del pendolo) con l'uso di Computer Apple II.

TESTI CONSIGLIATI

Lovera - Minetti - Pasquarelli, *Appunti di Fisica*, Ed. Levrotto & Bella, Torino, 1977.

Lovera - Malvano - Minetti - Pasquarelli, *Calore e Termodinamica*, Ed. Levrotto & Bella, Torino, 1977.

Alonso - Finn, *Elementi di Fisica per l'Università*, vol. 1, Masson, Milano, 1982.

Halliday - Resnick, *Fondamenti di Fisica*, parte 1^a (con le appendici di Barbero, Mauroni e Strigazzi); in alternativa: Halliday - Resnick, *Fisica*, parte 1^a, Ambrosiana, Milano, 1978.

Minetti - Pasquarelli, *Esercizi di Fisica 1*, Ed. Levrotto & Bella, Torino, 1971.

IN485 FISICA II

Prof. Angelo TARTAGLIA

DIP. di Fisica

II ANNO

1° PERIODO DIDATTICO

Corso di Laurea: ING. NUCLEARE

Impegno didattico

Annuale (ore)

Settimanale (ore)

Lez.

80

6

Es.

30

2

Lab.

10

2

(quindicinale)

Finalità del corso è l'apprendimento dei fondamenti dell'elettromagnetismo e dell'ottica. Si espongono le leggi sperimentali riguardanti l'interazione tra cariche ferme e in moto rispetto all'osservatore, sintetizzate infine nelle equazioni di Maxwell. Da queste ultime si ricavano le leggi di propagazione dell'onda elettromagnetica. Si espongono i principali fenomeni fisici legati alla propagazione della luce quale onda elettromagnetica e infine i fondamenti dell'ottica geometrica. Il corso è affiancato da esercitazioni orali e di laboratorio. È perseguito lo scopo di stimolare nello studente l'acquisizione delle metodologie generali della fisica come scienza applicata. Il corso si svolgerà con lezioni, esercitazioni orali, laboratori. Nozioni propedeutiche: Fondamenti di meccanica, Calcolo differenziale ed integrale, Funzioni elementari.

PROGRAMMA

Elettrostatica nel vuoto. Proprietà elettriche della materia. Fenomeni di conduzione e correnti elettriche in condizioni stazionarie. Campi magnetici stazionari. Moto di cariche in campi elettrici e magnetici stazionari. Proprietà magnetiche della materia. Campi elettromagnetici dipendenti dal tempo e loro equazioni fondamentali. onde ed onde elettromagnetiche. Propagazione della luce in mezzi isotropi. Ottica geometrica col metodo matriciale. Fenomeni interferenziali. La diffrazione. Propagazione della luce in materiali anisotropi.

ESERCITAZIONI

Risoluzione di facili esercizi e problemi relativi ai principali argomenti del corso.

LABORATORI

Uso di amperometri e voltmetri. Misura di indici di rifrazione e di lunghezze d'onda.

RICERCATORI ADDETTI ALLE ESERCITAZIONI E/O LABORATORI

M. AGNELLO

TESTI CONSIGLIATI

A. Tartaglia, *Elettromagnetismo e ottica*, Ed. Levrotto & Bella, Torino, 1987.

R. Feynman - R. Leighton - M. Sands, *La fisica di Feynman*, vol. 1 e 2, Addison Wesley, Malta, 1970.

A. Tartaglia, *300 esercizi svolti di Elettromagnetismo e ottica*, Ed. Levrotto & Bella, Torino, 1986.

IN167 FISICA ATOMICA

Prof. Luigi LUGIATO

DIP. di Fisica

III ANNO

2° PERIODO DIDATTICO

Corso di laurea: ING. NUCLEARE

Impegno didattico

Annuale (ore)

Settimanale (ore)

Lez.

90

8

Es.

30

2

Lab.

—

—

Il corso intende dare una preparazione di base sulla meccanica quantistica e gli elementi della struttura atomica.

Il corso comprende lezioni, esercitazioni.

Nozioni propedeutiche: Complementi di matematica.

PROGRAMMA

Richiami di meccanica analitica: equazioni di Lagrange e di Hamilton, spazio delle fasi, parentesi di Poisson. Elettromagnetismo: le equazioni di Maxwell, energia e quantità di moto del campo elettromagnetico, potenziali elettromagnetici, onde elettromagnetiche nel vuoto, propagazione ondosa nei mezzi dispersivi. Crisi della fisica classica: spettro del corpo nero e ipotesi di Planck, l'effetto fotoelettrico, l'effetto Compton, formula di Balmer, modello di Bohr. Aspetti ondulatori della materia; l'ipotesi di De Broglie. L'equazione di Schrödinger. Interpretazione statistica e dualismo onda-corpuscolo.

Il principio di indeterminazione di Heisenberg. La soluzione generale della equazione di Schrödinger, l'operatore Hamiltoniano. Applicazioni della equazione di Schrödinger: particella libera, buca di potenziale rettangolare, barriera di potenziale, l'effetto tunnel. L'oscillatore armonico, potenziale centrale, l'atomo di idrogeno. Formulazione generale della meccanica quantistica: postulati generali, osservabili posizione e momento, parentesi di commutazione e regole di incertezza, teorema di Ehrenfest, costanti del moto, momento angolare orbitale. Il metodo perturbativo: perturbazioni statiche, l'effetto Stark, perturbazioni dipendenti dal tempo. Teoria semiclassica della emissione e dell'assorbimento di radiazione: equazione di Schrödinger per una particella carica in un campo elettromagnetico, coefficienti di emissione e assorbimento, regole di selezione. Lo spettro dei metalli alcalini. Introduzione dello spin. Equazione di Schrödinger per una particella con spin. Struttura fina nei metalli alcalini. L'effetto Zeeman anomalo e l'effetto Paschen-Back. Approssimazione del campo centrale. Principio di esclusione. Sistema periodico degli elementi. Elementi di teoria dell'urto classica e quantistica. La formula di Breit e Wigner.

TESTI CONSIGLIATI

P. Caldirola - R. Cirelli - G.M. Prosperi, *Introduzione alla fisica teorica*, Utet, Torino, 1982.

C. Rossetti, *Istituzioni di fisica teorica*, Ed. Levrotto & Bella, Torino, 1978.

R. Rigamonti, *Introduzione alla struttura della materia*, La Goliardica Pavese, Pavia, 1977.

A. Messiah, *Quantum Mechanics*, vol. 1 e 2, North-Holland P.C., Amsterdam, 1964.

C. Cohen - Tannoudji - B. Diu - F. Laloë, *Mécanique quantique*, vol. 1 e 2, Hermann, Paris, 1973.

IN171 FISICA DEL REATTORE NUCLEARE

Prof. Silvio Edoardo CORNO

DIP. di Energetica

IV ANNO

1° PERIODO DIDATTICO

Corso di laurea: ING. NUCLEARE

Impegno didattico

Annuale (ore)

Settimanale (ore)

Lez.

80

6

Es.

50

4

Lab.

—

—

Il corso, obbligatorio sul piano nazionale per tutti gli allievi nucleari, si prefigge innanzitutto di chiarire i principi fisici di funzionamento dei reattori nucleari a fissione dal punto di vista del bilancio neutronico, sia in condizioni statiche che dinamiche. I principali metodi fisico-matematici della neutronica applicata vengono analizzati coll'intento di evidenziare il loro effettivo significato fisico, nonché le implicazioni ingegneristiche della teoria nel progetto delle centrali a fissione provate e avanzate. A partire dall'a.a. 88-89 verrà dato un certo spazio anche alle problematiche della fisica dei plasmi ad alta energia, in vista delle loro applicazioni ai reattori a fusione. L'approccio metodologico vuole essere formativo più che informativo, al fine di predisporre l'allievo ad affrontare autonomamente tutta una vasta gamma di problemi fisico-matematici caratteristici dell'energetica, che sono affini a quelli neutronici. Il corso prevede lezioni ed esercitazioni.

Esercitazioni: sia teoriche e numeriche guidate, sia svolgimento di argomenti complementari di neutronica applicata. Gli studenti possono svolgere calcoli con codici nucleari per grandi calcolatori.

Nozioni propedeutiche: Analisi matematica II, Complementi di matematica, Elementi generali di Fisica atomica e nucleare. Sono utili nozioni elementari di programmazione in Basic e Fortran.

PROGRAMMA

- 1) Brevi richiami di Fisica nucleare. Interazione dei neutroni con mezzi materiali; fissione dei nuclei pesanti e fusione dei nuclei leggeri: bilancio energetico. Fondamenti concettuali della teoria di una generica reazione a catena. I neutroni come portatori della catena. Classificazione dei reattori a fissione.
- 2) Diffusione e rallentamento dei neutroni nei mezzi materiali. Equazione di diffusione monocinetica. Moderatori. Rallentamento continuo. Metodi a multigruppi energetici. Cenno all'equazione del trasporto di Boltzmann.
- 3) Teoria della criticità delle strutture moltiplicanti. Interazione tra sorgenti neutroniche e mezzi moltiplicanti. Equazione critica dei reattori omogenei nudi, in diverse approssimazioni. Teoria della età alla Fermi. Reattori riflessi e a più zone. Transitori spettrali di interfaccia. Cenni ai due teoremi fondamentali della Fisica dei reattori.
- 4) Reattori eterogenei. Necessità ed effetti della eterogeneità. Catture in risonanza, moltiplicazioni veloci, «utilizzazione termica» nei reticoli. Strutture ad acqua, a grafite gas ed a metallo liquido. Reattori termici, intermedi e veloci autofertilizzanti.
- 5) Cinetica delle strutture moltiplicanti. Influenza dei neutroni ritardati. Soluzione delle azioni dinamiche in diverse approssimazioni. Cenni alle retroazioni di temperatura e di densità del combustibile e del moderatore. Funzione importanza dei neutroni nella statica e nella dinamica.
- 6) Reattività a lungo termine. Evoluzione del combustibile sotto irraggiamento. Avvelenamento da prodotti di fissione. Rapporto di conversione nei reattori provati ed avanzati. Autofertilizzazione nei reattori veloci al sodio. Nuovi progetti di reattori veloci eterogenei.
- 7) Il controllo delle reazioni a catena. Teoria elementare delle barre di controllo. Cenni alla distribuzione ottimale delle barre agli effetti del controllo. Nozioni elementari sulla stabilità.
- 8) Metodi perturbativi nella statica e nella dinamica. Applicazioni ad uno e due gruppi energetici.
- 9) Codici di calcolo elettronico per la progettazione neutronica delle centrali elettronucleari di potenza.

10) Formulazione delle equazioni di base della magnetofluidodinamica e del trasporto di particelle cariche, in presenza di campo elettromagnetico. Cenni alle applicazioni della fisica dei plasmi nel progetto dei reattori a fusione controllata.

TESTI CONSIGLIATI

B.Montagnini, *Lezioni di fisica del Reattore nucleare*, Università di Pisa, 1983-88.

Appunti del docente

Ulteriori letture:

J.R. Lamarsh, *Introduction to Nuclear Reactor Theory*, Ed. Addison-Wesley, Reading Mass., 1966.

A.M. Weinberg - E.P. Wigner, *The Physical Theory of Neutron Chain Reactors*, The University of Chicago Press., 1958.

A.F. Henry, *Nuclear Reactor Analysis*, MIT Press., Cambridge Mass., 1975.

S. Garg-F. Ahmed-L.S. Kothari, *Physics of Nuclear Reactors*, Tata, Mc Graw Hill P.Co., New Delhi, 1986.

IN172 FISICA MATEMATICA

Prof. Guido RIZZI

DIP. di Matematica

IV ANNO
1° PERIODO DIDATTICO
INDIRIZZO: Fisico-Strumentale

Impegno didattico	Lez.	Es.	Lab.
Annuale (ore)	60	40	—
Settimanale (ore)	4-6	2-4	—

Argomento principale del corso: introduzione alla Relatività Speciale (RS). *Argomento ulteriore (facoltativo, in ambito seminariale):* introduzione alla Relatività Generale (RG).

Concedendo uno spazio relativamente ampio a questioni di carattere metodologico, il corso intende: (i) proporre una visione sintetica, rigorosa e concettualmente semplice di un ampio dominio della fisica moderna; (ii) 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, anche a livello di ricerca.

Il corso si articola in lezioni (da 4 a 6 ore settimanali) e seminari (da 2 a 4 ore settimanali, facoltativi).

Nozioni propedeutiche: gli argomenti dei corsi di *Analisi matematica I e II, Fisica I e II, Meccanica Razionale, Geometria, Complementi di Matematica. Abbinamenti consigliati:* *Fisica Atomica e Meccanica Statistica Appl.*

PROGRAMMA

Meccanica relativistica. Vengono anzitutto introdotte le tecniche matematiche adatte allo studio dei campi e della RS (calcolo tensoriale in varietà piatte). Tali tecniche saranno utilizzate sistematicamente in tutto il corso. Si introducono i due principi della RS e lo spaziotempo minkowskiano della RS. In tale contesto si studia la meccanica della particella, sia con massa propria costante che con massa propria variabile. Tale studio viene poi esteso ai sistemi di particelle e ai continui materiali, anche in presenza di interazioni a distanza. Particolare attenzione è rivolta ai teoremi di conservazione.

Elettrodinamica relativistica. In questa parte, che è la più ampia del corso e forse la più significativa, 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.

Seminario di RG: Introduzione matematica (necessariamente ampia): forme lineari e multilineari; varietà differenziabili; varietà a connessione affine; varietà riemanniane; geodetiche e curvatura di una varietà. Calcolo tensoriale in varietà curve. Introduzione fisica: i fondamenti della RG. Red-shift gravitazionale. Gravitazione e geometria: modello matematico dello spaziotempo fisico secondo la RG. Sistemi di riferimento in RG. Equazioni gravitazionali einsteiniane. Approssimazione newtoniana; soluzione di Schwarzschild.

TESTI CONSIGLIATI

G. Rizzi, *Introduzione alla Relatività Speciale*, 2 vol., CLUT.

G. Rizzi, *Introduzione alla Relatività Generale*, Appunti.

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

V. Cantoni, *Appunti di Fisica Matematica*, Veschi, Roma, 1983.

IN173 FISICA NUCLEARE

Prof. Piero QUARATI

DIP. di Fisica

IV ANNO
1° PERIODO DIDATTICO
Corso di laurea: ING. NUCLEARE

Impegno didattico	Lez.	Es.	Lab.
Annuale (ore)	66	34	20
Settimanale (ore)	4	6	—

Il corso è indirizzato a fornire una informazione di base sui fenomeni nucleari in particolare in vista delle applicazioni di queste conoscenze nell'ambito di corsi successivi specifici dell'indirizzo di Ingegneria nucleare. Il corso si articola in due parti: a) fondamenti di Fisica nucleare sperimentale riguardante lo studio dei metodi di misura usati nella Fisica nucleare, nonché le caratteristiche generali dei rivelatori principalmente usati; b) elementi di struttura e dinamica nucleare riguardante gli aspetti principali della struttura nucleare e le caratteristiche principali delle reazioni nucleari. Lo studio teorico è sempre visto alla luce del paragone con i dati sperimentali che sono alla base di ogni metodo nucleare.

Il corso prevede lezioni, esercitazioni e laboratori.

Nozioni propedeutiche: è necessaria una conoscenza approfondita delle materie del biennio e del contenuto dei Corsi di Complementi di matematica e Fisica atomica.

PROGRAMMA

A) Fondamenti di Fisica nucleare sperimentale. Nozioni generali sul nucleo: raggi nucleari; masse nucleari ed energie di legame; momenti angolari; parità e simmetria; momenti magnetici ed elettrici; livelli energetici; carta dei nuclei; reazioni nucleari; nuclei speculari.

Decadimento radioattivo: caso di una sola sostanza; caso di due o più sostanze. Fluttuazioni statistiche in Fisica nucleare: distribuzione di Poisson; distribuzione di Gauss; applicazioni ai metodi di misura in fisica nucleare (determinazione di tempi di misura, di statistiche di conteggio, ecc.).

Passaggio di particelle e radiazioni γ nella materia: perdita di energia e range di particelle cariche; intrazioni dei raggi γ nella materia (effetto fotoelettrico, effetto Compton e produzione di coppie) interazione di neutroni nella materia.

Metodi di rivelazione in Fisica nucleare: rivelazione di particelle pesanti cariche, di elettroni, di raggi γ , di neutroni.

B) Elementi di strutture e dinamica nucleare.

Problema delle forze nucleari: trattazione fenomenologica del problema a due corpi nel caso di uno stato legato (deutone), scattering elastico nucleone-nucleone; dipendenza dallo spin delle forze nucleari; collassamento dei nuclei e cenni sulle forze di scambio.

Modelli nucleari; modello a goccia, modello a strati; cenno sui modelli collettivi; modello a gas di Fermi.

Decadimento nucleare: decadimenti alfa, beta e gamma.

Reazioni nucleari: cinematica nel sistema del laboratorio e del centro di massa, andamento delle sezioni d'urto vicino alla soglia; risonanze, teoria del nucleo composto, cenni sulle reazioni dirette. Fissione nucleare.

Fusione nucleare, astrofisica e nucleosintesi. Cenni sulla fisica delle particelle elementari.

ESERCITAZIONI

Le esercitazioni riguardano gli argomenti svolti nel corso e consistono nella risoluzione di problemi e nell'approfondimento di argomenti accennati nelle lezioni.

LABORATORI

Caratteristiche di alcuni rivelatori (contat. Geiger, a stato solido, a scintillazione). Alcuni esperimenti riguardanti l'evoluzione di fenomeni nucleari.

TESTI CONSIGLIATI

K. Krane, *Introduction to Nuclear Physics*, J. Wiley, New York, 1987.

W.E. Meyerhof, *Elements of Nuclear Physics*, Mc-Graw-Hill, New York, 1967.

K.N. Mukhin, *Experimental Nuclear Physics*, MIR, Mosca, 1988.

IN174 FISICA TECNICA

Prof. Paolo GREGORIO

DIP. di Energetica

III ANNO

1° PERIODO DIDATTICO

Corso di laurea: ING. NUCLEARE

Impegno didattico

Annuale (ore)

Settimanale (ore)

Lez.

60

4

Es.

60

4

Lab.

—

—

Il contenuto del corso è quello tradizionale della Fisica tecnica presso questa Facoltà, con particolare riferimento alla termodinamica applicata, elementi di moto dei fluidi e trasmissione del calore. Tali argomenti costituiscono un collegamento tra i corsi di Fisica del biennio e i corsi successivi del triennio (in particolare Macchine, Termocinetica, Trasmissione del calore, Impianti nucleari). Le esercitazioni grafiche e di calcolo hanno carattere individuale e vengono verificate nel corso dell'esame. Il corso comprenderà lezioni di tipo tradizionale; esercitazioni, grafiche e di calcolo. Nozioni propedeutiche: Analisi I, Analisi II, Fisica I, Fisica II.

PROGRAMMA

Termodinamica: generalità e definizioni. Primo principio della termodinamica, energia interna, entalpia. Secondo principio della termodinamica. Ciclo di Carnot. Equazione di Clausius. Entropia. Gas ideali e loro proprietà. Effetto Joule-Thomson. Macchine termiche: ciclo di Carnot, cicli rigenerativi, cicli di quattro politropiche, cicli inversi. Liquidi e vapori: proprietà delle miscele, cicli diretti, cicli rigenerativi, cicli inversi. Conversione diretta dell'energia: fenomeni termoelettrici, celle a combustibile, dispositivi termoionici, generatori MHD. Gas reali. Miscele di aria e vapor d'acqua: proprietà e diagrammi entalpici.

Moto dei fluidi e trasmissione del calore: viscosità, tipi di moto. Equazioni fondamentali. Efflusso degli aeriformi. Moto dei fluidi nei condotti. Conduzione termica stazionaria in geometria piana, cilindrica, sferica. Sistemi a superficie estesa: alette e spine. Sistemi con generazione interna di calore. Sistemi bidimensionali. Conduzione termica non stazionaria. Convezione: analisi dimensionale, coefficiente di scambio termico convettivo, analogia di Reynolds-Prandtl. Scambiatori di calore: tipi, determinazione del profilo di temperatura, metodi di calcolo (tridimensionali e NUT).

ESERCITAZIONI

Esercizi di calcolo di termodinamica fondamentale. Esercitazioni di calcolo e grafiche su cicli a gas e a vapore. Calcolo di uno scambiatore di calore.

TESTI CONSIGLIATI

C. Boffa - P. Gregorio, *Elementi di fisica tecnica*, vol. 2, Ed. Levrotto & Bella, Torino.

IN477 GEOMETRIA I

Prof. Carla MASSAZA

DIP. di Matematica

I ANNO

2° PERIODO DIDATTICO

Corso di Laurea: ING. NUCLEARE

Impegno didattico

Annuale (ore)

Settimanale (ore)

Lez.

80

6

Es.

52

4

Lab.

—

—

Il corso si propone di fornire agli studenti una preparazione di base per lo studio di problemi con l'uso di coordinate in relazione alla geometria analitica del piano e dello spazio. Una parte del corso è anche dedicata al calcolo matriciale, oltre che allo studio delle funzioni di più variabili reali.

Il corso si svolge in lezioni ed esercitazioni.

Nozioni propedeutiche: si trovano nel corso di Analisi matematica I, con particolare riguardo alle proprietà dei numeri reali e complessi e alle operazioni di integrazione e di derivazione.

PROGRAMMA

Vettori liberi ed applicati. Operazioni fondamentali sui vettori ed applicazioni geometriche. Geometria analitica del piano. Coniche come curve del 2° ordine. Altri luoghi geometrici. Geometria analitica dello spazio. Coordinate cartesiane, cilindriche e sferiche. Proprietà generali di curve e superficie. Sfere e circonferenze. Coni e cilindri. Superficie di rotazione e quadriche. Elementi di geometria differenziale delle curve. Curve in forma parametrica. Lunghezza di un arco di curva.

Triedro fondamentale, curvatura e torsione. Applicazioni.

Spazi vettoriali, matrici e sistemi lineari. Sottospazi. Dimensione. Operatori lineari e matrici, con relative operazioni. Risoluzione di sistemi lineari. Autovalori ed autovettori di un operatore lineare. Calcolo differenziale per funzioni di più variabili. Funzioni di più variabili a valori reali, dominio, limiti. Derivate parziali e direzionali. Gradiente, differenziale. Massimi e minimi relativi.

Funzioni a valori vettoriali e matrice jacobiana. Applicazioni geometriche: retta tangente ad una curva, piano tangente ad una superficie.

ESERCITAZIONI

Illustrazione mediante esempi ed esercizi dei vari aspetti del programma.

TESTI CONSIGLIATI

Greco - Valabrega, *Lezioni di Matematica per allievi ingegneri*, vol. 2 (in due parti), Ed. Le-vrotto & Bella, Torino.

AA.VV., *Esercizi di Geometria*, Ed. Celid.

IN226 IMPIANTI NUCLEARI

Prof. Carlo ARNEODO

DIP. di Energetica

IV ANNO
2° PERIODO DIDATTICO
Corso di laurea: ING. NUCLEARE

Impegno didattico	Lez.	Es.	Lab.
Annuale (ore)	90	20	—
Settimanale (ore)	6	2	—

Il corso introduce lo studente nel campo dell'impiantistica delle centrali nucleari e serve da raccordo, per l'indirizzo impiantistico, fra i corsi precedenti o contemporanei (Fisica tecnica, Macchine, Termoidraulica bifase degli impianti nucleari) e quelli successivi (C. di I.N.; Dinamica e controllo degli impianti nucleari, Termotecnica del reattore). I temi trattati riguardano gli impianti basati sui reattori ad acqua (PWR e BWR), con cenni ai reattori veloci ed a quelli ad uranio naturale e grafite e tipo HTGR.

Il corso comprende lezioni e seminari (tenuti dal docente) ed esercitazioni di calcolo. Nozioni propedeutiche: Fisica tecnica, Macchine, Termoidraulica bifase degli Impianti Nucleari, Chimica.

PROGRAMMA

Introduzione: richiami di trasmissione del calore e moto dei fluidi; flussi termici di burn-out. Impianti con reattore tipo PWR: descrizione di Trino e Sequoya; calcolo andamento temperature acqua e parete, temperature centro pellet, flusso di burn-out (W3, Babcoke Wilcox); descrizione e calcolo del generatore di vapore a U rovesciato (temp. primaria, velocità di circolazione naturale, instabilità); calcolo di un generatore di vapore tipo Babcoke e Wilcox; calcolo del transiente termico in una pellet.

Impianti con reattore tipo BWR; descrizione di Caorso e di Douglas Point; calcolo dell'andamento della pressione dopo un LOCA in un contenitore di sicurezza (Mark III).

Sicurezza degli impianti: dosi e radiazioni rapporto Rasmussen; incidenti in Impianti (Three Mile Island); massimo incidente nei reattori veloci.

ESERCITAZIONI

Esecuzione di calcoli, con programmi in Fortran ed altri linguaggi, relativi agli argomenti del corso (generatore di vapore, transienti ecc.).

TESTI CONSIGLIATI

Appunti del docente.

Cumo, *Impianti nucleari*, Ed. Utet, Torino.

IN248 MACCHINE

Prof. Paolo CAMPANARO

DIP. di Energetica

IV ANNO

2° PERIODO DIDATTICO

Corso di laurea: ING. NUCLEARE

Impegno didattico

Annuale (ore)

Settimanale (ore)

Lez.

84

6

Es.

50

4

Lab.

—

—

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 nei problemi di scelta, di installazione, di regolazione, sia in sede di lezione sia in sede di esercitazione, dove vengono esemplificate le necessarie calcolazioni.

Il corso prevede periodi di lezione e di esercitazione coordinati tra loro.

Sono nozioni propedeutiche essenziali quelle presenti nel corso di Fisica tecnica e, in parte, nel corso di Meccanica applicata alle macchine (o di Meccanica delle macchine).

PROGRAMMA

Considerazioni generali sulle macchine a fluido motrici ed operatrici. Classificazioni. Applicazione di concetti di termodinamica e fluidodinamica alle macchine. 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. Turbine a vapore. Triangoli di velocità. Stadi ad azione e a reazione, portate, potenze, rendimento. Regolazione degli impianti. La condensazione degli impianti a vapore. 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, funzionamento, perdite caratteristiche, regolazione. Turbine a gas: considerazioni termodinamiche sul ciclo; organizzazione meccanica; funzionamento e regolazione degli impianti. Ciclo con aria e ciclo con elio: analisi comparata delle due soluzioni. Macchine idrauliche motrici e operatrici; turbine Pelton, Francis, Kaplan e loro regolazione. Le turbopompe, loro regolazione. Pompe volumetriche. La cavitazione nelle turbomacchine idrauliche. Le pompe-turbine. Motori alternativi a combustione interna: classificazione, cicli di lavoro. Perdite caratteristiche, rendimenti, prestazioni. Alimentazione e regolazione di tali motori.

ESERCITAZIONI

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

TESTI CONSIGLIATI

Appunti delle lezioni sono messi a disposizione degli allievi.

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

A. Beccari, *Macchine*, vol. 1, Clut, Torino, 1980.

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

IN270 MECCANICA DELLE MACCHINE

Prof. Giovanni JACAZIO

DIP. di Meccanica

III ANNO
2° PERIODO DIDATTICO
Corso di laurea: ING. NUCLEARE

Impegno didattico	Lez.	Es.	Lab.
Annuale (ore)	70	52	8
Settimanale (ore)	6	4	—

Il corso tratta i problemi relativi alla trasmissione della potenza e si suddivide nei seguenti capitoli fondamentali: 1) forze agenti negli accoppiamenti meccanici; 2) componenti impiegati nella trasmissione del moto; 3) dinamica dei sistemi meccanici. Il corso viene svolto mediante lezioni cattedratiche, esercitazioni (svolgimento di problemi) e laboratorio.

PROGRAMMA

Principi generali di meccanica (classificazione delle forze, equazioni fondamentali della dinamica, unità di misura).

Forze agenti negli accoppiamenti (aderenze e attrito, attrito volvente, contatti d'urto).

La trasmissione del moto (giunti, flessibili, ingranaggi, rotismi, viti, canne, meccanismi, freni, arresti, innesti, cuscinetti a rotolamento e lubrificati).

I sistemi meccanici (rappresentazione e studio dei sistemi meccanici, tecnici per l'analisi dei sistemi, sistemi lineari a parametri concentrati, sistemi lineari a parametri distribuiti, servomeccanismi, stabilità dei sistemi lineari, metodi di studio dei sistemi non lineari, sistemi meccanici non lineari).

Equilibramento dei sistemi rotanti.

Fenomeni giroscopici.

ESERCITAZIONI

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

LABORATORI

Nei laboratori vengono presentati alcuni componenti e meccanismi di particolare interesse.

TESTI CONSIGLIATI

G. Jacazio - B. Piombo, *Meccanica applicata alle macchine*, Ed. Levrotto & Bella, Torino, 1977.

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

IN487 MECCANICA RAZIONALE

Prof. Riccardo RIGANTI

DIP. di Matematica

II ANNO

2° PERIODO DIDATTICO

Corso di Laurea: ING. NUCLEARE

Impegno didattico

Annuale (ore)

Settimanale (ore)

Lez.

80

6

Es.

30

2

Lab.

20

2

Il corso ha come finalità l'acquisizione dei fondamenti della Meccanica e dei relativi metodi matematici di studio. Viene trattata la Meccanica del corpo rigido e dei sistemi articolati. Vengono esposti i principi fondamentali della Meccanica Newtoniana, lagrangiana e hamiltoniana, nonché i loro sviluppi analitici ed applicativi con particolare attenzione ai problemi che interessano l'Ingegneria.

Il corso consta di lezioni ed esercitazioni in aula e presso il L.A.I.B..

Nozioni propedeutiche: gli argomenti dei corsi di Analisi matematica, Geometria I e Fisica I.

PROGRAMMA

Cinematica: Cinematica del punto. Sistemi rigidi: moti rigidi piani, leggi di distribuzione di velocità e accelerazioni, moti composti, polari, profili coniugati, sistemi articolati. Vincoli e gradi di libertà. Estensione allo spazio degli argomenti suddetti.

Statica: Vettori applicati e momenti. Riduzione di sistemi di vettori applicati. Baricentri, momenti statici, d'inerzia e centrifughi e loro proprietà. Reazioni vincolari in assenza di attrito. Concetto di equilibrio, equazioni cardinali, principio dei lavori virtuali. Forze conservative.

Dinamica: Principio di D'Alembert, riduzione delle forze d'inerzia. Teoremi della quantità di moto e del momento delle quantità di moto. Teorema dell'energia cinetica.

Equazioni di Lagrange. Integrali primi.

Elementi di calcolo delle probabilità, variabili aleatorie e processi stocastici.

Stabilità e analisi qualitativa del moto: Linearizzazione delle equazioni del moto e metodi di studio analitico-numeric.

Meccanica analitica: Principi di Hamilton e Maupertuis: trasformazioni canoniche.

ESERCITAZIONI

Vengono proposti agli allievi, e quindi risolti analiticamente, graficamente e numericamente, problemi di carattere applicativo attinenti agli argomenti del corso.

LABORATORIO

Si propone agli studenti, suddivisi in piccoli gruppi, l'analisi deterministica e probabilistica della risposta di un sistema meccanico, da effettuarsi con l'impiego di Personal Computers del L.A.I.B.

TESTI CONSIGLIATI

R. Riganti, *Fondamenti di Meccanica Classica*, Levrotto & Bella, Torino, 1988.

R. Riganti, *Sistemi Stocastici*, Levrotto & Bella, Torino, 1987.

IN281 MECCANICA STATISTICA APPLICATA

Prof. Mario RASETTI

DIP. di Fisica

V ANNO

2° PERIODO DIDATTICO

INDIRIZZO: Fisico-Strumentale

Impegno didattico

Annuale (ore)

Settimanale (ore)

Lez.

75

6

Es.

20

2

Lab.

—

—

Il corso intende dare agli studenti una buona conoscenza operativa nelle aree più rilevanti della Meccanica statistica: fenomeni di equilibrio, sia classici che quantistici, e di non-equilibrio; processi stocastici e teoria del trasporto; nonché fornire una serie di esempi di applicazione, soprattutto rilevanti alla fisica dei reattori, alla chimica, alla termodinamica, alla fisica dei fluidi classici e quantistici (in particolare nei suoi aspetti di più diretto interesse per l'elettronica), alla fisica dei plasmi e del progetto di reattori a fusione.

Il corso comprende lezioni ed esercitazioni teoriche.

Nozioni propedeutiche: principi generali della Fisica sia classica che moderna (termodinamica, elettromagnetismo, meccanica classica e quantistica), Matematica: generale e complementi.

PROGRAMMA

Principi fondamentali della meccanica statistica: spazio delle fasi; ergodicità e mixing; teorema di Liouville.

Fenomeni di equilibrio: il concetto di ensemble; ensemble microcanonico, canonico e gran canonico; funzione di partizione; teorema di equipartizione; gas perfetto; potenziali termodinamici.

Sistemi quantistici: Fermi-Dirac; Bose-Einstein; condensazione bosonica.

Fenomeni di non-equilibrio: teorema di Wiener; teorema di Nyquist; moto Browniano; equazioni di Langevin e di Fokker-Planck; Random Walk.

Teoria cinetica; termodinamica dei processi irreversibili: relazioni di Onsager; teorema di fluttuazione e dissipazione.

Applicazioni: gas reale; relazioni chimiche; solidi: proprietà elettriche, elettroniche, termiche, magnetiche dei solidi (metalli, semiconduttori); processi cooperativi e transizioni di fase: superconduttività, ferromagnetismo; polimeri; plasmi e sistemi condensati ionizzati e nuclearmente reattivi (reattori a fusione); proprietà di trasporto neutronico: effetti quantistici.

ESERCITAZIONI

Svolgono problemi ed esempi relativi alle applicazioni e simulazioni al calcolatore.

TESTI CONSIGLIATI

M. Rasetti, *Modern Methods in Statistical Mechanics*, World Scientific Publ. Co.; Teanek, N.J., U.S.A., 1987.

IN287 METODI NUMERICI DELL'INGEGNERIA NUCLEARE

Prof. Gianni COPPA

DIP. di Energetica

V ANNO

2° PERIODO DIDATTICO

INDIRIZZO: Neutronico-Controllistico

Impegno didattico

Annuale (ore)

Settimanale (ore)

Lez.

Es.

Lab.

80

30

—

6

2

—

Il corso si propone di fornire le nozioni fondamentali sui principali algoritmi di uso corrente per la soluzione numerica di alcuni rilevanti e significativi problemi dell'ingegneria nucleare. Particolare attenzione è dedicata ai modelli di bilancio neutronico e termoidraulico ed all'analisi dinamica e di sicurezza dei reattori nucleari. Corsi propedeutici e complementari: Fisica del Reattore Nucleare, Impianti Nucleari, Reattori Nucleari, Dinamica e Controllo degli Impianti Nucleari.

PROGRAMMA

- Tecniche numeriche per la soluzione di sistemi differenziali, integro differenziali ed integrali con particolare riguardo alle applicazioni alla teoria della diffusione e del trasporto dei neutroni e del calore: differenze finite, elementi finiti e «coarse mesh».
- Metodi di discretizzazione angolare per l'equazione del trasporto; metodi delle ordinate discrete e di sintesi spazio-angolare; tecniche variazionali.
- Tecniche per il calcolo degli effetti dell'assorbimento in risonanza. Codici di media energetica delle sezioni d'urto.
- Metodi numerici per la soluzione di problemi dipendenti dal tempo nei reattori nucleari. Soluzioni delle equazioni puntiformi, spaziali e spettrali. Accoppiamento fra neutronica e termoidraulica. Codici dinamici di controllo e sicurezza. Metodi di calcolo del burn up e di ottimazione.
- Tecniche numeriche per la risoluzione di problemi di trasporto non lineari, tipici di reattori a fusione.

ESERCITAZIONI

Le esercitazioni prevedono la descrizione di codici di uso corrente nella progettazione e nell'analisi di sicurezza dei reattori nucleari, e la messa a punto di programmi numerici su alcuni argomenti del corso.

TESTI CONSIGLIATI

B. Montagnini, *Lezioni di Fisica del Reattore Nucleare*, Università di Pisa, 1983.

J.J. Duderstadt, W.R. Martin, *Transport Theory*, Wiley, New York, 1979.

G.I. Marchuk, V.I. Lebedev, *Numerical Methods in the Theory of Neutron Transport*, Harwood, New York, 1987.

Y. Ronen, *Handbook of Nuclear Reactor Calculations*, CRC Press, Boca Raton, 1986.

E.E. Lewis, W.F. Miller, jr., *Computational Methods of Neutron Transport*, Wiley, New York, 1984.

IN301 MISURE NUCLEARI

Prof. Francesca DEMICHELIS

DIP. di Fisica

V ANNO

Impegno didattico

Lez. Es. Lab.

1° PERIODO DIDATTICO

Annuale (ore)

72

INDIRIZZO: Fisico-Strumentale

Settimanale (ore)

6

Il corso si propone di fornire agli allievi una rassegna sulla metodologia impiegata in misure di grandezze fisiche nucleari con particolare interesse nel campo della ingegneria nucleare.

Esso comprende unicamente ore di lezione.

PROGRAMMA

Tipi di misure nel campo della spettrometria nucleare.

Rivelazione di particelle α e β e di radiazioni γ . Spettrometria γ . Studio degli schemi di decadimento di nuclidi radioattivi.

Misure di coefficienti di conversione interna. Misure di coincidenze delle radiazioni.

Intensità delle sorgenti radioattive. Misure relative. Metodo di confronto.

Misure assolute di intensità di sorgenti radioattive. Correlazione ancolare e nella emissione delle radiazioni.

Problemi di focalizzazione di particelle cariche in campo magnetico.

Traiettorie di particelle cariche in campi magnetici. Oscillazioni betatroniche. Lenti magnetiche. Varii tipi di lenti magnetiche. Quadrupoli magnetici. Traiettorie di particelle cariche in un quadrupolo magnetico. Ottica dei fasci. Studio dell'ottica mediante matrici.

Applicazioni delle matrici all'ottica dei fasci.

Analisi di materiali tramite tecniche nucleari.

Rutherford back-scattering e reazioni nucleari per l'analisi elementale.

Spettrometria Auger.

Tecniche ESCA SIMS e XPS.

Misure nel campo della Fisica dei neutroni.

Proprietà caratteristiche dei neutroni. Relazioni fra lunghezze d'onda, energia, velocità.

Sorgenti di neutroni veloci. Sorgenti di neutroni termici. Sorgenti pulsate.

Neutroni monoenergetici di varie lunghezze d'onda.

Selettori meccanici dei neutroni.

Chopper meccanico e fenditure rettilinee. Chopper a fenditure curve. Risoluzione in energia.

Chopper fasati. Chopper a fenditure elicoidali.

Spettrometria di neutroni «Pulse-shape discrimination». Spettrometri a tempi di volo.

Misure di flussi.

Misure di sezioni d'urto. Sezioni d'urto totali. Inscattering semplice. Inscattering multiplo.

Misure di sezioni d'urto non elastiche. Misure di sezioni d'urto non elastiche con il metodo di trasmissione attraverso una sfera.

Moltiplicazione di neutroni e di misure di trasmissione.

Sezioni d'urto di cattura, di attivazione e di fissione.

Scattering di neutroni da un nucleo fisso. Sezione d'urto di scattering ad ampiezze di scattering.

Ampiezza e lunghezza di scattering. Lunghezze di scattering positive e negative. Scattering di neutroni con spin diverso da zero. Scattering magnetico. Scattering coerente ed incoerente.

Scattering da nuclei vincolati.

Proprietà ottiche dei neutroni.

Indice di rifrazione per i neutroni.

Riflessione totale di neutroni. Angolo critico. Riflessione di Bragg. Scattering a basso angolo.

Polarizzazione dei neutroni. Doppia trasmissione di neutroni polarizzati. Riflessione da specchi magnetici. Doppia riflessione dei neutroni. Esperienza sui neutroni analoga a quella di Stern Gerlach.

Misure del momento magnetico del neutrone. Misura dell'ampiezza scattering dei neutroni.

Interazione neutrone-elettrone. Misura della simmetria angolare nello scattering dei neutroni.
Misura della carica del neutrone. Effetto del campo gravitazionale sui neutroni.
Misura del decadimento dei neutroni. Neutroni ultrafreddi.

TESTI CONSIGLIATI

B.F. Turchin, *Slow Neutron*.

Gurevich, *Low energy neutron Physics*.

Marton, *Method of Experimental Physics*.

Steffen, *High energy beam optics*.

Siegbahn, *α , B , γ , Ray Spectroscopy*.

IN550 PROTEZIONE E SICUREZZA NEGLI IMPIANTI NUCLEARI

Prof. Luigi GONELLA

DIP. di Fisica

V ANNO

1° PERIODO DIDATTICO

INDIRIZZO: Neutronico-Controllistico

Impegno didattico

Annuale (ore)

Settimanale (ore)

Lez.

78

6

Es.

—

—

Lab.

—

—

Il corso si propone di fornire le nozioni di radioprotezione e i principi dell'analisi di sicurezza usata in campo nucleare, ponendo particolare 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.

Nozioni propedeutiche: nozioni generali di Fisica nucleare, Fisica del reattore nucleare, Impianti nucleari.

PROGRAMMA

- 1) Il concetto e la misura del rischio. Quadro globale dei rischi della vita comune e delle attività civile e industriali. Rischi d'azione e di carenza, immediati e ritardati. Legami tra il rischio e l'impatto ambientale. Metodologia generale dei sistemi di protezione e sicurezza.
- 2) Trasferimento di energia nell'interazione tra radiazione e materia. Grandezze dosimetriche. Relazione fluenza-dose per le diverse radiazioni.
- 3) Effetti biologici e sanitari delle radiazioni ionizzanti. Relazione dose-effetto. Equivalente di dose. Esposizione di una popolazione. Posizione delle radiazioni ionizzanti nel quadro generale degli agenti genotossici.
- 4) Criteri generali della radioprotezione. Dose permessibile e principio ALARA. Livelli di riferimento e stati di emergenza. Normativa internazionale e nazionale. Confronto con le normative di sicurezza e protezione in altri campi.
- 5) Metodi di valutazione dell'esposizione interna all'organismo. Concentrazioni massime permissibili.
- 6) Fondo naturale. Sorgenti industriali e miscellanee. Il reattore come sorgente di radiazione da schermare.
- 7) Metodi di dimensionamento delle schemature per gamma e neutroni.
- 8) Impostazione delle analisi di sicurezza. Il rischio dell'elettroproduzione nucleare in confronto a quello di altri mezzi di produzione di energia e nel quadro generale dei rischi.

TESTI CONSIGLIATI

Appunti dalle lezioni.

IN349 REATTORI NUCLEARI

Prof. Piero RAVETTO

DIP. di Energetica

V ANNO

1° PERIODO DIDATTICO

INDIRIZZO: Neutronico-Controllistico

Impegno didattico

Annuale (ore)

Settimanale (ore)

Lez.

80

6

Es.

20

2

Lab.

—

—

Il corso è destinato agli allievi del 5° anno, che si prefiggono di approfondire gli aspetti neutronici della Ingegneria nucleare, sia in ordine ai metodi di progettazione dei noccioli, che per la soluzione dei problemi di statica e dinamica che sorgono nell'esercizio delle centrali di potenza. Rappresenta un approfondimento di argomenti tipici di Fisica dei reattori nucleari e ha lo scopo di mettere in contatto gli allievi con alcuni metodi matematici più avanzati e rigorosi di formulazione teorica della neutronica, su cui si basano attualmente i codici di progettazione per computer. Il corso si prefigge inoltre di avviare gli allievi ad affrontare problemi originali di ricerca scientifica, in neutronica applicata, specie nel campo della dinamica.

Alle lezioni teoriche seguiranno esercitazioni teoriche e numeriche di applicazioni degli argomenti trattati.

Nozioni propedeutiche: corso di Fisica del reattore nucleare.

PROGRAMMA

1) Teoria del trasporto di neutroni e dei fotoni. Diverse forme della equazione di Boltzmann linearizzate per i neutroni e loro mutua equivalenza. La forma del secondo ordine. Sviluppo in armoniche sferiche della densità in fase. Approssimazione PL e BL. Spettro neutronico in rallentamento. Metodo delle ordinate discrete e SN. L'equazione aggiunta e il concetto di importanza. Il metodo Monte Carlo.

2) Teoremi fondamentali della Fisica del reattore nucleare. Loro dimostrazione rigorosa nell'ambito delle teorie asintotiche spaziali. Calcolo delle sezioni di urto a molti gruppi energetici. Transitori di interfaccia nelle strutture moltiplicanti non omogenee.

3) Metodi analitici e numerici nella soluzione di problemi di dinamica spaziale dal punto di vista neutronico. Transitori di espulsione di barre di controllo da reattori nudi e riflessi. Teorema di equivalenza tra strutture moltiplicanti che evolvono con legge esponenziale pura e stazionarie. Teoria rigorosa della «funzione importanza dei neutroni». Concetto di autostati dinamici e metodi perturbativi in neutronica.

4) La cinetica puntiforme. Metodi di separazione. Deduzione delle equazioni della cinetica puntiforme e studio di soluzioni rigorose e approssimate.

Il metodo quasistatico.

5) Cenni sulle particolarità della fisica dei reattori veloci autofertilizzanti.

6) Neutronica per lo studio dei blanket dei reattori a fusione.

ESERCITAZIONI

Oltre alle esercitazioni teoriche è previsto l'uso di codici numerici per lo svolgimento di alcuni calcoli tipici della neutronica dei reattori di potenza.

TESTI CONSIGLIATI

G.I. Bell - S. Glasstone, *Nuclear Reactor Theory*, Van Nostrand Reinh., New York, 1970.

B. Davison, *Neutron Transport Theory*, Oxford U.P., 1958.

Z. Akcasu, *Mathematical Methods in Nuclear Reactor Dynamics*, Academic Press, New York, 1971.

V. Boffi, *Fisica del Reattore Nucleare*, 2 voll., Patron, Bologna, 1975.

Appunti del docente.

J.J. Duderstadt - L.J. Hamilton, *Nuclear Reactor Analysis*, Wiley, New York, 1976.

A. Henry, *Nuclear Reactor Analysis*, MIT Press., Cambridge Mass., 1975.

IN554 RIVELATORI DI RADIAZIONI, TRASDUTTORI E SENSORI

Prof. Aldo PASQUARELLI

DIP. di Fisica

V ANNO

1° PERIODO DIDATTICO

INDIRIZZO: Fisico-strumentale

Impegno didattico

Annuale (ore)

Settimanale (ore)

Lez.

Es.

Lab.

52

—

52

4

—

4

Pur appartenendo al Corso di Laurea Nucleare, l'insegnamento intende fornire specifiche conoscenze teoriche e sperimentali nel campo delle misure di grandezze fisiche in tutti i corsi di laurea in ingegneria.

La sua interdisciplinarietà lo rende pertanto utile per tutti gli studenti che nutrono interessi nel campo delle misurazioni e acquisizione dati a livello industriale. L'opportunità del corso discende dal grande sviluppo che oggi ha conseguito lo specifico settore.

Materie propedeutiche: materie del biennio, Elettrotecnica.

PROGRAMMA

- 1) Principi fisici utilizzati nella costruzione dei sensori.
- 2) Senso di a) forza; b) pressione; c) umidità relativa; d) portata; e) velocità d'un fluido; f) temperatura; g) posizionamento; h) velocità e accelerazione.
- 3) Utilizzazione dei sensori. Loro trasformazione in trasduttori.
- 4) Problema generale delle compensazioni (in temperatura, in pressione).
- 5) Problema generale della linearizzazione.
- 6) Problema generale della sicurezza (caso particolare: sicurezza intrinseca).
- 7) Convertitori X-luce, gamma-luce, uso come trasduttori.
- 8) Trasduttori ad ultrasuoni; uso nella trasduzione di determinate grandezze fisiche.
- 9) Trasmettitori di segnale - acquisizione dati.

LABORATORI

- A) Misure di portata con flangia tarata: il rilevamento del Delta p., p e T avviene con trasduttori. La conversione in portata viene eseguita in modo analogico.
- B) Taratura d'un igrometro capacitivo.
- C) Misure di portata (gas) con sensore anemometrico.
- D) Misure di spostamento e di angolo.
- E) Modello d'acquisizione dati semplificato con gestione d'un voltmetro digitale e di una stampante.

Altre misure di interesse specifico per altri corsi di laurea possono essere prese in considerazione all'interno dell'insegnamento.

TESTI CONSIGLIATI

Petternell - Vitelli, *Strumentazione industriale*, Utet, Torino.

O. Doebelin, *Measurement Systems*, I.S.E.

Serie di monografie dei principali costruttori.

IN360 SCIENZA DELLE COSTRUZIONI

Prof. Ugo ROSSETTI

DIP. di Ingegneria Strutturale

III ANNO
1° PERIODO DIDATTICO
Corso di laurea: ING. NUCLEARE

Impegno didattico	Lez.	Es.	Lab.
Annuale (ore)	52	48	4
Settimanale (ore)	4	4	—

Il Corso intende fornire i fondamenti della teoria dell'elasticità, della teoria delle travi inflesse e dei problemi della stabilità dell'equilibrio, il Corso illustra taluni aspetti applicativi al fine di far conoscere la problematica tecnica legata alla resistenza dei materiali.

Il Corso è articolato in lezioni, esercitazioni in aula e prove di laboratorio. Sono propedeutiche nozioni generali di Analisi Matematica, Geometria, Fisica e Statica.

PROGRAMMA

Richiami di statica e di geometria delle aree:
Elementi strutturali. Azioni sulle strutture.
Equilibrio di forze e coppie. Caratteristiche sollecitazione.
Deformazioni di travi inflesse.
Principio lavori virtuali. Strutture iperstatiche.
Analisi della deformazione e dello stato di tensione. Problema di de Saint Venant.
Casi semplici di sollecitazione: trazione, flessione. Problema della sezione parzializzata.
Il cemento armato. Cenni di precompresso.
La torsione. Molle. Alberi di trasmissione.
Teoria approssimata del taglio.
Problemi di instabilità per carico di punta.
Tensioni composte.
Tensioni ideali e limiti di resistenza.
Teorie recenti sulla rottura di materiali e strutture.

ESERCITAZIONI

Applicazioni numeriche ed analitiche; accertamenti.

LABORATORI

Presentazione prove meccaniche e strumentazione di misura.

TESTI CONSIGLIATI

Dispensa delle lezioni con esercizi (a cura del Dipartimento).
A. Sassi - G. Faraggiana, *Applicazioni di Scienza delle Costruzioni*, Ed. Levrotto & Bella, Torino, 1986.
P. Cicala, *Estratto delle lezioni di Scienza delle Costruzioni*, Ed. Levrotto & Bella, 1973.

IN559 SORGENTI DI RADIAZIONE E MACCHINE ACCELERATRICI

Prof. Pier Paolo DELSANTO

DIP. di Fisica

V ANNO

2° PERIODO DIDATTICO

INDIRIZZO: Fisico-Strumentale

Impegno didattico

Annuale (ore)

Settimanale (ore)

Lez.

60

6

Es.

10

—

Lab.

—

—

Il corso si propone di dare agli studenti le nozioni fondamentali riguardanti il funzionamento, i criteri di progetto e le caratteristiche di fascio delle macchine acceleratrici più comunemente impiegate nel campo delle applicazioni, in particolare industriali e biomediche. Gli acceleratori sono visti in stretta connessione coi problemi di schematura, dosimetria, trasporto di fascio e vuoto ad essi correlati. Si danno cenni sulle sorgenti a radioisotopi e sulle loro applicazioni.

Il corso è articolato in lezioni. Sono previste alcune esercitazioni strutturate come sviluppo e complemento delle lezioni stesse.

Nozioni propedeutiche: Nozioni elementari di relatività ristretta e di Fisica nucleare.

PROGRAMMA

Circuiti magnetici e curve di demagnetizzazione. Acceleratori elettrostatici: Cockroft-Walton e Van de Graaff. Cenni sulla teoria della scarica nei gas. Legge di Paschen. Equazione di Fowler-Nordheim. Lenti elettromagnetiche e approssimazione parassiale. Confronto fra i diversi tipi di acceleratori elettromagnetici. Principio della stabilità di fase. Sorgenti ioniche. Perdite di energia per radiazione. Effetto di coerenza. Condizioni di stabilità e oscillazioni di betatrone. Iniezione e utilizzo degli elettroni in un betatrone. Diversi tipi di sincrotroni. Equazione di fase e oscillazioni di sincrotrone. Effetti di risonanza. Sincrotroni a gradiente alterato. Calcolo del diagramma di stabilità col metodo delle matrici caratteristiche. Altri tipi di acceleratori: Linacs, Ciclotroni e Sincrociclotroni. SSC e altri programmi internazionali in via di sviluppo. Cenni sulle applicazioni degli acceleratori in campo scientifico, industriale e biomedico. Cenni sulle sorgenti a radioisotopi e loro impieghi.

TESTI CONSIGLIATI

S. Humphries, jr., *Principles of Charged Particle Acceleration*, J. Wiley, 1986.

E. Persico, E. Ferrari, S.E. Segre, *Principles of Particle Accelerators*, W.A. Benjamin, 1968.

W. Scharf, *Particle Accelerators and Their Uses*, Harwood Acad. Publ., 1986.

IN380 STRUMENTAZIONE FISICA

Prof. Luigi GONELLA

DIP. di Fisica

IV ANNO
2° PERIODO DIDATTICO
INDIRIZZO: Fisico-Strumentale

Impegno didattico	Lez.	Es.	Lab.
Annuale (ore)	90	—	—
Settimanale (ore)	6	—	—

Si presenta la problematica delle apparecchiature utilizzanti a fini applicativi fenomeni fisici che l'usuale didattica tratta solo nell'ambito dei corsi di fisica. Tali apparecchiature, ampiamente usate in vasti settori industriali, ben ricadono nella competenza degli ingegneri nucleari che hanno maggior formazione in campo fisico dei colleghi di altri rami. Si affronta il tema coll'esempio di due settori di largo interesse applicativo, la strumentazione da vuoto e quella ottica, ed una trattazione sugli sviluppi odierni della metrologia. L'enfasi vien posta sull'evoluzione di linguaggio, metodo, e definizione stessa dei problemi che si richiede per passare dall'approccio scientifico dei testi di fisica a quello ingegneristico.

Il corso prevede lezioni con alcune esercitazioni progettuali e visite d'istruzione. Nozioni propedeutiche: Biennio, Fisica tecnica, Elettrotecnica.

PROGRAMMA

Metrologia odierna: sostituzione del concetto d'incertezza a quello d'errore; tipi di grandezze misurabili; grandezze d'influenza e taratura.

Strumentazione da vuoto: fenomenologia fondamentale dei gas a bassa pressione; parametri applicativi dedotti dalla teoria cinetica dei gas e loro limiti; unità di misura; regimi di flusso; portata di condotti; velocità di svuotamento; sorzione e degasamenti; fenomeni elettrici; getteraggio e spruzzamento; pompe e vacuometri dei vari tipi; giunzioni e valvole; tecnologia dell'impianto; misura gas residuo; cercafughe.

Strumentazione ottica: radiometria e fotometria; problematica generale dello strumento ottico; tecnologia dei fenomeni ottici; sorgenti e rivelatori di luce, compreso occhio umano; formazione d'immagini; ottica parassiale e suo trattamento matriciale; pupille e finestre; fotometria d'immagine; aberrazioni e loro correzione; la formazione d'immagine come trasferimento d'informazione; funzione di trasferimento ottico; approccio in termini di diffrazione e trasformazione di Fourier; strumentazione basata sulla deformazione dell'immagine per lo studio ottico dei materiali.

ESERCITAZIONI

Progetto di un impianto da vuoto. Calcoli fotometrici su sistemi ottici.

TESTI CONSIGLIATI

S. Allaria, *Il vuoto oggi*, Paravia TSP 4.
Appunti del corso.

IN426 TECNOLOGIE NUCLEARI

Prof. Giovanni DEL TIN

DIP. di Energetica

V ANNO

II PERIODO DIDATTICO

INDIRIZZO: Termoidraulico-Strutturistico

Impegno didattico

Annuale (ore)

Settimanale (ore)

Lez.

74

6

Es.

18

2

Lab.

—

—

La prima parte del corso si propone di fornire le nozioni di base sulla tecnologia e sulle proprietà dei materiali impiegati negli impianti nucleari a fissione e fusione, con particolare riguardo agli aspetti concernenti il danno da radiazione e la progettazione dell'elemento di combustibile.

La seconda parte riguarda invece il ciclo del combustibile fuori pile. Il corso prevede lezioni e due o tre esercitazioni.

Nozioni propedeutiche: Fisica del reattore, Impianti nucleari.

PROGRAMMA

I materiali nucleari, loro caratteristiche e proprietà: i combustibili, i moderatori, i materiali strutturali, i refrigeranti.

Effetto delle radiazioni e delle fissioni nei solidi cristallini: nozioni generali.

Effetto delle radiazioni sui materiali.

Cenni di meccanica della frattura.

Progetto e costruzione dell'elemento di combustibile.

Il ciclo del combustibile.

Arricchimento dell'uranio: le tecniche. Teoria e pratica della cascata.

Ritrattamento del combustibile irraggiamento: cenni.

Sistemazione dei prodotti di ritrattamento. Economia del ciclo di combustibile.

Danneggiamento della prima parete dei reattori a fusione: erosione, «sputtering», evaporazione, distruzione, «blistering». Danni neutronici. Scelta dei materiali in relazione al problema dell'attivazione. Cenno ai materiali superconduttori.

ESERCITAZIONI

Calcolo del flusso di materiali nel ciclo di combustibile. Calcolo termomeccanico di una barra di combustibile.

TESTI CONSIGLIATI

M. Cumo, *Impianti nucleari*, Utet, Torino, 1976.

AA.VV., *Il ciclo del combustibile*, Edizioni ENEA, Roma, 1981.

V.T. Adrian Roberts, *Structural Materials in Nuclear Power Systems*, Plenum Press, New York, 1981.

IN571 TERMOCINETICA DEGLI IMPIANTI NUCLEARI

Prof. Mario MALANDRONE

DIP. di Energetica

IV ANNO

1° PERIODO DIDATTICO

INDIRIZZO: Termoidraulico-Strutturistico
Neutronico-Controllistico

Impegno didattico

Annuale (ore)

Settimanale (ore)

Lez. Es. Lab.

80 28 —

6 2 —

Il corso di Termocinetica è strutturato in modo da approfondire l'omonimo capitolo della Fisica tecnica, con particolare riguardo alla metodologia, e ha il fine di fornire allo studente in Ingegneria nucleare gli strumenti di base per poter affrontare in modo rigoroso lo studio termoidraulico di un reattore 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 e aeronautica.

Il corso si svolgerà con lezioni ed esercitazioni.

Nozioni predeutiche: Complementi di matematica e Fisica tecnica.

PROGRAMMA

Il programma comprende l'analisi dei processi di trasferimento di massa, di energia e di quantità di moto nei fluidi con particolare riferimento ai fluidi usati come refrigeranti dei reattori nucleari di potenza. Viene inoltre studiato in profondità il problema della conduzione nei solidi. Dopo aver illustrato le proprietà termodinamiche e di trasporto dei fluidi e dei solidi, si fa cenno alla statica dei fluidi e quindi si esaminano le equazioni di conservazione della massa, dell'energia e della quantità di moto, che vengono applicate ai condotti chiusi, per fluidi ideali e viscosi: equazioni di Bernoulli e di Navier-Stokes. Viene studiato il concetto di turbolenza e la teoria dello strato limite. Vengono illustrate le formulazioni per la determinazione del profilo di velocità e delle cadute di pressione nei condotti chiusi. Viene quindi approfondito il meccanismo di trasferimento del calore: modelli di Leveque, Graetz, Eckert (moto laminare); modelli di Reynolds, Prandtl, Von Karman e Martinelli (moto turbolento). Dopo un cenno sull'analisi dimensionale si analizzano le formulazioni per il coefficiente di scambio termico. Si studiano poi la convenzione naturale e lo scambio termico nei metalli liquidi. Si analizzano infine problemi di conduzione in geometria complesse, come le alette, e in condizioni bidimensionali e tridimensionali, stazionarie e non stazionarie, con particolare riferimento ai solidi generanti calore (tipici dei reattori nucleari). Si esaminano i metodi numerici per la risoluzione delle equazioni più generali della conduzione.

ESERCITAZIONI

Le esercitazioni comprendono la risoluzione di numerosi problemi sia di meccanica dei fluidi che di scambio termico.

TESTI CONSIGLIATI

B. Panella, *Lezioni di Termocinetica*, Ed. Clut, Torino, 1979.

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

E.R.G. Eckert-Jr Drake R.M., *Heat and mass transfer*, Ed. Mc Graw Hill, New York, 1959.

H.S. Carslaw-J.C. Jaeger, *Conduction of heat in Solids*, Ed. Oxford University Press, Clarendon, 1959.

M. Cumo, *Elementi di Termotecnica del Reattore*, Comitato Nazionale Energia Nucleare, RT/ING(69)18, Roma, 1969.

IN573 TERMOIDRAULICA BIFASE DEGLI IMPIANTI NUCLEARI

Prof. Evasio LAVAGNO

DIP. di Energetica

IV ANNO

2° PERIODO DIDATTICO

INDIRIZZO: Termoidraulico-Strutturistico

Impegno didattico

Annuale (ore)

Settimanale (ore)

Lez.

78

6

Es.

26

2

Lab.

6

—

Il corso è strutturato in modo da fornire agli studenti del corso di laurea nucleare i modelli interpretativi dei fenomeni connessi allo scambio termico e al moto dei fluidi bifase per il calcolo termo-idraulico dei circuiti degli impianti di potenza (con particolare attenzione agli impianti nucleari); il corso può essere consigliato anche a studenti dei corsi di laurea in Meccanica e Chimica.

Il corso prevede lezioni, esercitazioni, visite a laboratori.

Nozioni prepedeutiche: Fisica tecnica, Termocinetica degli impianti nucleari.

PROGRAMMA

Il programma del corso estende l'analisi dei processi di trasferimenti di massa, di energia e di quantità di moto, già svolta nel corso di Termocinetica per i fluidi monofase, al caso delle miscele bifase utilizzate come refrigeranti nei reattori nucleari di potenza.

La prima parte del corso tratta i problemi associati alla idrodinamica dei fluidi bifase. Dopo aver descritto i caratteri distintivi dei vari tipi di moto esistenti nei deflussi adiabatici e diabatici, ed aver fornito i criteri per la loro individuazione, si esaminano le equazioni di conservazione della massa, dell'energia e della quantità di moto per i fluidi bifase al fine di valutare le cadute di pressione nei condotti sia adiabatici che diabatici. Vengono presentati i modelli analitici e le correlazioni empiriche per i vari tipi di moto del fluido. Questa prima parte comprende inoltre la trattazione degli efflussi critici e dell'instabilità dei deflussi bifase.

La seconda parte del corso inizia con il capitolo dedicato alla fenomenologia dell'ebollizione sia nel caso di fluido stagnante che nel caso di circolazione forzata. Dopo aver trattato gli aspetti fondamentali del fenomeno dell'ebollizione nucleata, sono presentati i modelli analitici e le correlazioni empiriche che interpretano i fenomeni della generazione della fase gassosa e i meccanismi di trasmissione del calore associati. Successivamente sono descritti i fenomeni associati alla crisi termica e sono presentate le correlazioni che consentono la previsione dell'evento. L'ultimo capitolo di questa parte è dedicato ai fenomeni di scambio termico in ultracrisi.

La terza parte del corso analizza in dettaglio i fenomeni della condensazione.

Nello svolgimento del programma vengono inoltre descritti i metodi e le apparecchiature utilizzati per la misura delle grandezze caratteristiche della termoidraulica dei deflussi bifase.

ESERCITAZIONI

Le esercitazioni consistono nella soluzione di problemi termoidraulici bifase.

LABORATORI

Visite precedute da brevi presentazioni alle esperienze in corso presso il Dipartimento di Energetica.

TESTI CONSIGLIATI

J.G. Collier, *Convective Boiling and Condensation*, McGraw Hill, 1972.

G.B. Wallis, *One dimensional two-phase flow*, McGraw Hill, 1969.

G.F. Hewitt - N.S. Hall-Taylor, *Annular two-phase flow*, Pergamon Press, 1970.

A.E. Bergles, J.G. Collier, J.M. Delhaye, G.F. Hewitt, F. Mayinger, *Two-Phase Flow and Heat Transfer in the Power and Process Industries*, Hemisphere P.C., 1981.

D. Chisholm, *Two-Phase Flow in Pipelines and Heat Exchangers*, Godwin Ed., 1983.

IN448 TERMOTECNICA DEL REATTORE

Prof. Bruno PANELLA

DIP. di Energetica

V ANNO

1° PERIODO DIDATTICO

INDIRIZZO: Termoidraulico-Strutturistico

Impegno didattico

Annuale (ore)

Settimanale (ore)

Lez.

80

6

Es.

28

2

Lab.

4

—

Le finalità del corso sono di approfondimento del funzionamento termico e idraulico dei reattori nucleari sia termici che veloci. Vengono forniti gli strumenti teorici e di calcolo per il progetto termoidraulico del nocciolo dei reattori nucleari. Alcune lezioni sono dedicate ai problemi di scambio termico dei reattori a fusione nucleare. Il corso si svolgerà con lezioni ed esercitazioni. È prevista una visita al laboratorio di Impianti nucleari del Politecnico.

Nozioni propedeutiche: Fisica tecnica, Impianti nucleari, Termocinetica degli impianti nucleari, Termoidraulica bifase degli impianti nucleari.

PROGRAMMA

Descrizione dei vari tipi di reattori nucleari dal punto di vista del funzionamento termoidraulico e confronto dei principali parametri termotecnici. Fluidi refrigeranti. Metodologia del progetto del nocciolo dei reattori nucleari e interdipendenza tra le varie fasi progettuali, in particolare tra progetto nucleare e progetto termoidraulico. Applicazione della metodologia ai reattori veloci. Richiami del progetto nucleare. Generazione di potenza termica durante la vita del nocciolo. Progetto termoidraulico: limiti termici di progetto e procedure di progettazione. Fattori di canale caldo per il flusso e l'entalpia. Progetto termoidraulico dei reattori ad acqua: dimensionamento di massima del nocciolo; progetto termico barretta di combustibile; crisi termica; scelta della pressione; calcolo del generatore di vapore; ottimizzazione delle prestazioni termiche; orifiziatura; fattori di forma nucleari; distribuzione di potenza; distribuzione di portata; calcolo del canale caldo del nocciolo di un PWR e di un BWR; scambio termico e moto dei fluidi bifase nel BWR; codici di calcolo; mescolamento tra sottocanali degli elementi di combustibile a fascio di barre; analisi statistica dei fattori ingegneristici di canale caldo. Reattori veloci: aspetti particolari dei sistemi refrigerati con metalli liquidi: scambio termico e fluidodinamica con metalli liquidi; problemi relativi all'ebollizione dei metalli liquidi; calcolo termoidraulico del nocciolo dei reattori veloci; calcolo termoidraulico dei generatori di vapore per reattori veloci. Reattori a gas ad alta temperatura: calcolo termoidraulico del nocciolo.

Reattori a fusione nucleare: principi di funzionamento; deposizione di energia; estrazione di potenza; problemi termoidraulici di sicurezza.

ESERCITAZIONI

Esecuzione del calcolo termoidraulico del nocciolo dei reattori ad acqua e a gas. Calcolo termoidraulico del generatore di vapore di un reattore veloce.

LABORATORI

Visita al laboratorio e rilevazione delle principali grandezze termoidrauliche di un circuito bolente di simulazione di un impianto reale.

TESTI CONSIGLIATI

M. Cumo, *Termotecnica sperimentale*, Ed. ENEA, Roma, 1982.

R.T. Lahey-Jr. F.J. Moody, *The Thermal-Hydraulics of a Boiling Water Reactor*, Ed. American Nuclear Society, New York, 1977.

L.S. Tong-J. Weisman, *Thermal Analysis of Pressurized Water Reactor*, Ed. American Nuclear Society, La Grange Park, 1979.

- B. Panella, *Reattori nucleari ad acqua leggera, Termoidraulica del nocciolo*, Ed. Celid, Torino, 1981.
- J.G. Yevick-A. Amorosi, *Fast Reactor Technology: Plant Design*, Ed. M.I.T. Press, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (Massachusetts) and London (England).
- Yu.S. Tang et al., *Thermal analysis of liquid metal fast breeder reactors*, Ed. American Nuclear Society, La Grange Park, 1978.
- A.E. Waltar-A.B. Reynolds, *Fast breeder reactors*, Ed. Pergamon Press, New York, 1981.
- G. Melese-R. Katz, *Thermal and flow design of helium-cooled reactors*, Ed. American Nuclear Society, La Grange Park, 1984.

INDICE ALFABETICO DEGLI INSEGNAMENTI

<i>Codice Insegnamento</i>	<i>Pagina</i>
IN001 ACQUEDOTTI E FOGNATURE	143
IN495 ACÚSTICA APPLICATA	144-415
IN003 AERODINAMICA	15
IN004 AERODINAMICA II	16
IN005 AERODINAMICA SPERIMENTALE	17
IN574 AEROELASTICITÀ	18
IN006 AERONAUTICA GENERALE	19-247
IN008 ANALISI DEI MINERALI	515
IN496 ANALISI DEI SISTEMI ELETTRICI DI POTENZA	355-356
IN456 ANALISI MATEMATICA I	145
IN457 ANALISI MATEMATICA I	249-357
IN458 ANALISI MATEMATICA I	21-416
IN459 ANALISI MATEMATICA I	81-516-589
IN013 ANALISI MATEMATICA II	146
IN014 ANALISI MATEMATICA II	250
IN015 ANALISI MATEMATICA II	417
IN460 ANALISI MATEMATICA II	82-517-590
IN461 ANALISI MATEMATICA II	22-358
IN018 ANTENNE	251
IN020 APPARECCHIATURE DI MANOVRA E INTERRUZIONE	359
IN019 APPARECCHI ELETTRICI DI COMANDO	360
IN582 APPLICAZIONI DELLA MATEMATICA ALL'ECONOMIA	418
IN022 APPLICAZIONI ELETTROMECCANICHE	361
IN023 APPLICAZIONI INDUSTRIALI DELL'ELETTROTECNICA	419
IN498 APPLICAZIONI MATEMATICHE PER L'ELETTRONICA	252
IN024 ARCHITETTURA E COMPOSIZIONE ARCHITETTONICA	147
IN025 ARCHITETTURA E COMPOSIZIONE ARCHITETTONICA II	148
IN026 ARCHITETTURA ED URBANISTICA TECNICHE	149
IN027 ARCHITETTURA TECNICA	151-153
IN029 ARCHITETTURA TECNICA II	154
IN030 ARTE MINERARIA	518
IN031 ATTREZZATURE DI PRODUZIONE	420
IN032 AUTOMAZIONE	253
IN032 AUTOMAZIONE (ELETTROTECNICI)	362
IN033 AUTOMAZIONE A FLUIDO E FLUIDICA	421
IN034 AUTOMAZIONE DELLE MISURE ELETTRONICHE E TELEMISURE	255
IN583 AZIONAMENTI ELETTRICI	257-364
IN036 CALCOLATORI E PROGRAMMAZIONE	259
IN040 CALCOLO E PROGETTO DI MACCHINE	422
IN041 CALCOLO NUMERICO E PROGRAMMAZIONE	23-155-423-591
IN586 CALCOLO NUMERICO E PROGRAMMAZIONE	260-367
IN599 CALCOLO NUMERICO E PROGRAMMAZIONE	83-519
IN042 CALCOLO STRUTTURALE DI COMPONENTI NUCLEARI	592
IN601 CAMPI ELETTROMAGNETICI E CIRCUITI A	261
IN602 CAMPI ELETTROMAGNETICI E CIRCUITI B	262

IN462	CHIMICA	156
IN463	CHIMICA	263
IN464	CHIMICA	365-424
IN465	CHIMICA	84-520-593
IN501	CHIMICA ANALITICA INDUSTRIALE PER L'INGEGNERIA	86
IN047	CHIMICA APPLICATA	87-522-595
IN048	CHIMICA APPLICATA	26-426
IN049	CHIMICA DEGLI IMPIANTI NUCLEARI	88-596
IN050	CHIMICA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI CERAMICI E REFRATTARI	89-427-523
IN051	CHIMICA FISICA	90-265
IN053	CHIMICA INDUSTRIALE	91
IN502	CHIMICA MACROMOLECOLARE E TECNOLOGIA DEGLI ALTI POLIMERI	92
IN056	CHIMICA ORGANICA	93
IN058	CHIMICA TESSILE	94
IN503	COLTIVAZIONE E GESTIONE DELLE CAVE (sem.)	524
IN062	COMPATIBILITÀ ELETTROMAGNETICA	266
IN064	COMPLEMENTI DI CAMPI ELETTROMAGNETICI	267
IN065	COMPLEMENTI DI CONTROLLI AUTOMATICI	268-368
IN067	COMPLEMENTI DI FISICA	269
IN069	COMPLEMENTI DI IDRAULICA	158
IN070	COMPLEMENTI DI IMPIANTI NUCLEARI	597
IN584	COMPLEMENTI DI MACCHINE ELETTRICHE	369
IN071	COMPLEMENTI DI MATEMATICA	271
IN072	COMPLEMENTI DI MATEMATICA	370
IN073	COMPLEMENTI DI MATEMATICA	598
IN074	COMPLEMENTI DI SCIENZA DELLE COSTRUZIONI	159
IN504	COMPLEMENTI DI TECNICA ED ECONOMIA DEI TRASPORTI	160-428
IN077	COMPLEMENTI DI TOPOGRAFIA	161
IN079	COMPONENTI ELETTRONICI	272
IN587	COMPOSIZIONE URBANISTICA	162
IN478	COMUNICAZIONI ELETTRICHE (gen.)	274
IN479	COMUNICAZIONI ELETTRICHE (spec.)	275
IN081	CONSOLIDAMENTO DI ROCCE E TERRENI (sem.)	525
IN488	CONTROLLI AUTOMATICI (gen.)	276
IN489	CONTROLLI AUTOMATICI (spec.)	278
IN082	CONTROLLI AUTOMATICI	371
IN087	CONTROLLO DEI PROCESSI	279-372
IN089	CONTROLLO OTTIMALE	280
IN090	CORROSIONE E PROTEZIONE DEI MATERIALI METALLICI	95-429
IN091	COSTRUZIONE DI GALLERIE (sem.)	526
IN093	COSTRUZIONE DI MACCHINE	373
IN492	COSTRUZIONE DI MACCHINE	430
IN493	COSTRUZIONE DI MACCHINE	29-599
IN095	COSTRUZIONE DI MACCHINE PER L'INDUSTRIA CHIMICA	96
IN096	COSTRUZIONE DI MATERIALE FERROVIARIO	431
IN097	COSTRUZIONE DI MOTORI PER AEROMOBILI	31
IN098	COSTRUZIONE DI MOTORI PER MISSILI	30
IN100	COSTRUZIONE DI STRUTTURE IN CEMENTO ARMATO	163
IN506	COSTRUZIONE E TECNOLOGIE DELLA GOMMA E DEL PNEUMATICO	432

IN101	COSTRUZIONI AERONAUTICHE	27
IN103	COSTRUZIONI AERONAUTICHE II	28
IN104	COSTRUZIONI AUTOMOBILISTICHE	433
IN507	COSTRUZIONI BIOMECCANICHE	434
IN106	COSTRUZIONI DI STRADE, FERROVIE ED AEROPORTI	165
IN107	COSTRUZIONI DI STRADE, FERROVIE ED AEROPORTI II	167
IN108	COSTRUZIONI ELETTROMECCANICHE	374
IN109	COSTRUZIONI IDRAULICHE	168
IN110	DINAMICA DEL MISSILE	33
IN113	DINAMICA DEL VOLO	35-281
IN114	DINAMICA E CONTROLLO DEGLI IMPIANTI NUCLEARI	600
IN509	DISCIPLINA GIURIDICA DELLE ATTIVITÀ TECNICHE- INGEGNERISTICHE	36-169-375
IN466	DISEGNO	170
IN467	DISEGNO	282
IN468	DISEGNO	37-376-435-527-601
IN469	DISEGNO	97
IN118	DISEGNO EDILE	171
IN119	DISEGNO MECCANICO	436
IN480	DISEGNO MECCANICO	38
IN481	DISEGNO MECCANICO	602
IN120	DISEGNO TECNICO	528
IN121	DISPOSITIVI ELETTRONICI ALLO STATO SOLIDO	283
IN122	DOCUMENTAZIONE ARCHITETTONICA	172
IN510	ECONOMIA DEI SISTEMI AEROSPAZIALI	39
IN125	ECONOMIA E POLITICA ECONOMICA	437
IN127	ECONOMIA E TECNICA AZIENDALE	98-377-439
IN132	ELEMENTI DI ELETTRONICA	441
IN137	ELETTROCHIMICA	100
IN138	ELETTROMETALLURGIA	101
IN139	ELETTRONICA APPLICATA	379
IN140	ELETTRONICA APPLICATA I	285
IN141	ELETTRONICA APPLICATA II	286
IN143	ELETTRONICA APPLICATA ALL'AERONAUTICA	40
IN145	ELETTRONICA NUCLEARE	603
IN146	ELETTRONICA PER TELECOMUNICAZIONI	287
IN147	ELETTRONICA QUANTICA	288
IN149	ELETTROTECNICA	173
IN151	ELETTROTECNICA	289
IN482	ELETTROTECNICA	41-102-442
IN483	ELETTROTECNICA	529-604
IN153	ELETTROTECNICA I	380
IN154	ELETTROTECNICA II	381
IN155	ELICHE ED ELICOTTERI	42
IN585	ERGOTECNICA EDILE	174
IN588	ESERCIZIO DEI SISTEMI DI TRASPORTO	175
IN159	ESTIMO	176
IN470	FISICA I	177
IN471	FISICA I	291
IN472	FISICA I	44-382-443
IN473	FISICA I	103-530-605

IN164	FISICA II	179
IN165	FISICA II	293
IN166	FISICA II	445
IN484	FISICA II	45-384
IN485	FISICA II	104-531-606
IN167	FISICA ATOMICA	607
IN168	FISICA DEI FLUIDI E MAGNETOFLUIDODINAMICA	43
IN170	FISICA DELLO STATO SOLIDO	294
IN171	FISICA DEL REATTORE NUCLEARE	608
IN598	FISICA DEL SUOLO E STABILITÀ DEI PENDII	532
IN172	FISICA MATEMATICA	610
IN600	FISICA MATEMATICA	295
IN173	FISICA NUCLEARE	611
IN174	FISICA TECNICA	46-105-533-613
IN175	FISICA TECNICA	180
IN176	FISICA TECNICA	296
IN177	FISICA TECNICA	385
IN178	FISICA TECNICA	446-447
IN513	FLUIDODINAMICA	448
IN181	FLUIDODINAMICA DELLE TURBOMACCHINE	47-449
IN182	FOTOGRAMMETRIA	181
IN183	FOTOGRAMMETRIA APPLICATA	182
IN184	GASDINAMICA	48
IN185	GASDINAMICA II	50
IN186	GENERATORI DI CALORE	450
IN190	GEOFISICA APPLICATA	534
IN193	GEOLOGIA	536
IN514	GEOLOGIA APPLICATA	183
IN474	GEOMETRIA I	185
IN475	GEOMETRIA I	297-386-538
IN476	GEOMETRIA I	51-451
IN477	GEOMETRIA I	106-614
IN515	GEOSTATISTICA MINERARIA ED APPLICATA	539
IN198	GEOTECNICA	186-540
IN199	GEOTECNICA II	187
IN516	GESTIONE DELLE AZIENDE MINERARIE	541
IN203	GIACIMENTI MINERARI	542
IN204	IDRAULICA	188
IN205	IDRAULICA	452
IN206	IDRAULICA	387-543
IN517	IDROGEOLOGIA APPLICATA	544
IN207	IDROLOGIA TECNICA	189
IN518	ILLUMINOTECNICA	190
IN210	IMPIANTI CHIMICI	107
IN212	IMPIANTI CHIMICI II	108
IN213	IMPIANTI DI BORDO PER AEROMOBILI	52-298
IN216	IMPIANTI ELETTRICI	388
IN218	IMPIANTI ELETTRICI II	389
IN219	IMPIANTI IDROELETTRICI	390
IN220	IMPIANTI MECCANICI (1° corso)	109-453
IN220	IMPIANTI MECCANICI (2° corso)	59-454

IN221	IMPIANTI MECCANICI II	455
IN222	IMPIANTI MINERALURGICI (sem.)	546
IN223	IMPIANTI MINERARI	547
IN224	IMPIANTI MINERARI II (sem.)	548
IN225	IMPIANTI MOTORI ASTRONAUTICI	54
IN226	IMPIANTI NUCLEARI	615
IN227	IMPIANTI NUCLEO E TERMOELETTRICI	391
IN228	IMPIANTI SPECIALI IDRAULICI	191
IN589	IMPIANTI TECNICI	192
IN521	IMPIANTI TERMOTECNICI	456
IN233	INDUSTRIALIZZAZIONE E UNIFICAZIONE EDILIZIA	194
IN523	INGEGNERIA DEI GIACIMENTI DI IDROCARBURI	549
IN235	INGEGNERIA DELL'ANTI-INQUINAMENTO	110
IN524	INGEGNERIA SISMICA E PROBLEMI DINAMICI SPECIALI	195
IN239	ISTITUZIONI DI ELETTROMECCANICA	392
IN525	ISTITUZIONI DI STATISTICA	196
IN526	LAVORAZIONE PER DEFORMAZIONE PLASTICA	111-458
IN242	LINGUAGGI DI PROGRAMMAZIONE E COMPILATORI	299
IN245	LITOLOGIA E GEOLOGIA APPLICATE	550
IN246	MACCHINE	55
IN247	MACCHINE	112-551
IN248	MACCHINE	393-616
IN249	MACCHINE I	459
IN250	MACCHINE I (corso unico per meccanici)	460
IN251	MACCHINE II	461
IN254	MACCHINE E IMPIANTI ELETTRICI	300
IN590	MACCHINE ED ORGANIZZAZIONE DEI CANTIERI	197
IN253	MACCHINE ELETTRICHE	394
IN528	MACCHINE ELETTRICHE STATICHE	301-396
IN257	MATEMATICA APPLICATA	56-462
IN259	MATERIALI PER L'ELETTROTECNICA	397
IN262	MECCANICA APPLICATA ALLE MACCHINE	57
IN263	MECCANICA APPLICATA ALLE MACCHINE	113-398-463-552
IN264	MECCANICA APPLICATA ALLE MACCHINE E MACCHINE	199
IN532	MECCANICA BIOMEDICA APPLICATA	464
IN533	MECCANICA DEI FLUIDI NEL SOTTOSUOLO	553
IN534	MECCANICA DEI ROBOT	465
IN269	MECCANICA DELL'AUTOVEICOLO	466
IN270	MECCANICA DELLE MACCHINE	617
IN271	MECCANICA DELLE MACCHINE E MACCHINE	302
IN272	MECCANICA DELLE ROCCE	200-554
IN273	MECCANICA DELLE VIBRAZIONI	467
IN277	MECCANICA RAZIONALE	202
IN279	MECCANICA RAZIONALE	303
IN280	MECCANICA RAZIONALE	469
IN487	MECCANICA RAZIONALE	58-115-399-556-618
IN275	MECCANICA PER L'INGEGNERIA CHIMICA	114
IN281	MECCANICA STATISTICA APPLICATA	304-619
IN535	MECCANICA SUPERIORE PER INGEGNERI	470
IN283	METALLURGIA E METALLOGRAFIA	116
IN284	METALLURGIA FISICA	117-471

IN287	METODI NUMERICI DELL'INGEGNERIA NUCLEARE	620
IN290	METROLOGIA DEL TEMPO E DELLA FREQUENZA	305
IN291	METROLOGIA GENERALE E MISURE MECCANICHE	472
IN292	MICROELETTRONICA	306
IN294	MINERALOGIA E LITOLOGIA	557
IN295	MISURE CHIMICHE E REGOLAZIONI	119
IN296	MISURE ELETTRICHE	307
IN297	MISURE ELETTRICHE	400
IN300	MISURE ELETTRONICHE	308
IN595	MISURE ELETTRONICHE A	309
IN596	MISURE ELETTRONICHE B	310
IN597	MISURE ELETTRONICHE C	312
IN301	MISURE NUCLEARI	621
IN303	MISURE TERMICHE E REGOLAZIONI	473
IN306	MODELLISTICA E IDENTIFICAZIONE	313-401
IN308	MOTORI PER AEROMOBILI	59
IN310	MOTORI PER MISSILI	60
IN309	MOTORI TERMICI PER TRAZIONE	475
IN311	OLEODINAMICA E PNEUMATICA	476
IN314	ORGANIZZAZIONE DELLE MACCHINE NUMERICHE	314
IN316	OTTICA APPLICATA	316
IN591	OTTICA QUANTISTICA	318
IN319	PETROGRAFIA	558
IN320	PETROLCHIMICA	119
IN592	PIANIFICAZIONE URBANISTICA	203
IN541	PREFABBRICAZIONE STRUTTURALE	205
IN325	PREPARAZIONE DEI MINERALI	559
IN326	PRINCIPI DI GEOMECCANICA	560
IN327	PRINCIPI DI INGEGNERIA CHIMICA	120
IN542	PRINCIPI DI INGEGNERIA CHIMICA II	121
IN543	PROCESSI BIOLOGICI INDUSTRIALI	122
IN544	PROCESSI MINERALURGICI (sem.)	561-562
IN330	PRODUZIONE DI CAMPO E TRASPORTO DEGLI IDROCARBURI	563
IN546	PROGETTO DELLE CARROZZERIE	477
IN335	PROGETTO DI AEROMOBILI	61
IN336	PROGETTO DI AEROMOBILI II	63
IN337	PROGETTO DI APPARECCHIATURE CHIMICHE	123
IN338	PROGETTO DI CIRCUITI PER MICROONDE	319
IN341	PROPAGAZIONE DI ONDE ELETTROMAGNETICHE	321
IN340	PROPULSORI ASTRONAUTICI	64
IN549	PROSPEZIONE GEOFISICA	564
IN343	PROSPEZIONE GEOMINERARIA	565
IN550	PROTEZIONE E SICUREZZA NEGLI IMPIANTI NUCLEARI	623
IN347	RADIOTECNICA	322
IN551	REATTORI CHIMICI	124
IN349	REATTORI NUCLEARI	624
IN552	REGOLAZIONI AUTOMATICHE	65-479
IN353	REPERIMENTO DELL'INFORMAZIONE	323
IN354	RETI DI TELECOMUNICAZIONI	324
IN355	RICERCA OPERATIVA	206-325-402-480
IN553	RILEVAMENTO GEOLOGICO TECNICO (sem.)	567

IN555	RILIEVI E MISURAZIONI GEOMECCANICHE (sem.)	568
IN554	RIVELATORI DI RADIAZIONE, TRASDUTTORI E SENSORI	326-403-625
IN358	SCIENZA DELLE COSTRUZIONI	66
IN359	SCIENZA DELLE COSTRUZIONI	207
IN360	SCIENZA DELLE COSTRUZIONI	125-404-569-626
IN361	SCIENZA DELLE COSTRUZIONI	327
IN362	SCIENZA DELLE COSTRUZIONI	481
IN363	SCIENZA DELLE COSTRUZIONI II	483
IN	SENSORIZZAZIONE E INTERFACCIAMENTO NEI SISTEMI MECCANICI	484
IN556	SICUREZZA E NORMATIVA NELL'INDUSTRIA ESTRATTIVA (sem.)	570
IN365	SIDERURGIA	126-485
IN368	SISTEMI DI ELABORAZIONE DELL'INFORMAZIONE	328
IN491	SISTEMI DI ELABORAZIONE DELL'INFORMAZIONE	329-405
IN369	SISTEMI DI ELABORAZIONE DELL'INFORMAZIONE II	330
IN370	SISTEMI DI TELECOMUNICAZIONE	331
IN558	SISTEMI ELETTRICI ED ELETTRONICI DELL'AUTOVEICOLO	486
IN372	SISTEMI OPERATIVI	332
IN559	SORGENTI DI RADIAZIONE E MACCHINE ACCELERATRICI	627
IN560	SPERIMENTAZIONE E AFFIDABILITÀ DELL'AUTOVEICOLO	487
IN561	SPERIMENTAZIONE SULLE MACCHINE A FLUIDO	489
IN562	SPERIMENTAZIONE SU MATERIALI E STRUTTURE	210
IN380	STRUMENTAZIONE FISICA	628
IN381	STRUMENTAZIONE PER BIOINGEGNERIA	333-490
IN383	STRUMENTI DI BORDO	67-334
IN384	STRUTTURE AEROMISSILISTICHE	69
IN385	STRUTTURE INFORMATIVE	70-335
IN580	TECNICA AEROSPAZIALE	71
IN386	TECNICA DEGLI ENDOREATTORI	72
IN388	TECNICA DEGLI SCAVI E DEI SONDAGGI	571
IN563	TECNICA DEI SONDAGGI PETROLIFERI	572
IN564	TECNICA DEL FREDDO	492
IN565	TECNICA DELLA PROGRAMMAZIONE	406
IN393	TECNICA DELLA REGOLAZIONE	336
IN566	TECNICA DELLA SICUREZZA AMBIENTALE	127-494
IN394	TECNICA DELLA SICUREZZA NELLE APPLICAZIONI ELETTRICHE	407
IN398	TECNICA DELLE COSTRUZIONI I	211
IN401	TECNICA DELLE COSTRUZIONI II	212
IN402	TECNICA DELLE COSTRUZIONI INDUSTRIALI	493
IN403	TECNICA DELLE IPERFREQUENZE	337
IN567	TECNICA DEL TRAFFICO E DELLA CIRCOLAZIONE	213-495
IN407	TECNICA ED ECONOMIA DEI TRASPORTI	214-496
IN410	TECNOLOGIA DEI MATERIALI E CHIMICA APPLICATA	215
IN411	TECNOLOGIA DEI MATERIALI METALLICI	497
IN593	TECNOLOGIA DELLA PRODUZIONE EDILIZIA	216
IN413	TECNOLOGIA MECCANICA	73-408
IN414	TECNOLOGIA MECCANICA	414
IN415	TECNOLOGIA MECCANICA II	499
IN568	TECNOLOGIA, RAPPRESENTAZIONI PROGETTUALI E PRODUZIONE EDILIZIA	217
IN416	TECNOLOGIE AERONAUTICHE	74

IN417	TECNOLOGIE CHIMICHE INDUSTRIALI	128
IN422	TECNOLOGIE ELETTRICHE	129
IN423	TECNOLOGIE ELETTRONICHE	338
IN424	TECNOLOGIE METALLURGICHE	130-574
IN426	TECNOLOGIE NUCLEARI	629
IN427	TECNOLOGIE SIDERURGICHE	131
IN428	TECNOLOGIE SPECIALI DELL'AUTOVEICOLO	500
IN569	TECNOLOGIE SPECIALI MINERARIE	575
IN429	TECNOLOGIE TESSILI	132-502
IN435	TEORIA DEI SEGNALI	339
IN436	TEORIA DEI SISTEMI	340
IN440	TEORIA DELLE RETI ELETTRICHE	342
IN594	TEORIA DELL'INFORMAZIONE	341
IN443	TEORIA E SVILUPPO DEI PROCESSI CHIMICI	133
IN570	TEORIA E PRATICA DELLE MISURE	343
IN442	TEORIA E PROGETTO DEI CIRCUITI LOGICI	345
IN571	TERMOCINETICA DEGLI IMPIANTI NUCLEARI	630
IN573	TERMIDRAULICA BIFASE DEGLI IMPIANTI NUCLEARI	631
IN448	TERMOTECNICA DEL REATTORE	632
IN449	TOPOGRAFIA	219-220
IN450	TOPOGRAFIA	576
IN452	TRASMISSIONE DI DATI	346
IN453	TRASMISSIONE TELEFONICA	347
IN455	URBANISTICA	221

INDICE ALFABETICO DEI DOCENTI

- ABBATTISTA F., 26.
 ABETE A., 400, 529.
 ACQUARONE G., 263.
 AJMONE MARSAN M., 324.
 ALGOSTINO F., 327, 483.
 ALLIA P., 288.
 AMATO I., 89, 427, 432, 523.
 ANDRIANO M., 112, 551.
 ANGELINI E., 263, 365.
 ANGLÉSIO P., 447.
 ANTONA E., 61, 69.
 ANTONELLI E., 461.
 APPENDINO P., 117, 426.
 ARCIDIACONO A., 40.
 ARMANDO E., 564.
 ARNEODO C. A., 615.
 ARRI E., 343.
 ASCOLI R., 271.
 BACCIOTTI A., 250.
 BADINO G., 541.
 BALDI G., 121.
 BALDINI G., 572.
 BARATELLA P., 83, 519.
 BARBERO A. M., 450, 473.
 BARBERO G., 291.
 BARBISIO E., 102, 442.
 BARDELLI P. G., 194.
 BARISONE G., 567.
 BARLA G., 200, 525, 554.
 BASTIANINI A., 149.
 BAUDUCCO G., 53, 454.
 BAVA G. P., 337, 338.
 BECCARI C., 342.
 BELFORTE G., 113, 398, 421, 463, 552.
 BELFORTE G., 336.
 BELINGARDI G., 487.
 BELLOMO N., 295, 303.
 BENEDETTO S., 346.
 BIANCO G., 158.
 BIEY D., 286.
 BIGLIERI E., 347.
 BOFFA C., 180.
 BOIERI P., 249.
 BONA B., 253, 362.
 BONGIOVANNI G., 430.
 BORASI V., 151.
 BORELLO L., 67, 334.
 BORGIOLI G., 303.
 BOSCO MASERA M., 177.
 BOTTINO G., 550.
 BRAY A., 472.
 BRESSO M., 437.
 BRISI C., 24, 84, 87, 522, 593, 595.
 BROSSA G., 391.
 BRUNO G., 299, 328.
 BUFFA E., 387, 543.
 BURDESE A., 116, 126, 485.
 BUSSI G., 59.
 BUTERA L., 168, 452.
 BUZANO PESCARMONA C., 103, 269.
 CALDERALE P. M., 422, 434.
 CALLARI C. E., 493.
 CAMPANARO P., 393, 616.
 CANAVERO F., 289, 319.
 CANTARELLA G., 359.
 CANUTO E., 276.
 CAPOSIO G., 197.
 CARDINALE N., 446.
 CARIDI A., 98, 377, 439.
 CARLUCCI D., 279, 372.
 CARPINTERI A., 481.
 CARRESCIA V., 407.
 CARUSO A., 176.
 CASTELLANI V., 274.
 CASTIGLIA C., 165.
 CATANIA A. E., 459, 460.
 CHIAMPI M., 410, 442.
 CHIARAVIGLIO A., 455.
 CHIARLI N., 297.
 CHIESA S., 52, 298.
 CHIOCCHIA G., 18, 448.
 CHIRONE E., 436.
 CHITI G., 249.
 CIVALLERI P. P., 380.
 CIVITA M., 183, 544.
 CLERICI C., 546.
 CLERICO M., 74.
 CODEGONE M., 81, 589.
 COFFANO A., 300.
 COLASURDO G., 64, 72.
 COLOMBO BASSANO, 355.
 COLOSI G., 528.

- COMOGLIO G., 161.
CONTI R., 108.
CONTINI P., 216.
COPPA G., 620.
COPPO S., 171.
CORNO S.E., 608.
CROTTI A., 175.
CURTI G., 373, 592, 599.
D'ALFIO N., 114, 484.
DANIELE V., 289.
D'ANGELO S., 33, 42.
DE BENEDETTI B., 101.
DEBERNARDI P. G., 163, 210.
DE FILIPPI A., 420.
DEL CORSO D., 287, 379.
DEL GRECO O., 560, 568.
DELSANTO P.P., 627.
DEL TIN G., 597, 629.
DEMICHELIS F., 293, 621.
DE PALMA C., 167.
DEQUAL S., 219.
DE SALVE M., 600.
DESIDERI E., 203.
DE STEFANO A., 195.
DI MOLFETTA A., 549.
DI SCIUVA M., 71.
DONATI F., 361.
ELIA M., 250, 341.
FASOLI U., 123.
FERRARIS F., 308, 312.
FERRARIS P., 394.
FERRARO C. V., 475, 489.
FERRERO F., 93, 94.
FERRO V., 105, 385, 533.
FIAMENI M., 154.
FILISSETTI BORELLO O., 291.
FIORIO G., 371.
FIRRAO D., 497.
FORNARO M., 524.
FRISA MORANDINI A., 561, 562.
GALIZIA ANGELI M.T., 22, 82, 590.
GECCHELE G., 547.
GENON G., 122.
GENTA G., 31, 466.
GERMANO M., 50.
GIANETTO A., 107.
GANI G. P., 532, 539.
GIANOGLIO C., 397.
GILLI L., 345.
GIORDANA M., 285, 441.
GOFFI L., 211.
GOLA M., 30, 96.
GONELLA L., 623, 628.
GORINI I., 307.
GOZZELINO G., 92, 119.
GRASSI G., 263.
GRECO S., 297, 386.
GREGORETTI F., 306.
GREGORIO P., 46, 613.
GUARNIERI G., 212.
GUERRA G., 39.
GUGLIOTTA A., 29.
IANNELLI F., 196.
INNAURATO E., 147.
INNAURATO N., 526.
IPPOLITO R., 498.
JACAZIO G., 617.
JAMIOLKOVSKI M., 186, 540.
JARRE G., 48.
LAFACE P., 332.
LAURENTINI A., 70, 335.
LAUSETTI A., 19, 247.
LAVAGNO E., 631.
LAZZARI M., 369, 419.
LEPORA P., 406.
LEPORATI E., 66.
LESCA C., 182, 576.
LESCHIUTTA S., 305, 308, 310.
LEVI R., 498.
LOMBARDI C., 296.
LO PRESTI L., 339.
LUCCO BORLERA M., 130, 215, 574.
LUGIATO L., 607.
MAGNANO G., 557.
MAJA M., 90, 95, 265, 429.
MALANDRONE M., 630.
MANCINI R., 571.
MANZONI S., 602.
MARCANTE LONGO E., 469.
MARCHIS V., 302.
MAROCCHI D., 160, 428.
MARRO P., 207.
MASCARELLO M., 417.
MASOERO M., 456.
MASSAZA C., 51, 106, 614.
MATTEUCCI E., 515.
MAURO V., 313, 401.
MAZZA A., 190.
MAZZETTI P., 294.
MELLANO F., 221.
MENGA G., 278.
MEO A. R., 329, 330, 405.

- MERLETTI R., 333, 490.
 MEZZALAMA M., 314.
 MEZZETTI E., 293, 384.
 MICHELETTI G. F., 500.
 MILANESE M., 340.
 MINETTI B., 443.
 MIRALDI E., 44.
 MONEGATO G., 23, 155, 423, 591.
 MONTAGNANA M., 418.
 MONTE A., 109, 453.
 MONTORSI M., 424.
 MONTROSSET I., 267.
 MORELLI A., 433, 477.
 MORELLI P., 27, 35, 281.
 MORONI P., 260, 367.
 MORRA L., 217.
 MOSCA P., 390.
 MUSSINO F., 285.
 NALDI C., 272, 283.
 NANO E., 266, 322.
 NAPOLI R., 389.
 NATALE P., 565.
 NAVALE M.T., 170.
 NELVA R., 172.
 NERVEGNA N., 54, 476.
 NOCILLA S., 470.
 NUCCIO P., 55.
 OCCELLA E., 559, 575.
 OLDANO C., 316.
 OMINI M., 293.
 ONORATO M., 17.
 OREFICE M., 251.
 ORLANDO M., 282.
 ORTA R., 262.
 ORUSA L., 36, 169, 375.
 OSSOLA F., 174.
 OSTANELLO A. M., 206, 325, 402, 480.
 PALUMBO P., 205.
 PANDOLFI L., 252, 598.
 PANDOLFI MAU., 16.
 PANDOLFI MI., 56, 462.
 PANELLA B., 632.
 PANIZZA E., 486.
 PASQUARELLI A., 326, 403, 530, 625.
 PATRUCCO M., 548, 570.
 PELIZZA S., 518.
 PENAZZI N., 156, 520.
 PENT M., 275, 331.
 PERONA G. E., 321.
 PEROTTI G., 111, 458.
 PERSIANI F., 38.
 PESSINA G., 392.
 PEZZOLI G., 188.
 PICCININI N., 127, 128, 494.
 PICCO G., 148, 162.
 PICCOLO E., 328.
 PIGLIONE L., 381.
 PIOMBO B., 467.
 PISANI U., 255, 308, 309.
 PODDA, 282, 376.
 POMÈ R., 388.
 POZZOLO V., 286.
 PRATI GAGLIA M. P., 86.
 PRINETTO P., 328.
 QUAGLIA M., 143.
 QUAGLIOTTI F., 464.
 QUARATI P., 611.
 QUENDA R., 97, 282, 527, 601.
 QUORI F., 15.
 RANIERI G., 534.
 RASETTI M., 304, 619.
 RAVETTO P., 624.
 REPACI A., 469.
 RICCI F., 250.
 RICCI G., 199.
 RIGANTI R., 58, 115, 399, 556, 618.
 RIZZI G., 610.
 ROCCATI G., 431, 468.
 ROLANDO P., 215.
 ROLANDO LESCHIUTTA M., 146, 517.
 ROMEO G., 63.
 ROMITI A., 465.
 ROSSETTI U., 125, 404, 569, 626.
 ROSSETTO S., 499.
 ROSSO M., 131.
 ROVERO G., 118.
 RUSCICA G., 192.
 RUSSO FRATTASI A., 214, 496.
 SACCHI A., 144, 415.
 SANDRONE R., 558.
 SANINI A., 185, 538.
 SARACCO G. B., 88, 91, 596.
 SCARAFIOTTI A. R., 249, 357.
 SCARZELLA P., 153.
 SCHIARA M., 191.
 SENA C., 220.
 SERRA A., 259.
 SICARDI S., 120, 124.
 SORDO S. T., 189.

- SPECCHIA V., 110, 133.
SPINELLI P., 100, 129.
SPIRITO F., 73, 408.
STEPANESCU A., 443.
STRIGAZZI A., 291, 382.
SURACE G., 28.
TARTAGLIA A., 45, 104, 606.
TARTAGLIA M., 173, 604.
TAVERNA VALABREGA P., 179,
531.
TEPPATI G., 271, 370.
TESTORE F., 132, 502.
TOSONI M., 360.
TROSSI L., 445.
TUBERGA A., 492.
VACCA M. T., 202.
VADACCHINO M., 318.
VAGATI A., 257, 364.
VALABREGA P., 451.
VALLAURI M., 268, 368, 603.
VALLINI P., 159.
VARVELLI R., 563.
VATTA F., 57.
VERGA G., 553.
VILLA A., 65, 280, 479.
VILLA M., 213, 495.
VILLATA F., 301, 396.
VITI S., 145, 516.
ZANNETTI L., 47, 60, 449.
ZAVATTARO M. G., 303.
ZICH R., 261.
ZIMAGLIA C., 374.
ZUCCHETTI S., 536, 542.

INDICE ALFABETICO DEI RICERCATORI

AGNELLO M., 45, 104, 606.
ASTRUA F., 147.
BADINI C., 87.
BATTAGLIO M., 186.
BOFFA G., 166, 198.
BOGLIETTI A., 173, 395.
BOSCO C., 163.
CALDERA C., 217.
CALORIO G.F., 171.
CAPILUPPI G., 166, 167.
CASSATELLA G., 153.
CASTAGNO G., 179, 384.
CAVALLERO P., 188.
DEL COL G.F., 163.
DEL MASTRO A., 85.
DEVOTI A., 211.
FERRARESI C., 199.
FERRARIS D., 185, 538.
FERRERO U., 188.
GILI P., 20.
IUSO G., 15.
LANCELLOTTA R., 186.

MARSERO W., 176.
MASTRANGELO F., 542.
MAZZA D., 215.
MAZZARINO I., 86, 107.
MOGLIA G., 171.
NORESE M.F., 206.
OCHNER M., 210.
ONOFRIO M., 88, 91, 123.
ORSI PALAMARA A., 23, 155, 591.
PIGLIONE F., 381, 388.
RAPARELLI T., 199.
ROMAGNOLI R., 549, 563.
ROSSETTI P. 537, 542.
ROSSETTI R., 205.
ROSSO M., 189.
SAMBUELLI L., 534, 564.
SCAVIA C., 201, 555.
TORDELLA M.L., 186, 540.
VALENTE S., 211, 212.
VICARIO ARESIO G., 146.
VIGNA B., 184, 544.
VIVALDI A., 166, 167.