



## Corso di studi: Nuclear Engineering (Laurea magistrale)

**Denominazione:** Nuclear Engineering

**Dipartimento :** INGEGNERIA CIVILE E INDUSTRIALE

**Classe di appartenenza:** LM-30 INGEGNERIA ENERGETICA E NUCLEARE

**Interateneo:** No

**Interdipartimentale:** No

**Obiettivi formativi:** Il Corso di Studio è rivolto in modo particolare a laureati in ingegneria della classe industriale, integrando la diversificata formazione professionale già acquisita con conoscenze specialistiche ed abilità finalizzate:

- all'analisi di processi ed impianti complessi, con particolare riguardo alla progettazione, realizzazione ed esercizio degli impianti nucleari;
- alla rilevazione e prevenzione del rischio, per l'uomo e per l'ambiente;
- alla progettazione e realizzazione di dispositivi ed alla elaborazione di metodologie sia per la mitigazione delle conseguenze negative di eventi incidentali, sia per la gestione e la destinazione finale dei residui delle attività industriali, con particolare riguardo agli impianti nucleari.

Caratterizzante il profilo formativo è la conoscenza di:

- a) argomenti, anche complessi, di matematica e fisica-matematica, su cui si basa la specificità del profilo professionale;
- b) discipline tipiche dell'ingegneria dell'industria energetico - nucleare e di processo (termo-fluidodinamica, tecnologia dei materiali, progettazione e costruzione di componenti, impiantistica convenzionale e nucleare, misure, strumentazione e controllo);
- c) discipline orientate specificatamente alle applicazioni delle radiazioni nucleari (nella progettazione e costruzione di impianti nucleari, nella loro disattivazione e destinazione finale dei residui);
- d) discipline caratteristiche su cui si basano le analisi di sicurezza ed il controllo degli impianti nucleari e di quelli principali dell'industria di processo.

**Numero stimato immatricolati:** 40

**Requisiti di ammissione e modalità di verifica:** Per essere ammessi al Corso di Laurea Magistrale in Nuclear Engineering classe LM-30 occorre essere in possesso della laurea o del diploma universitario di durata triennale, ovvero di altro titolo di studio conseguito all'estero, riconosciuto idoneo. Il candidato deve presentare domanda con allegati almeno il certificato di laurea, o equivalente, e i programmi degli esami sostenuti. In base ai criteri di seguito illustrati vengono stabiliti i requisiti curriculari e l'adeguatezza della personale preparazione per l'accesso al Corso di Laurea Magistrale in Nuclear Engineering classe LM-30, ai sensi dell'art. 6, comma 2, del D.M. 270/2004. L'ammissione al Corso Laurea Magistrale in Nuclear Engineering classe LM-30 viene decisa sulla base dell'esistenza di entrambi i requisiti (curriculari e di preparazione). Il Consiglio di Corso di Studio (CDS) nomina una Commissione Istruttoria di Valutazione (CIV), composta da due o più docenti con il compito di:

- esaminare le domande di ammissione,
- valutare i curricula di candidati,
- verificare il possesso dei requisiti curriculari e personali,
- proporre al CDS l'ammissione o la non ammissione del candidato,
- indicare le eventuali modalità per l'ottenimento dei requisiti mancanti.

### REQUISITI CURRICULARI

Il possesso di una laurea in ingegneria industriale (classe L-9) o altra laurea purché siano stati acquisiti i seguenti CFU: MAT/02, MAT/03, MAT/05, MAT/06, MAT/07, MAT/08, MAT/09, SECS-S/02, FIS/01, FIS/03, CHIM/03, CHIM/07 (42 CFU); ING-IND/9, ING-IND/10, ING-IND/11, ICAR/08, ING-IND/14, INGIND/15, ING-IND/16, INF/01, FIS/02, FIS/04, ING-IND/19, ING-IND/34 (18 CFU).

In caso di candidati con titolo acquisito all'estero, la Commissione Istruttoria di Valutazione (CIV) valuterà i requisiti curriculari sulla base della durata temporale dei singoli insegnamenti e dei programmi dei relativi esami sostenuti.

È inoltre richiesta una adeguata conoscenza della lingua inglese equiparabile almeno di livello B2 del Quadro Comune Europeo di riferimento per le lingue. Il possesso di tale requisito potrà essere certificato dagli studenti in fase di iscrizione o, in assenza di una certificazione, sarà verificato tramite colloquio o esame del curriculum durante la verifica della personale preparazione dello studente.

### REQUISITI DI PREPARAZIONE PERSONALE

In accordo con il Regolamento Didattico di Ateneo, la CIV:

- può proporre al CDS di accettare ovvero di respingere la domanda di iscrizione del Candidato sulla base della valutazione della documentazione presentata con la domanda di ammissione;
- può proporre al CDS di rimandare il candidato al colloquio di ammissione indicando il programma su cui verterà il colloquio, secondo la procedura descritta di seguito.

Colloquio di ammissione: il colloquio di ammissione ha lo scopo di accertare che il candidato possieda la preparazione necessaria per affrontare proficuamente gli studi magistrali. I colloqui di ammissione si svolgono in almeno due sessioni nel corso dell'anno accademico. Al candidato è assegnata, con provvedimento del Presidente del CDS, una specifica commissione esaminatrice composta da due o più docenti. Il programma del colloquio, individuato dalla CIV, sarà preventivamente comunicato al candidato dal Presidente del CDS. Al termine del colloquio la commissione esaminatrice formula un giudizio definitivo di idoneità oppure di non idoneità all'ammissione, eventualmente evidenziando requisiti mancanti.

**Specifici CFU:** Il Corso di Studio, conformemente al Regolamento Didattico dell'Ateneo e fatti salvi i casi in cui ciò risultasse incompatibile con normative europee, adotta, nel definire il calendario delle lezioni, delle esercitazioni e dei laboratori, i seguenti criteri:

1. per le attività formative aventi la tipologia di lezione: il lavoro complessivo dello studente deve essere svolto mediamente per 1/3 seguendo le attività in aula e per 2/3 dedicandosi allo studio individuale degli argomenti trattati;
2. per le attività formative aventi la tipologia di esercitazione o di laboratorio progettuale: il lavoro complessivo dello studente deve essere svolto mediamente per 1/2 seguendo le attività in aula e per 1/2 dedicandosi allo studio individuale degli argomenti trattati;



3. per le attività formative aventi la tipologia di laboratorio sperimentale: il lavoro complessivo dello studente deve essere svolto interamente in laboratorio.

Per ciascun corso, la suddivisione in ore di lezione ed esercitazione, nonché le attività di laboratorio e le loro tipologie, sono approvate dal Consiglio di Corso di Studio, con il vincolo che le ore di esercitazione non possano superare il 50% delle ore complessive di insegnamento (lezioni più esercitazioni).

Tutte le attività formative sono basate su moduli da 3, 6, 9 e 12 CFU. A ciascun corso, ad esclusione dei corsi di lingua e delle attività diverse (stage, tirocini, prove finali), è attribuito un minimo di 6 CFU. I corsi integrati sono composti da non più di due moduli didattici, relativi a discipline effettivamente omogenee o affini.

**Modalità determinazione voto di Laurea:** Come previsto dal Regolamento Didattico di Ateneo, nella valutazione del candidato i membri della commissione tengono conto, oltre che del giudizio sull'esame finale di corso di studio, del curriculum di studi del candidato e della media curriculare dei voti riportati nei singoli esami, ponderata rispetto al peso in CFU degli stessi. La commissione può tener conto anche del tempo impiegato dallo studente per completare il percorso di studio.

**Attività di ricerca rilevante:** Il nucleo principale dei docenti del Corso di Laurea Magistrale in Nuclear Engineering è costituito dai docenti di area Nucleare.

Uno degli obiettivi dell'istituzione del corso di laurea magistrale è, infatti, il mantenimento delle rilevanti competenze in Ingegneria Nucleare formatesi in più di 50 anni di attività didattica e di ricerca presso l'Università di Pisa. In questo ambito, sono in particolare da citare le ricerche in materia di sicurezza ed impiantistica nucleare, per le quali l'Università di Pisa vanta una posizione di prestigio internazionalmente riconosciuta, in conseguenza anche delle numerose collaborazioni sviluppate in questi ultimi decenni con Aziende ed Enti a livello nazionale (ENEA, SOGIN, ISIN, ENEL, Ansaldo Nucleare) ed internazionale (EURATOM, OECD-CSNI, IAEA, EdF, ITER IO, ecc.) e la partecipazione a network o consorzi internazionali di ricerca (SNETP NUGENIA, FUSENET, ENEN, ecc.). I docenti di area nucleare sono autori o coautori di centinaia di pubblicazioni nei suddetti settori, anche considerando solo gli ultimi 5 anni, come dimostrato dai dati inseriti nell'Anagrafe della Ricerca dell'Università di Pisa.

Peraltro, principi, metodi e pratiche della sicurezza nucleare e della radioprotezione sono alla base di quella cultura della sicurezza che si sta estendendo progressivamente anche al campo convenzionale (Direttive Seveso e D. Lgs. 344/99 di recepimento nella legislazione nazionale, Direttive di Valutazione di Impatto Ambientale e Strategica, per il Controllo e la Prevenzione Integrati dell'inquinamento – IPPC, ecc.). Anche in questi settori i docenti delle aree di Ing. nucleare di questo corso di laurea magistrale presentano una consistente attività di ricerca, particolarmente per quanto attiene gli aspetti della pianificazione e gestione delle emergenze tecnologiche, dell'inquinamento atmosferico, delle scelte energetiche correlate allo sviluppo sostenibile, ecc..

**Rapporto con il mondo del lavoro:** Il Corso di Laurea Magistrale in Nuclear Engineering raccoglie l'eredità del corso di laurea specialistico in Ingegneria Nucleare e della Sicurezza Industriale e del corso di laurea quinquennale di Ingegneria Nucleare dell'Università di Pisa, entrambi orientati a formare ingegneri nucleari/industriali con una solida preparazione in tema di sicurezza nucleare e industriale e di protezione ambientale. In questo modo il Corso di Laurea Magistrale intende rispondere positivamente alle due esigenze di:

1. Continuare la formazione di ingegneri nucleari, figura professionale fortemente richiesta dal mercato del lavoro nazionale e internazionale, come dimostrato da un'esperienza ormai pluridecennale. Questo corso di Laurea magistrale è quindi un elemento fondamentale affinché siano mantenute, sviluppate e trasmesse le competenze di ingegneria nucleare nel nostro Paese.

2. Formare esperti in grado di operare come ingegnere della sicurezza, una figura particolarmente richiesta dalla Società civile e anche dal mercato, come dimostrato dall'esperienza degli ultimi anni. Questa è un'esigenza molto sentita sia nella Pubblica Amministrazione (e in particolare negli Enti e Autorità competenti in materia di tutela ambientale e di sicurezza sui luoghi di lavoro e di vita), che nella realtà produttiva e industriale, su scala regionale e nazionale.

Dalla loro istituzione i Corsi di Laurea, di Perfezionamento/Specializzazione e di Dottorato in Ingegneria Nucleare e in Ingegneria della Sicurezza svolti all'Università di Pisa, di cui il presente corso di studi magistrale e di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Industriale sono la naturale prosecuzione, hanno formato una numerosa schiera di ingegneri che hanno assunto importanti ruoli negli Enti o nelle industrie che mantengono ancora competenze e interesse nel settore nucleare o svolgono funzioni di controllo e prevenzione nei campi della sicurezza nucleare e industriale, della tutela dell'ambiente e più in generale nei settori industriali e della ricerca in Italia e all'estero.

**Informazioni aggiuntive:** Il Consiglio di Corso di Laurea, allo scopo di permettere una ragionevole diversificazione dei profili professionali dei laureati nel settore delle applicazioni dell'energia nucleare, considererà con attenzione piani di studio individuali proposti dagli studenti o che si rendano opportuni per poter fruire di occasioni di scambio con Enti nazionali ed internazionali di formazione.



## Curricula definiti nel CDS Nuclear Engineering

Unico



## Gruppi per attività a scelta nel CDS Nuclear Engineering

### Gruppo Attività consigliate per la libera scelta (12 CFU)

*Descrizione:* Gli studenti devono scegliere 12 cfu



## Gruppi per attività a scelta nel CDS Nuclear Engineering

**Gruppo Attività consigliate per la libera scelta (12 CFU)***Descrizione:* Gli studenti devono scegliere 12 cfu**Attività contenute nel gruppo****Computational Codes for Nuclear Reactors (6 CFU)**

Modulo	CFU	SSD	Tipologia	Caratteristica	Ambito
Computational Codes for Nuclear Reactors	6	ING-IND/19 IMPIANTI NUCLEARI	Altre attività - scelta libera dello studente	lezioni frontali + esercitazioni	A scelta dello studente

**Decommissioning of Nuclear Plants and Radioactive Waste Management (6 CFU)**

Modulo	CFU	SSD	Tipologia	Caratteristica	Ambito
Decommissioning of Nuclear Plants and Radioactive Waste Management	6	ING-IND/19 IMPIANTI NUCLEARI	Altre attività - scelta libera dello studente	lezioni frontali + esercitazioni	A scelta dello studente

**Design of Complex Plants (6 CFU)**

Modulo	CFU	SSD	Tipologia	Caratteristica	Ambito
Design of Complex Plants	6	ING-IND/19 IMPIANTI NUCLEARI	Altre attività - scelta libera dello studente	lezioni frontali + esercitazioni	A scelta dello studente

**Energy and Nuclear Power Systems (6 CFU)**

Modulo	CFU	SSD	Tipologia	Caratteristica	Ambito
Energy and Nuclear Power Systems	6	ING-IND/19 IMPIANTI NUCLEARI	Altre attività - scelta libera dello studente	lezioni frontali + esercitazioni	A scelta dello studente

**Informatic Training (6 CFU)**

Modulo	CFU	SSD	Tipologia	Caratteristica	Ambito
Informatic Training	6	NN No settore	Altre attività - scelta libera dello studente	tirocinio	A scelta dello studente

**Medical Applications of Nuclear Technologies (6 CFU)**

Modulo	CFU	SSD	Tipologia	Caratteristica	Ambito
Medical Applications of Nuclear Technologies	6	ING-IND/20 MISURE E STRUMENTAZIONE NUCLEARI	Altre attività - scelta libera dello studente	lezioni frontali + esercitazioni	A scelta dello studente

**Nuclear Plant Structural Design (6 CFU)**

Modulo	CFU	SSD	Tipologia	Caratteristica	Ambito
Nuclear Plant Structural Design	6	ING-IND/19 IMPIANTI NUCLEARI	Altre attività - scelta libera dello studente	e_learning	A scelta dello studente

**Single and Two-phase Thermal-hydraulics (6 CFU)**



## Regolamento Nuclear Engineering

<b>Modulo</b>	<b>CFU</b>	<b>SSD</b>	<b>Tipologia</b>	<b>Caratteristica</b>	<b>Ambito</b>
Single and Two-phase Thermal-hydraulics	6	ING-IND/19 IMPIANTI NUCLEARI	Altre attività - scelta libera dello studente	e_learning	A scelta dello studente



## Attività formative definite nel CDS Nuclear Engineering

### Computational Codes for Nuclear Reactors (6 CFU)

**Denominazione in Inglese:** Computational Codes for Nuclear Reactors

**Obiettivi formativi:** L'obiettivo principale dell'insegnamento è quello di fornire allo studente le conoscenze inerenti gli aspetti fondamentali (teorici e pratici) dei codici di calcolo attualmente utilizzati nel campo dell'ingegneria nucleare, le metodologie adottate e gli strumenti utilizzati e le tecniche di analisi dei dati.

Lo studente verrà coinvolto nella risoluzione di diversi problemi pratici. Per la sezione dedicata agli aspetti termoidraulici, verranno utilizzati il codice STH RELAP5Mod 3.3. ed il codice CFD ANSYS Fluent. Verranno in particolare affrontati gli aspetti teorici legati ai modelli di turbolenza e alle equazioni di bilancio utilizzate nei codici CFD e STH. Per quanto riguarda i problemi di trasporto neutronico, in generale saranno fornite indicazioni sulle diverse tipologie di codici utilizzati nel settore ed in particolare il codice Monte Carlo OpenMC verrà utilizzato per affrontare uno specifico problema di trasporto neutronico. Infine, nella sezione legata agli aspetti termo-meccanici, verranno considerati studi numerici e teorici mediante il metodo degli elementi finiti e la sua applicazione a codici FEM. Attraverso i codici utilizzati, gli studenti saranno in grado di effettuare analisi strutturali di geometrie semplici e complesse.

**Obiettivi formativi in Inglese:** The main objective of the course is to provide the students with the knowledge of the fundamental (theoretical and practical) aspects of the software codes currently used in the nuclear engineering field, the methodologies and tools they implement and knowledge of the data analysis techniques.

The student will be involved in the resolution of different practical exercises. Ansys Design Modeler, Ansys Meshing, Ansys FLUENT and RELAP5mod3.3 codes will be used for solving thermal-hydraulics problems. The basic theory related to turbulence models and balance equations applied in CFD and System Thermal Hydraulic codes will be discussed. For what concerns the problems of neutron transport, information will be provided in general about the different kinds of computational codes used in the field, while in particular the Monte Carlo code OpenMC will be used to study a specific problem of neutron transport. Numerical and theoretical studies of the finite element method and its application FEM codes (such as MSC.MARC; ANSYS, etc.) will be considered for thermo-mechanical problems. As for FEM, students will be able to perform structural analysis in simple or complex geometry.

**CFU:** 6

**Reteirabilità:** 1

**Modalità di verifica finale:** prova orale con voto in trentesimi

**Lingua ufficiale:** Inglese

#### Moduli

Denominazione	CFU	SSD	Tipologia	Caratteristica	Ambito
Computational Codes for Nuclear Reactors	6	ING-IND/19 IMPIANTI NUCLEARI	Altre attività - scelta libera dello studente	lezioni frontali + esercitazioni	A scelta dello studente

### Control of Nuclear Plants (6 CFU)

**Denominazione in Inglese:** Control of Nuclear Plants

**Obiettivi formativi:** Discussione dei fondamenti metodologici dell'analisi dinamica dei sistemi complessi, per evidenziare i vantaggi del controllo automatico in termini di esercizio e sicurezza nonché le problematiche relative alle sue applicazioni in termini di stabilità, rapidità di risposta e precisione di intervento. Cinetica del reattore nucleare. Dinamica del reattore nucleare controreazionato. Sistemi automatici di controllo di un reattore nucleare di tipo PWR.

**Obiettivi formativi in Inglese:** Discussion of the methodological fundamentals of the dynamic analysis of complex systems, aiming at clarifying the advantages of automatic control in terms of operation and safety, as well as the problems encountered in its applications in terms of stability, speed of response and accuracy of intervention. Nuclear reactor kinetics. Nuclear reactor dynamics: reactivity feedbacks. PWR automatic control systems.

**CFU:** 6

**Reteirabilità:** 1

**Modalità di verifica finale:** prova orale con voto in trentesimi

**Lingua ufficiale:** Inglese

#### Moduli

Denominazione	CFU	SSD	Tipologia	Caratteristica	Ambito
Control of Nuclear Plants	6	ING-IND/19 IMPIANTI NUCLEARI	Caratterizzanti	lezioni frontali + esercitazioni	Ingegneria energetica e nucleare

### Decommissioning of Nuclear Plants and Radioactive Waste Management (6 CFU)

**Denominazione in Inglese:** Decommissioning of Nuclear Plants and Radioactive Waste Management

**Obiettivi formativi:** Conoscenza delle caratteristiche e delle problematiche principali e comuni, a livello applicativo e di sicurezza, degli impianti nucleari e delle loro componenti più rilevanti per la sicurezza durante le operazioni di progressivo o completo decommissioning

- Conoscenza avanzata degli standard di riferimento e delle principali normative Nazionali ed Internazionali riguardanti la



progettazione/smantellamento e la sicurezza sul lavoro e dei lavoratori e la gestione dei rifiuti radioattivi.

- Analisi dei criteri e dei processi di dismissione e smantellamento, a livello di progetto preliminare ed esecutivo, in relazione alla peculiarità dei componenti principali/strutture degli impianti, nonché di effettuare la scelta progettuale di smantellamento più idonea da un punto di vista della sicurezza, dei criteri di rilascio e del financial/management planning-uso delle risorse
- Discussione sui possibili processi di riciclo e riuso del combustibile e di prodotti, con speciale attenzione alle fasi di smaltimento definitivo nel periodo istituzionale e nel lungo termine.

**Obiettivi formativi in Inglese:** Knowledge of the main and common characteristics and problems, at the application and safety level, of the nuclear plants and their most important components for safety during the operations of progressive or complete decommissioning

- Advanced knowledge of the reference standards and of the main national and international regulations concerning the design / dismantling and safety at work and workers and the management of radioactive waste.
- Analysis of the criteria and processes of decommissioning and dismantling, at the preliminary and execution level, in relation to the peculiarity of the main components / facilities structures, as well as to make the design choice of the most suitable dismantling of a safety point of view , release criteria and financial / management planning-use of resources
- Discussion on the possible processes of recycling and reuse of fuel and products, with special attention to the final disposal phases in the institutional period and in the long term.

**CFU:** 6

**Reteirabilità:** 1

**Propedeuticità:** Nuclear Plants

**Modalità di verifica finale:** prova orale con voto in trentesimi

**Lingua ufficiale:** Inglese

**Moduli**

Denominazione	CFU	SSD	Tipologia	Caratteristica	Ambito
Decommissioning of Nuclear Plants and Radioactive Waste Management	6	ING-IND/19 IMPIANTI NUCLEARI	Altre attività - scelta libera dello studente	lezioni frontali + esercitazioni	A scelta dello studente

**Design of Complex Plants (6 CFU)**

**Denominazione in Inglese:** Design of Complex Plants

- Obiettivi formativi:** - Contribuire alla formazione di una mentalità impiantistica e sistemistica presentando e sensibilizzando gli allievi alle principali problematiche funzionali, strutturali e di sicurezza comuni a vari tipologie di impianti industriali,
- Capacità di integrare le conoscenze ricevute e di interfacciarsi con specialisti di aree diverse;
  - Contribuire alla comprensione ed applicazione delle tecniche progettuali e costruttive (incluso anche l'utilizzo di codici di calcolo FEM e di sistema generalmente usati a supporto delle progettazione) e delle normative principali inerenti la sicurezza degli impianti e di alcuni dei loro principali componenti nei settori di interesse.

**Obiettivi formativi in Inglese:** - To contribute to the formation of a plant and systems attitude by presenting and making aware the students on the main functional, structural and safety issues which are common and characterize the different types of industrial plants;

- Capacity to integrate the learned knowledge and to interact with specialists of different areas;
- Contribute to the understanding and application of design and construction techniques (including also the use of FEM and system codes generally utilized to support the plant design) and main regulations concerning the safety of plants and of some of their main components in the areas of interest.

**CFU:** 6

**Reteirabilità:** 1

**Modalità di verifica finale:** prova orale con voto in trentesimi

**Lingua ufficiale:** Inglese

**Moduli**

Denominazione	CFU	SSD	Tipologia	Caratteristica	Ambito
Design of Complex Plants	6	ING-IND/19 IMPIANTI NUCLEARI	Altre attività - scelta libera dello studente	lezioni frontali + esercitazioni	A scelta dello studente

**Energy and Nuclear Power Systems (6 CFU)**

**Denominazione in Inglese:** Energy and Nuclear Power Systems

- Obiettivi formativi:** Il corso, sviluppato nell'ambito della collaborazione internazionale pluriennale con la University of Illinois di Urbana-Champaign, illustra i modelli di produzione e di utilizzo dell'energia, con particolare riguardo all'energia nucleare e alla sua interazione e integrazione con le fonti energetiche rinnovabili e con quelle da combustibili fossili, nell'ambito di possibili strategie energetiche previste dagli scenari nazionali e internazionali. Il corso illustra in dettaglio i criteri di analisi di un sistema di produzione di energia, identificandone vantaggi e limiti, e le problematiche connesse sia con la geopolitica energetica internazionale che con la pianificazione nazionale. Sono approfondite in particolare le attività ingegneristiche necessarie ad eseguire una pianificazione nazionale mediante l'identificazione delle risorse energetiche e i sistemi di produzione di energia di un paese, e l'esecuzione di valutazioni quantitative e qualitative sui confronti fra sistemi di produzione di energia nell'ambito di un paese e fra diversi paesi.



Gli obiettivi didattici sono:

- apprendere i criteri base di analisi di un sistema di produzione di energia con particolare riguardo ai contesti che includono l'utilizzo dell'energia nucleare;
- comprendere le differenze fra le varie risorse energetiche e i diversi sistemi di produzione di energia;
- confrontare la sostenibilità dei diversi sistemi e le strategie di produzione di energia.

Il corso è supportato da seminari e visite tecniche presso le aziende operanti nel settore energetico. Il corso va ad integrarsi con gli altri corsi simili o analoghi presenti presso i Corsi di Laurea di ingegneria dell'Università di Pisa fornendo una formazione complementare mediante i temi approfonditi nelle lezioni frontali, nei seminari e nell'elaborato finale.

Il corso arricchisce l'opera di internazionalizzazione del CdS, dato che vi è un forte interesse anche da parte dell'Università dell'Illinois di Urbana-Champaign a mandare ogni anno alcuni dei loro studenti presso l'Università di Pisa per seguire e sostenere l'esame del suddetto insegnamento, nell'ambito del Programma di Mobilità Internazionale "Short Term Engineering Program".

**Obiettivi formativi in Inglese:** The course, developed within the international collaboration with the University of Illinois at Urbana-Champaign, illustrates the models of energy production and use, with particular reference to nuclear energy and its interaction and integration with renewable energy sources and with those from fossil fuels, in the context of possible energy strategies envisaged by national and international scenarios. The course illustrates in detail the analysis criteria of an energy production system, identifying its advantages and limitations, and the problems associated with both international energy geopolitics and national planning. In particular, the engineering activities necessary to carry out a national planning through the identification of energy resources and the energy production systems of a country, and the execution of quantitative and qualitative assessments on the comparisons between energy production systems within a country and between different countries.

The educational objectives are:

- learn the basic analysis criteria of an energy production system with particular regard to contexts that include the use of nuclear energy;
- understand the differences between the various energy resources and the different energy production systems;
- compare the sustainability of different energy production systems and the strategies of energy production.

The course is supplemented by seminars and technical visits to companies operating in the energy sector. The course complements other similar courses present in the Engineering Degree Courses of the University of Pisa by providing training on the topics explored in the classroom lessons, during seminars and in the final thesis

**CFU:** 6

**Reteirabilità:** 1

**Modalità di verifica finale:** prova orale con voto in trentesimi

**Lingua ufficiale:** Inglese

### Moduli

Denominazione	CFU	SSD	Tipologia	Caratteristica	Ambito
Energy and Nuclear Power Systems	6	ING-IND/19 IMPIANTI NUCLEARI	Altre attività - scelta libera dello studente	lezioni frontali + esercitazioni	A scelta dello studente

**Note:** Il corso arricchisce l'opera di internazionalizzazione del CdS, dato che vi è un forte interesse anche da parte dell'Università dell'Illinois di Urbana-Champaign a mandare ogni anno alcuni dei loro studenti presso l'Università di Pisa per seguire e sostenere l'esame del suddetto insegnamento, nell'ambito del Programma di Mobilità Internazionale "Short Term Engineering Program".

### Engineering of Fusion Reactors (6 CFU)

**Denominazione in Inglese:** Engineering of Fusion Reactors

**Obiettivi formativi:** Lo scopo del corso è lo studio della fusione nucleare, come fonte futura di energia. Gli obiettivi formativi sono raggiunti tramite l'analisi:

- delle principali reazioni di fusione, loro sezioni d'urto ed energia prodotta;
- delle principali condizioni per realizzare un impianto con bilancio di potenza netta prodotta positiva;
- del plasma, sue caratteristiche, comportamento ed interazione con il campo magnetico;
- dei confinamenti magnetici aperti (specchi magnetici) e chiusi toroidali (tokamak, stellarator e reversed field pinch);
- dei componenti principali di un reattore a confinamento magnetico, assumendo come riferimento ITER (componenti principali del tokamak e sistemi ausiliari);
- della produzione di trizio nel blanket di futuri reattori di potenza, prendendo a riferimento DEMO;
- dei principali impianti di ricerca attualmente in funzione ed in fase di progetto per lo studio del confinamento magnetico;
- dei principali scenari incidentali in impianti a confinamento magnetico;
- delle principali caratteristiche della fusione a confinamento inerziale e principali impianti di ricerca;
- dei tipi di reazioni nucleari a bassa energia come la fusione catalizzata da muoni e le anomalie in celle elettrolitiche;
- di reattori ibridi fusione-fissione e loro applicazioni alla chiusura del ciclo del combustibile.

**Obiettivi formativi in Inglese:** The scope of the course is the study of the nuclear fusion as a future source of energy. The training objectives are achieved through the analysis:

- of the main fusion reactions, their cross sections and energy produced;
- of the main conditions for reaching a plant with a positive net power output balance;
- of the plasma, its characteristics, behaviour and interaction with the magnetic field;
- of open (magnetic mirrors) and closed toroidal (tokamak, stellarator and reversed field pinch) magnetic confinements;
- of the main components of a magnetic confinement reactor, taking as reference ITER (main components of the tokamak)



- and auxiliary systems);
- of tritium production in the blanket for future power reactors, adopting DEMO as a reference;
  - of the main research plants presently in operation and under design phase for the study of magnetic confinement;
  - of the main accident scenarios in magnetic confinement plants;
  - of main characteristics of inertial confinement fusion and main research facilities;
  - of the low-energy nuclear reactions such as muon-catalysed fusion and anomalies in electrolytic cells;
  - of hybrid reactors fusion-fission and their applications to the closure of the fuel cycle.

**CFU:** 6

**Reteirabilità:** 1

**Modalità di verifica finale:** prova orale con voto in trentesimi

**Lingua ufficiale:** Inglese

**Moduli**

Denominazione	CFU	SSD	Tipologia	Caratteristica	Ambito
Engineering of Fusion Reactors	6	ING-IND/19 IMPIANTI NUCLEARI	Caratterizzanti	lezioni frontali + esercitazioni	Ingegneria energetica e nucleare

**Final examination (18 CFU)**

**Denominazione in Inglese:** Final examination

**CFU:** 18

**Reteirabilità:** 1

**Modalità di verifica finale:** discussione tesi

**Lingua ufficiale:** Italiano

**Moduli**

Denominazione	CFU	SSD	Tipologia	Caratteristica	Ambito
Final examination	18	PROFIN_S Prova finale per settore senza discipline	Altre attività - prova finale	prova finale	Per la prova finale

**Note:** possibile discussione in inglese

**Informatic Training (6 CFU)**

**Denominazione in Inglese:** Informatic Training

**CFU:** 6

**Reteirabilità:** 1

**Modalità di verifica finale:** prova orale con voto in trentesimi

**Lingua ufficiale:** Inglese

**Moduli**

Denominazione	CFU	SSD	Tipologia	Caratteristica	Ambito
Informatic Training	6	NN No settore	Altre attività - scelta libera dello studente	tirocinio	A scelta dello studente

**Medical Applications of Nuclear Technologies (6 CFU)**

**Denominazione in Inglese:** Medical Applications of Nuclear Technologies

**Obiettivi formativi:** Questo corso illustra le sorgenti e le applicazioni delle radiazioni ionizzanti nelle procedure diagnostiche e terapeutiche. Le tecniche radiologiche di acquisizione delle immagini descritte nel corso comprendono la radiografia piana, la mammografia, la fluoroscopia e la tomografia computerizzata; le tecniche per emissione nucleare comprendono l'acquisizione di immagini piane con gamma camera, la tomografia per emissione di fotone singolo e la tomografia per emissione di positroni. Le tecniche radioterapiche includono la brachiterapia, i trattamenti con fasci esterni di raggi X e di elettroni, la terapia con adroni e la terapia per cattura neutronica sul boro.

Obiettivi didattici specifici: Apprendere i principi di progettazione delle sorgenti radiologiche e radioattive utilizzate in medicina, inclusi gli acceleratori ed i reattori utilizzati in radioterapia. Comprendere gli effetti stocastici e deterministici delle radiazioni ionizzanti sugli esseri umani. Apprendere i principi di progettazione e di utilizzo delle apparecchiature per l'acquisizione di immagini, inclusi i recettori di immagine e le tecniche di ricostruzione. Comprendere vantaggi e limitazioni delle varie modalità diagnostiche e terapeutiche.

**Obiettivi formativi in Inglese:** This course illustrates the sources and applications of ionizing radiations in diagnostic and therapeutic procedures. Radiological imaging techniques described in the course include projection radiography, mammography, fluoroscopy and computed tomography; nuclear emission techniques include planar imaging with gamma



cameras, single photon emission tomography and positron emission tomography. Radiotherapy techniques include brachytherapy, external beam treatments with x-rays and electrons, hadron therapy and boron neutron capture therapy. Specific Learning Outcomes are the following: Learn the design principles of the radiological and radioactive sources used in medicine, including accelerators and reactors used for radiotherapy. Understand stochastic and deterministic effects of ionizing radiations on humans. Learn design and operation principles of imaging equipment, including image receptors, and reconstruction techniques. Understand advantages and limitations of the various diagnostic and therapeutic modalities

**CFU:** 6

**Reteirabilità:** 1

**Modalità di verifica finale:** prova orale con voto in trentesimi

**Lingua ufficiale:** Inglese

**Moduli**

Denominazione	CFU	SSD	Tipologia	Caratteristica	Ambito
Medical Applications of Nuclear Technologies	6	ING-IND/20 MISURE E STRUMENTAZIONE NUCLEARI	Altre attività - scelta libera dello studente	lezioni frontali + esercitazioni	A scelta dello studente

**Nuclear Materials (6 CFU)**

**Denominazione in Inglese:** Nuclear Materials

**Obiettivi formativi:** Classificazione funzionale dei materiali utilizzati nella realizzazione degli impianti nucleari.

Individuazione dei requisiti di impiego per le varie classi funzionali, con riferimento alle situazioni di normale esercizio, transitorie e incidentali di tutti i livelli.

Analisi comparativa e criteri di selezione dei materiali all'interno di ciascuna classe.

Analisi dei processi di produzione e di qualificazione dei materiali nucleari.

Criteri di analisi del comportamento dei materiali nelle filiere più significative.

**Obiettivi formativi in Inglese:** Functional classification of materials adopted in nuclear plants. Identification in the requirements for the adoption of the different functional classes, with main reference to conditions of normal, transient and accident operations at all the possible levels. Comparison and selection criteria for the different material in each class.

Analysis of production and qualification processes of nuclear materials. Criteria for the analysis of material behavior in different reactor types

**CFU:** 6

**Reteirabilità:** 1

**Modalità di verifica finale:** Prova orale con eventuali domande scritte

**Lingua ufficiale:** Inglese

**Moduli**

Denominazione	CFU	SSD	Tipologia	Caratteristica	Ambito
Nuclear Materials	6	ING-IND/19 IMPIANTI NUCLEARI	Affini o integrative	lezioni frontali + esercitazioni	Attività formative affini o integrative

**Nuclear Measurements (6 CFU)**

**Denominazione in Inglese:** Nuclear Measurements

**Obiettivi formativi:** Questo corso illustra gli strumenti e i metodi usati nelle misure dei campi di radiazioni ionizzanti. Gli argomenti trattati nel corso sono le sorgenti e le caratteristiche delle radiazioni ionizzanti, i meccanismi di interazione tra radiazioni e materia, i metodi di rivelazione con particolare attenzione alle misure nel settore elettronucleare, nelle applicazioni mediche e industriali.

Le lezioni teoriche sono accompagnate da esercitazioni di laboratorio che consentono agli studenti di osservare alcune caratteristiche fondamentali di rivelatori, dosimetri e spettrometri di radiazioni, nonché della statistica di conteggio.

Obiettivi didattici

- Comprendere le interazioni delle radiazioni, con particolare attenzione alle interazioni dei neutroni.

- Apprendere i principi di progettazione dei vari rivelatori di radiazione e le loro caratteristiche operative.

- Apprendere le tecniche di spettroscopia delle radiazioni e le loro applicazioni.

- Comprendere la natura statistica delle misure di radiazione e la statistica di conteggio.

- Imparare a scegliere le tecniche idonee per le misure presso reattori nucleari ed acceleratori di particelle, nonché per verificare le salvaguardie nucleari e per contrastare il contrabbando di materiali nucleari.

**Obiettivi formativi in Inglese:** This course illustrates the instruments and methods used in the measurement of ionizing radiation fields. Topics covered in the course are sources and properties of nuclear radiation, mechanisms of radiation interaction with matter, and detection methods—particularly, in nuclear power generation and in medical and industrial applications.

The theoretical classes are complemented by hands-on laboratory sessions illustrating some fundamental features of radiation counters, dosimeters and spectrometers, as well as counting statistics.

Learning Outcomes

Upon successful completion of this course, students will be able to:

- Understand radiation interactions, with particular emphasis on neutron radiation.

- Learn the design principles of different radiation detectors and how they work.



- Learn the techniques and applications of radiation spectroscopy.
- Understand the statistical nature of radiation measurements and the statistics of radiation counting.
- Learn to select the techniques for measurements at nuclear reactors and particle accelerators, and for safeguards verification and contraband interdiction.

**CFU:** 6

**Reteirabilità:** 1

**Modalità di verifica finale:** Prova orale con voto in trentesimi

**Lingua ufficiale:** Inglese

**Moduli**

Denominazione	CFU	SSD	Tipologia	Caratteristica	Ambito
Nuclear Measurements	6	ING-IND/20 MISURE E STRUMENTAZIONE NUCLEARI	Caratterizzanti	lezioni frontali + esercitazioni	Ingegneria energetica e nucleare

**Nuclear Plant Structural Design (6 CFU)**

**Denominazione in Inglese:** Nuclear Plant Structural Design

**Obiettivi formativi:** Si tratta di un corso intensivo di due settimane inquadrato nell'ambito dell'offerta formativa per il conseguimento della certificazione Europea EMSNE, da attivare qualora vi sia una richiesta specifica da parte di studenti stranieri appartenenti a membri dell'associazione ENEN o ad Istituzioni connesse ad essa tramite Memorandum of Understanding. Il corso si compone di tre principali unità: Unit 1 - Plant Design Criteria (25 hours); Unit 2 - Soil Structure Interaction (5 hours) e Unit 3 Safety design of NPP SSCs (30 hours).

Vengono svolti esercizi sui seguenti aspetti applicativi: Unit E1 - Basic exercise on structural mechanic (beam and shell); Unit E2 - Examples of lumped mass approach (SDOF or MDOF); Unit E3 - Examples of (implicit and semi-implicit approach) fluid-structure and soil-structure interaction; Unit E4 - Basic balances in LWR undergoing external solicitation; Unit E5 - Basic application of FEM codes.

**Obiettivi formativi in Inglese:** It is a two-week intensive course to be offered to foreign students, who will apply for the European certification EMSNE, from ENEN Membres or Institutions having a Memorandum of Understanding with Association, upon specific request.

The course is composed by three teaching units: Unit 1 - Plant Design Criteria (25 hours); Unit 2 - Soil Structure Interaction (5 hours) e Unit 3 Safety design of NPP SSCs (30 hours).

Exercises and case studies are performed in the following subjects: Unit E1 - Basic exercise on structural mechanic (beam and shell); Unit E2 - Examples of lumped mass approach (SDOF or MDOF); Unit E3 - Examples of (implicit and semi-implicit approach) fluid-structure and soil-structure interaction; Unit E4 - Basic balances in LWR undergoing external solicitation; Unit E5 - Basic application of FEM codes.

**CFU:** 6

**Reteirabilità:** 1

**Modalità di verifica finale:** Prova orale con voto in trentesimi

**Lingua ufficiale:** Inglese

**Moduli**

Denominazione	CFU	SSD	Tipologia	Caratteristica	Ambito
Nuclear Plant Structural Design	6	ING-IND/19 IMPIANTI NUCLEARI	Altre attività - scelta libera dello studente	e_learning	A scelta dello studente

**Note:**La modalità di erogazione e-learning potrà sostituire e/o affiancare le lezioni frontali

**Nuclear Plants (12 CFU)**

**Denominazione in Inglese:** Nuclear Plants

**Obiettivi formativi:** Lo studente che completerà con successo il corso acquisirà una solida conoscenza delle principali tipologie di centrali nucleari (sia attuali Gen. II e Gen. III che di futura realizzazione - Gen. IV e Small Modular Reactor SMR), in particolare relativamente alle loro caratteristiche sia progettuali che di gestione/controllo, di interesse per il loro utilizzo al fine di contribuire al soddisfacimento del fabbisogno energetico globale, tenendo conto principalmente degli aspetti della disponibilità di energia, economici e di sicurezza. Una breve presentazione degli aspetti impiantistici dei futuri impianti a fusione completerà il corso.

Obiettivi fondamentali del corso sono:

- dare allo studente la capacità di comprendere e utilizzare a pieno i principi fondamentali dell'ingegneria nucleare;
- fornire una panoramica riguardo agli impianti nucleari attualmente in funzione nel mondo con informazioni relative alla generazione dei costi per la produzione di elettricità per mezzo dell'energia nucleare;
- presentare i concetti fondamentali riguardo allo scambio termico per ebollizione ed al flusso bifase al fine di comprendere i fenomeni alla base della generazione di potenza e della sua conversione in un impianto nucleare;
- introdurre, oltre che le principali filiere ad acqua leggera (LWR), anche le altre tipologie di impianto a fissione di seconda generazione (HWR, GCR);
- illustrare le caratteristiche dei principali componenti interni al vessel dei reattori nucleari PWR e BWR;
- fornire le informazioni di base sul ciclo del combustibile nucleare.



- discutere e presentare le principali tipologie e caratteristiche di reattori nucleari di III e IV generazione e dei futuri SMR;
- descrivere le principali caratteristiche dei componenti e dei sistemi utilizzati nei reattori nucleari di III e IV generazione.

**Obiettivi formativi in Inglese:** The student who successfully completes the course will be able to demonstrate a solid knowledge of the main types of present and future Nuclear Power Plants (NPP), in particular of Gen. III, IV, and SMR plants, related in particular to the characteristics and features of interest for their exploitation in order to contribute to solving the world energy needs taking into account principally of the energy availability, economics and safety. A short description of the main aspects of the future nuclear fusion plants will be performed at the end of the course.

The course objectives are the following:

- to summarize the fundamental principles of nuclear engineering;
- to provide an overview of commercial nuclear power plants under operation in the world will be presented with information about the generation costs for the electricity produced by nuclear energy;
- fundamental concepts about boiling heat transfer and two-phase flow are introduced with the purpose to better understand the phenomena at the basis of the power generation and conversion in a nuclear power plant;
- in addition to Light Water Reactors, Heavy Water Reactors, Gas Cooled Reactors design will be introduced;
- to illustrate the characteristics of the main reactor vessel internal components of PWR and BWR;
- provide basic information on the nuclear fuel cycle;
- discuss and present the main types and characteristics of Generation III and IV nuclear reactors and future SMRs;
- describe the main characteristics of the components and systems employed in the third and fourth generation of nuclear reactors.

**CFU:** 12

**Reteirabilità:** 1

**Modalità di verifica finale:** prova orale con voto in trentesimi

**Lingua ufficiale:** Inglese

**Moduli**

Denominazione	CFU	SSD	Tipologia	Caratteristica	Ambito
Nuclear Plants II	6	ING-IND/19 IMPIANTI NUCLEARI	Caratterizzanti	lezioni frontali + esercitazioni	Ingegneria energetica e nucleare
Nuclear Plants I	6	ING-IND/19 IMPIANTI NUCLEARI	Caratterizzanti	lezioni frontali + esercitazioni	Ingegneria energetica e nucleare

**Nuclear Safety (12 CFU)**

**Denominazione in Inglese:** Nuclear Safety

**Obiettivi formativi:** Fornire conoscenze sulla sicurezza nucleare, con particolare riferimento a:

- la metodologia di sicurezza nucleare e relativa procedura di licensing in USA (il 10 CFR Parts 50, 20 e 100; i General Design Criteria e le Regulatory Guides, i safety goals)
- gli obiettivi ed i principi fondamentali di sicurezza IAEA (INSAG 3 e 12)
- le metodologie di sicurezza basate sull'affidabilità: di Farmer, canadese e proposta in Italia da Galvagni
- i principali aspetti della normativa di sicurezza nucleare italiana: l'iter autorizzativo per la costruzione e l'esercizio degli impianti nucleari; il piano di emergenza.
- il siting degli impianti nucleari
- il rapporto Rasmussen (WASH 1400)
- gli incidenti nei LWR e principi di progetto dei principali sistemi di sicurezza e protezione, con approfondimenti su LOCA e RIA;
- gli incidenti severi: fenomenologie e metodologie di analisi
- i sistemi di contenimento degli impianti nucleari di potenza e relativi principi di funzionamento; i principali sistemi di salvaguardia ingegneristica associati al contenimento (spray, filtri, trattamento del H2)
- il termine di sorgente per incidenti in LWR
- PSA degli impianti nucleari
- aspetti peculiari degli incidenti in impianti CANDU ed in LMFBR
- gli incidenti di criticità
- la scala INES dell'IAEA per la classificazione degli incidenti nucleari
- la cultura della sicurezza
- l'analisi costi-rischi-benefici e l'impatto ambientale dei diversi cicli energetici.
- Oltre a semplici esercizi sui vari argomenti sopramenzionati, come filo conduttore delle esercitazioni, saranno esaminati o e discussi i rapporti di sicurezza delle centrali come descritti in documenti ed esempi rilevanti, in modo anche da applicare e verificare le conoscenze acquisite a lezione. Introdurre lo studente ad alcuni strumenti informatici utilizzati per le analisi degli incidenti negli impianti nucleari e sviluppare la capacità dello studente all'utilizzo corretto e consapevole di tali strumenti, per lo studio e l'approfondimento dei fenomeni fisici e chimici caratterizzanti tali incidenti e per la risoluzione dei problemi di sicurezza nucleare.

Infine saranno anche discussi gli incidenti di TMI2, Chernobyl e Fukushima, e le lezioni derivate da tali incidenti

**Obiettivi formativi in Inglese:** The objective of the course is to give to the students a sufficient knowledge in nuclear safety, with particular reference to the following items:

- the nuclear safety methodology and related procedure of licensing in USA (10 CFR Parts 50, 20 e 100; General Design Criteria and Regulatory Guides, safety goals)
- the objectives and the fundamental safety principles of IAEA (INSAG 3 and 12)
- the nuclear safety methodologies based on reliability: proposed by Farmer in UK and in Italy by Galvagni, the Canadian safety methodology
- the main aspects of Italian legislation on nuclear safety: the licensing iter for the construction and operation of nuclear



- power plants; the nuclear emergency planning.
- the siting of NPP
- the Rasmussen report (WASH 1400)
- the accidents in LWR and design principles of the main safety and protection systems; in depth treatment of LOCA and RIA;
- the severe accidents: phenomenology and methods of analysis
- the containment systems of Nuclear Power Plants (NPP) and related operation principles; the main engineering safeguard systems associated to the containment (spray, filters, H2 treatment)
- the source term for accidents in LWR
- PSA of NPP
- peculiar aspects of accidents in CANDU NPP
- peculiar aspects of accidents in Liquid Metal FBR
- the criticality accidents
- the INES scale of IAEA for nuclear accidents classification
- the safety culture
- the costs-risks-benefits analysis and the environmental impact of the various energy cycles.

For the practical activities, in addition to simple exercises on the various items abovementioned, the preliminary safety reports of current NPPs as described in relevant documents and examples will be discussed, in such a way to apply and verify the knowledge acquired in the lessons. Some informatics instruments will be used for NPP accidents analysis (IAEA NPP Simulator, GOthic and FUMO for containment analysis, MELCOR for severe accident analysis). The aim is to develop in the students the capability for a correct and knowledge based use of these instruments for study the physical and chemical phenomena which characterize the main nuclear accidents and for solving nuclear safety problems.

Finally the TMI2, Chernobyl and Fukushima accidents and related lessons will be discussed.

**CFU:** 12

**Reteirabilità:** 1

**Propedeuticità:** Nuclear Plants

**Modalità di verifica finale:** Prova orale con voto in trentesimi

**Lingua ufficiale:** Inglese

**Moduli**

Denominazione	CFU	SSD	Tipologia	Caratteristica	Ambito
Nuclear Safety	12	ING-IND/19 IMPIANTI NUCLEARI	Caratterizzanti	lezioni frontali + esercitazioni	Ingegneria energetica e nucleare

**Nuclear Thermal Hydraulics (12 CFU)**

**Denominazione in Inglese:** Nuclear Thermal Hydraulics

**Obiettivi formativi:** 1) Criteri per il progetto dei sistemi di emergenza (ECCS) nei reattori nucleari refrigerati ad acqua. 2) Aspetti rilevanti nella progettazione termoidraulica degli impianti nucleari. 3) Scambio di calore per conduzione e progettazione termoidraulica delle barrette di combustibile. 4) Modelli per la valutazione di aspetti termoidraulici di progetto e di sicurezza negli impianti nucleari. 5) Fenomeni termoidraulici nell'analisi degli incidenti negli impianti nucleari. 6) La circolazione naturale. 7) Analisi termoidraulica di incidenti in impianti nucleari.

**Obiettivi formativi in Inglese:** 1) Design criteria for emergency core cooling systems (ECCS) in LWRs. 2) Thermal-hydraulics and NPP technology. 3) Design of nuclear fuel pin. 4) Modeling in nuclear thermal-hydraulics 5) Identification and characterization of thermal-hydraulic phenomena in LWRs. 6) Natural circulation. 7) Thermal-hydraulic aspects of key accidents in NPP technology.

**CFU:** 12

**Reteirabilità:** 1

**Modalità di verifica finale:** prova orale con voto in trentesimi

**Lingua ufficiale:** Inglese

**Moduli**

Denominazione	CFU	SSD	Tipologia	Caratteristica	Ambito
Nuclear Thermal Hydraulics	12	ING-IND/19 IMPIANTI NUCLEARI	Caratterizzanti	lezioni frontali + esercitazioni	Ingegneria energetica e nucleare

**Physical Fundamentals of Nuclear Engineering (6 CFU)**

**Denominazione in Inglese:** Physical Fundamentals of Nuclear Engineering

**Obiettivi formativi:** Il corso ha lo scopo di fornire le conoscenze fisiche di base necessarie per affrontare corsi più specifici nell'ambito dell'ingegneria e tecnologia nucleare. Al termine del corso l'allievo deve aver acquisito i fondamentali concetti di relatività, fisica atomica e nucleare che verranno poi richiamati ed utilizzati nei corsi successivi della laurea magistrale in Nuclear Engineering. Il corso si articola sui seguenti argomenti: relatività ristretta; fisica atomica con elementi di meccanica quantistica e struttura della materia; fisica nucleare, decadimento radioattivo e sorgenti di radiazione; interazioni delle radiazioni con la materia; introduzione alla statistica e semplici esercizi di laboratorio.

**Obiettivi formativi in Inglese:** The course has the purpose to give to the students the knowledge of the basic physics required to attend more specific courses in nuclear engineering and technology. At the end of the course the student should



have acquired the basic concepts of relativity, atomic and nuclear physics, which he will use in the following courses of the Master degree in Nuclear Engineering. The course is based on the following items: special relativity; atomic physics with elements of quantum mechanics and structure of matter; nuclear physics, radioactive decay and radiation sources; radiation interactions with matter; introduction to statistics and simple laboratory exercises

**CFU:** 6

**Reteirabilità:** 1

**Modalità di verifica finale:** Prova orale con voto in trentesimi

**Lingua ufficiale:** Inglese

**Moduli**

Denominazione	CFU	SSD	Tipologia	Caratteristica	Ambito
Physical Fundamentals of Nuclear Engineering	6	ING-IND/20 MISURE E STRUMENTAZIONE NUCLEARI	Caratterizzanti	lezioni frontali + esercitazioni	Ingegneria energetica e nucleare

**Physics and Numerical Models for Nuclear Reactors (12 CFU)**

**Denominazione in Inglese:** Physics and Numerical Models for Nuclear Reactors

**Obiettivi formativi:** Il corso ha lo scopo di fornire le conoscenze di base sui fenomeni di trasporto nel nocciolo di un reattore nucleare, con riferimento agli aspetti neutronici statici e dinamici rilevanti per la progettazione. Il corso ha anche lo scopo di fornire la padronanza degli strumenti matematici e numerici alla base dei calcoli di nocciolo, descrivendo le teorie di base (diffusione e trasporto) con riferimento ad aspetti multifisici di termoidraulica e CFD.

Modulo di Fisica del Reattore

Gli argomenti trattati in questo modulo prevedono:

- brevi richiami di fisica nucleare e sulla interazione dei neutroni con la materia; definizione delle sezioni d'urto; l'effetto Doppler;
- equazione di continuità, legge di Fick ed equazione della diffusione; analisi in diffusione dell'esperienza pulsata in diverse geometrie; analisi di problemi stazionari con sorgente; definizione della funzione di Green; fattore di utilizzazione termica,  $f$ ;
- studio del rallentamento dei neutroni in mezzo infinito senza e con assorbimento; il fattore di sfuggita alla cattura di risonanza,  $p$ ; il fattore di moltiplicazione veloce  $\square$ ;
- l'equazione della diffusione dipendente dall'energia; la teoria dell'età di Fermi; le equazioni della diffusione a più gruppi energetici;
- definizione di costante di moltiplicazione; analisi del reattore critico (teoria ad un gruppo, dipendente dal tempo, ma con soli neutroni pronti, e teoria basata sulla equazione stazionaria); criticità a più gruppi;
- teoria del riflettore; problema della barra di controllo (cenno alla teoria delle perturbazioni); avvelenamento da Xe e Sm;
- i neutroni ritardati; la teoria cinetica del reattore omogeneo in età-diffusione;
- elementi introduttivi sul metodo Monte Carlo.

Esercitazioni: utilizzo di un codice Monte Carlo opensource per il calcolo di alcune grandezze fondamentali della fisica dei reattori.

Modulo di Modelli Numerici

L'obiettivo principale del modulo è fornire agli studenti le conoscenze e le abilità di base per sviluppare ed utilizzare consapevolmente modelli numerici e codici di calcolo per la neutronica. Gli argomenti trattati riguardano:

- le equazioni differenziali a derivate parziali della fisica matematica e la loro classificazione;
- le equazioni della diffusione e del trasporto dei neutroni, per problemi stazionari e di cinetica;
- le tecniche principali di discretizzazione numerica (differenze, finite, volumi finiti, elementi finiti, metodi coarse-mesh) e le proprietà dei metodi numerici ottenuti;
- gli algoritmi risolutivi utilizzati da alcuni dei codici esistenti per la diffusione ed il trasporto dei neutroni (armoniche sferiche, probabilità di collisione e ordinate discrete);
- esercitazioni con codici di calcolo in-house e/o con codici in uso nel settore nucleare.

**Obiettivi formativi in Inglese:** The course has the purpose to provide the basic knowledge on neutron transport phenomena in the core of a nuclear reactor, with main reference to the steady state and dynamic aspects having relevance for reactor design. The course has also the purpose to make the student master the mathematical and numerical tools necessary for reactor core calculations, describing basic theories (neutron diffusion and transport).

Reactor Physics

The main topics of the module are:

- reminders about fundamentals of Nuclear Physics and on the interaction of neutrons with matter; definition of cross sections; the Doppler effect;
- the neutron continuity equation, the Fick's law and the neutron diffusion equation; analysis of the pulsed-neutron experiments in different geometries; steady-state problems with neutron source; the Green's function; the thermal utilization factor,  $f$ ;
- the neutron slowing-down in an infinite medium, with and without absorption; the resonance escape probability factor,  $p$ ; the fast fission factor,  $\square$ ;
- the energy dependent diffusion equation; the Fermi age theory; the multi-energy group (i.e., multi-group) diffusion equations;
- definition of the multiplication factor; the critical reactor (time dependent one-group theory with prompt neutrons only and theory based on the steady-state equation); multi-group criticality problems;
- the reflector theory; the problem of an axial control rod (outline of the perturbation theory); the Xe and Sm poisoning of the reactor;
- the delayed neutrons; the reactor kinetics theory with the age-diffusion approach;
- outline of Monte Carlo methods.

Exercises: use of an open source Monte Carlo code for the calculation of some relevant parameters of the reactor physics.

Numerical Models

The main objective of the module is to provide the students with the basic knowledge and skills for developing and making



use with due awareness of numerical models and codes for neutronics. The addressed subjects will be:

- partial differential equations of mathematical physics and their classification;
- the equations of neutron diffusion and transport for steady state and kinetics problems;
- the balance equations of thermal-hydraulics and CFD;
- the main numerical discretisation techniques (finite differences, finite volumes, finite elements and coarse-mesh methods) and the properties of the resulting numerical schemes;
- the solution algorithms adopted by some of the existing codes for diffusion and neutron transport (spherical harmonics, collision probability and discrete ordinates);
- exercises with in-house codes and/or with codes adopted in the nuclear field

**CFU:** 12

**Reteirabilità:** 1

**Modalità di verifica finale:** prova orale con voto in trentesimi

**Lingua ufficiale:** Inglese

**Moduli**

Denominazione	CFU	SSD	Tipologia	Caratteristica	Ambito
Nuclear Reactor Physics	6	ING-IND/18 FISICA DEI REATTORI NUCLEARI	Caratterizzanti	lezioni frontali + esercitazioni	Ingegneria energetica e nucleare
Numerical Models for Nuclear Reactors	6	ING-IND/18 FISICA DEI REATTORI NUCLEARI	Caratterizzanti	lezioni frontali + esercitazioni	Ingegneria energetica e nucleare

**Radiation Protection (6 CFU)**

**Denominazione in Inglese:** Radiation Protection

**Obiettivi formativi:** Questo corso copre i principi e gli obiettivi fondamentali della radioprotezione (fisica sanitaria), le grandezze dosimetriche utilizzate per stimare il rischio radiologico per gli essere umani, i calcoli di base delle schermature e le altre misure di protezione radiologica negli ambienti lavorativi, la descrizione e l'utilizzo corretto della strumentazione radioprotezionistica, gli aspetti normativi ed i requisiti amministrativi dei programmi radioprotezionistici applicati agli ambienti di lavoro industriali e alle attività, e per le attività industriali e mediche.

Obiettivi didattici

- Riconoscere le varie sorgenti di radiazioni, le modalità di esposizione ed i rischi connessi.
- Acquistare familiarità con la strumentazione usata in radioprotezione.
- Comprendere gli aspetti fondamentali delle esposizioni alle radiazioni, delle tecniche radioprotezionistiche e di schermatura.
- Eseguire misure e calcoli di dosimetria sia per esposizioni esterne che interne alle radiazioni ionizzanti e valutare i rischi associati.
- Conoscere gli standard, le linee guida e le raccomandazioni della radioprotezione.

**Obiettivi formativi in Inglese:** This course covers the fundamental principles and objectives of radiation protection, the quantities of radiation dosimetry used to evaluate human radiation risks, the biological effects of ionizing radiations, the basic shielding calculations and protection measures for workplace environments, the characterization and proper use of radiation protection instrumentation, the regulatory and administrative requirements of radiation protection programs as applied to industrial workplaces and medical activities.

Learning Outcomes

Upon successful completion of this course, students will be able to:

- Differentiate between various radiation sources, exposure, pathways and their related risks;
- Be familiar with the type of instrumentation used in radiation protection;
- Understand the elements of radiation exposure, protection and shielding;
- Perform dosimetry measurements and calculations for external and internal ionizing radiation exposures and perform associated risk analysis;
- Know the radiation protection standards, guidelines and recommendations.

**CFU:** 6

**Reteirabilità:** 1

**Modalità di verifica finale:** Prova orale con voto in trentesimi

**Lingua ufficiale:** Inglese

**Moduli**

Denominazione	CFU	SSD	Tipologia	Caratteristica	Ambito
Radiation Protection	6	ING-IND/20 MISURE E STRUMENTAZIONE NUCLEARI	Affini o integrative	lezioni frontali + esercitazioni	Attività formative affini o integrative

**Single and Two-phase Thermal-hydraulics (6 CFU)**

**Denominazione in Inglese:** Single and Two-phase Thermal-hydraulics



**Obiettivi formativi:** Si tratta di un corso compatto di due settimane inquadrato nell'offerta per il conseguimento di EMSNE, da attivare qualora vi sia una richiesta specifica da parte di studenti stranieri appartenenti a membri dell'associazione ENEN o ad istituzioni ad essa connesse tramite Memorandum of Understanding. Il corso si compone di 8 Unità Didattiche: Unit 1 – Fluids and Balance Equations; Unit 2 – Laminar Flow, Navier-Stokes Equations and Boundary Layer Phenomena; Unit 3 – Heat Transfer in Laminar Flow; Unit 4 – Momentum and Heat Transfer in Turbulent Flow; Unit 5a – Natural Circulation in Single-Phase Flow; Unit 5b – Notes on Compressible Single-Phase Flow; Unit 5c – More on Turbulence; Unit 6 – Two-Phase Flow: General Definitions, Flow Regime Maps and Balance Equations; Unit 7 – Pressure Drops and Heat Transfer in Two-Phase Flow; Unit 8 – Some Specific Phenomena in Two-Phase Flow: Critical Flow, Flooding and Boiling Channel Instabilities.

Vengono svolti esercizi sui seguenti aspetti applicativi: Unit E1 – Basic Exercises on Heat Conduction; Unit E2 – Examples of Application of Lumped Parameter Balance Equation; Unit E3 – Basic Balances in LWRs; Unit E4 – Basic Applications of CFD Codes; Unit E5 – Basic Applications of the RELAP5 Code.

**Obiettivi formativi in Inglese:** It is a compact course held in two weeks to be offered to foreign students from ENEN members or institutions having a Memorandum of understanding with the Association, upon specific request. The course is composed of 8 teaching units: Unit 1 – Fluids and Balance Equations; Unit 2 – Laminar Flow, Navier-Stokes Equations and Boundary Layer Phenomena; Unit 3 – Heat Transfer in Laminar Flow; Unit 4 – Momentum and Heat Transfer in Turbulent Flow; Unit 5a – Natural Circulation in Single-Phase Flow; Unit 5b – Notes on Compressible Single-Phase Flow; Unit 5c – More on Turbulence; Unit 6 – Two-Phase Flow: General Definitions, Flow Regime Maps and Balance Equations; Unit 7 – Pressure Drops and Heat Transfer in Two-Phase Flow; Unit 8 – Some Specific Phenomena in Two-Phase Flow: Critical Flow, Flooding and Boiling Channel Instabilities.

Exercises are performed in the following areas: Unit E1 – Basic Exercises on Heat Conduction; Unit E2 – Examples of Application of Lumped Parameter Balance Equation; Unit E3 – Basic Balances in LWRs; Unit E4 – Basic Applications of CFD Codes; Unit E5 – Basic Applications of the RELAP5 Code.

**CFU:** 6

**Reteirabilità:** 1

**Modalità di verifica finale:** Prova orale con voto in trentesimi

**Lingua ufficiale:** Inglese

**Moduli**

Denominazione	CFU	SSD	Tipologia	Caratteristica	Ambito
Single and Two-phase Thermal-hydraulics	6	ING-IND/19 IMPIANTI NUCLEARI	Altre attività - scelta libera dello studente	e_learning	A scelta dello studente

**Note:**La modalità di erogazione e-learning potrà sostituire e/o affiancare le lezioni frontali

**Structural Mechanics and Nuclear Constructions (6 CFU)**

**Denominazione in Inglese:** Structural Mechanics and Nuclear Constructions

**Obiettivi formativi:** Obiettivi formativi

Questo corso si propone di fornire le conoscenze di base, i fondamenti metodologici, e le abilità necessarie fondamentali utili per la verifica strutturale di componenti, sistemi e strutture caratterizzanti un impianto nucleare, fortemente interconnessi, e soggetti a carichi statici e variabili nel tempo.

Obiettivi didattici

- Maturare la padronanza delle regole che governano l'equilibrio di sistemi semplici e complessi tipici di un impianto nucleare di potenza, come recipienti in pressione, generatori di vapore, tubazioni, pompe e valvole.
- Sviluppare la capacità di eseguire calcoli termici e meccanici strutturali di componenti complessi;
- Impostare in forma sistematica l'analisi dei continui deformabili bidimensionali a superficie media piana e curva, in regime membranale e flessionale (piastre e gusci).
- Impostare il tema del comportamento plastico del materiale e della risposta elastoplastica delle strutture
- Applicare i criteri di crisi per deformazione plastica incrementale e thermal ratcheting;
- Sviluppare la capacità di eseguire calcoli di meccanica lineare elastica della frattura e dimostrare la conoscenza degli standard di riferimento come la ASME sez. III e sez. XI.
- Discutere in modo approfondito il tema della stabilità dell'equilibrio ed applicare i criteri di crisi per collasso-plastico, ovvero l'analisi limite delle strutture.

Educational objectives

This course aims to provide the basic knowledge, methods, and fundamental skills useful for the structural verification of components, systems and structures characterizing a nuclear plant, strongly interconnected, and subjected to static and time-varying loads

Educational objectives

- Acquire the mastery of the rules governing the equilibrium of simple and complex systems of a nuclear power plant, such as pressure vessels, steam generators, piping, pumps and valves.
- Develop the ability to perform thermal and structural mechanical calculations of complex components;
- Systematically set up the analysis of two-dimensional deformable continuums with flat and curved mean surfaces, in membrane and flexural regimes (plates and shells).
- Formulate the plastic behaviour of the material and the elastoplastic response of the structures
- Apply the failure criteria for incremental plastic deformation and thermal ratcheting;
- Develop the ability to perform linear elastic fracture mechanics calculations and demonstrate knowledge of relevant standards such as ASME sect. III and XI.



- Discuss in depth the equilibrium stability and apply the plastic-collapse failure criteria, i.e. the limit analysis of the structures.

**Obiettivi formativi in Inglese:** This course illustrates the structural calculations of complex components of a nuclear power plant such as pressure vessels, steam generators, pipelines, pumps and valves.

The criteria for plastic collapse, incremental plastic deformation and "thermal ratcheting" and the main aspects of elastic linear fracture mechanics are illustrated.

- Advanced knowledge of the reference standards such as ASME III and ASME XI.

Educational objectives:

- To learn the design principles of structural mechanics (plate and shell theory, limit analysis, thermal source voltage and fracture mechanics) and their field of application.

- - Understand and be able to perform the sizing and verification calculations of complex components of a nuclear power plant such as pressure vessels, steam generators, pipes, pumps and valves

- Learn how to choose the calculation models for component analysis according to ASME regulations

**CFU:** 6

**Reteirabilità:** 1

**Modalità di verifica finale:** Rapporto di calcolo scritto + prova orale con voto in trentesimi

**Lingua ufficiale:** Inglese

### Moduli

Denominazione	CFU	SSD	Tipologia	Caratteristica	Ambito
Structural Mechanics and Nuclear Constructions	6	ING-IND/19 IMPIANTI NUCLEARI	Caratterizzanti	lezioni frontali + esercitazioni	Ingegneria energetica e nucleare



**Curriculum: Unico**

**Primo anno (60 CFU)**

**Control of Nuclear Plants (6 CFU)**

	CFU	SSD	Tipologia	Ambito
Control of Nuclear Plants	6	ING-IND/19	Caratterizzanti	Ingegneria energetica e nucleare

**Nuclear Measurements (6 CFU)**

	CFU	SSD	Tipologia	Ambito
Nuclear Measurements	6	ING-IND/20	Caratterizzanti	Ingegneria energetica e nucleare

**Nuclear Plants (12 CFU)**

	CFU	SSD	Tipologia	Ambito
Nuclear Plants II	6	ING-IND/19	Caratterizzanti	Ingegneria energetica e nucleare
Nuclear Plants I	6	ING-IND/19	Caratterizzanti	Ingegneria energetica e nucleare

**Nuclear Thermal Hydraulics (12 CFU)**

	CFU	SSD	Tipologia	Ambito
Nuclear Thermal Hydraulics	12	ING-IND/19	Caratterizzanti	Ingegneria energetica e nucleare

**Physical Fundamentals of Nuclear Engineering (6 CFU)**

	CFU	SSD	Tipologia	Ambito
Physical Fundamentals of Nuclear Engineering	6	ING-IND/20	Caratterizzanti	Ingegneria energetica e nucleare

**Physics and Numerical Models for Nuclear Reactors (12 CFU)**

	CFU	SSD	Tipologia	Ambito
Nuclear Reactor Physics	6	ING-IND/18	Caratterizzanti	Ingegneria energetica e nucleare
Numerical Models for Nuclear Reactors	6	ING-IND/18	Caratterizzanti	Ingegneria energetica e nucleare

**Nuclear Materials (6 CFU)**

	CFU	SSD	Tipologia	Ambito
Nuclear Materials	6	ING-IND/19	Affini o integrative	Attività formative affini o integrative



**Curriculum: Unico**

**Secondo anno (60 CFU)**

**Engineering of Fusion Reactors (6 CFU)**

	CFU	SSD	Tipologia	Ambito
Engineering of Fusion Reactors	6	ING-IND/19	Caratterizzanti	Ingegneria energetica e nucleare

**Nuclear Safety (12 CFU)**

	CFU	SSD	Tipologia	Ambito
Nuclear Safety	12	ING-IND/19	Caratterizzanti	Ingegneria energetica e nucleare

**Structural Mechanics and Nuclear Constructions (6 CFU)**

	CFU	SSD	Tipologia	Ambito
Structural Mechanics and Nuclear Constructions	6	ING-IND/19	Caratterizzanti	Ingegneria energetica e nucleare

**Radiation Protection (6 CFU)**

	CFU	SSD	Tipologia	Ambito
Radiation Protection	6	ING-IND/20	Affini o integrative	Attività formative affini o integrative

**Gruppo: Attività consigliate per la libera scelta ( 12 CFU)**

Descrizione	Tipologia	Ambito
Gli studenti devono scegliere 12 cfu		

**Final examination (18 CFU)**

	CFU	SSD	Tipologia	Ambito
Final examination	18	PROFIN_S	Altre attività - prova finale	Per la prova finale

