

Informazioni generali

- Anno di corso: 3
- Semestre: 2
- CFU: 9

Docenti responsabili

[Michele MANNO](#) , [Stefano MAZZONI](#)

Obiettivi formativi

Il corso si propone di fornire le conoscenze fondamentali sulle diverse fonti di energia, sui vettori energetici da esse derivate, e sul loro impiego nei sistemi energetici nazionali per soddisfare i consumi finali, con particolare riguardo alle fonti di energia rinnovabile, all'impiego dell'idrogeno come vettore energetico, all'accumulo di energia. Al termine del corso, studenti e studentesse avranno acquisito le conoscenze necessarie per valutare criticamente potenzialità e limiti di diverse fonti e tecnologie energetiche, nel contesto della transizione verso uno scenario energetico a ridotte o nulle emissioni climalteranti.

Il corso rappresenta un'introduzione ad argomenti specialistici che troveranno adeguato approfondimento negli insegnamenti del Corso di Laurea Magistrale riguardanti gli impianti di potenza, le tecnologie per la conversione di energia da fonte rinnovabile, l'elettrochimica applicata all'energia.

Programma del corso

FONTI DI ENERGIA E SISTEMI ENERGETICI NAZIONALI

Classificazione delle fonti di energia, dei vettori energetici e degli usi finali; descrizione dei sistemi energetici nazionali; panoramica dei processi di conversione impiegati per soddisfare gli usi finali nei diversi settori energetici; statistiche su produzione e consumo di energia a livello mondiale e nazionale.

FONTI DI ENERGIA RINNOVABILE

Generalità

Generalità: Classificazione delle fonti di energia rinnovabile, definizione di fattore di utilizzo e

ore equivalenti di funzionamento.

Fonti non programmabili

Energia solare

Caratteristiche della radiazione solare, irradianza al suolo su superfici orizzontali e inclinate, insolazione media, irradianza e insolazione in condizioni reali, banche dati radiazione solare, confronto condizioni reali - cielo sereno, mappa DNI, GHI. Semiconduttori e giunzioni p-n. Effetto fotovoltaico; celle fotovoltaiche: struttura, circuito equivalente e curva caratteristica, definizione delle condizioni di riferimento, rendimento, prestazioni al variare dell'irradianza e della temperatura della cella. Impianti fotovoltaici: rendimento e prestazioni; schede tecniche di moduli fotovoltaici; ore equivalenti.

Energia eolica

Formazione dei venti, analisi anemometrica, caratteristiche della distribuzione della velocità del vento, influenza della quota sulla velocità del vento, potenza disponibile, densità di energia e densità di potenza media disponibili. Conversione di energia: definizione di coefficiente di potenza di un aerogeneratore, limite di Betz; aerogeneratori: caratteristiche generali di turbine ad asse orizzontale, curva di potenza, specifiche tecniche, producibilità di impianti eolici, ore equivalenti.

Fonti programmabili

Energia idroelettrica

Classificazione delle centrali idroelettriche; impianti idraulici di accumulazione dell'energia; diagramma cronologico delle portate e diagrammi dei deflussi.

Altre fonti di energia rinnovabile

Cenni su energia da biomasse, energia geotermica, moto ondoso e maree.

L'INTEGRAZIONE TRA FONTE RINNOVABILE E RETE ELETTRICA

Concetti di produzione centralizzata e distribuita (Comunità Energetiche e Autoconsumo). introduzione alla rete elettrica nazionale, definizione del diagramma di carico giornaliero e classificazione delle fonti energetiche che concorrono al soddisfacimento del carico. Concetto di fattore di potenza, statismo e regolazione della rete. Costo marginale di produzione, *peak shaving* e relativi sistemi di accumulo e di

fuel diversification

SISTEMI REAGENTI

Combustione

Panoramica sulle fonti fossili e sui combustibili da esse derivati. Analisi dei processi di combustione: potere calorifico; rapporto stechiometrico; composizione e proprietà termofisiche dei gas combusti; tonalità termica; indice di Wobbe; rendimento di un generatore di calore; fattori di emissione ed emissioni specifiche di CO₂ nella generazione di energia elettrica, nel trasporto e nel riscaldamento; caratteristiche e proprietà dei principali combustibili fossili.

Bilancio energetico di sistemi reagenti

Entalpia di formazione, entalpia di reazione, reazioni a pressione e temperatura costanti: bilancio di Primo e Secondo Principio, variazione di energia libera di Gibbs, massimo lavoro ottenibile, influenza delle condizioni operative (pressione, temperatura, composizione chimica).

Celle elettrochimiche

Definizioni generali, legge di Faraday, tensione teorica di cella, potenziale di elettrodo, irreversibilità, tensione reale di cella, curva caratteristica e circuito equivalente.

ACCUMULO DI ENERGIA

Generalità sui sistemi di accumulo di energia per applicazioni centralizzate e distribuite: classificazione in relazione alla forma energetica di accumulo (elettrica, meccanica, termica), definizioni dei principali parametri operativi (capacità, State of Charge, Round-Trip Efficiency, potenza di carica e scarica), applicazioni, relazione tra potenza di scarica ed energia disponibile (diagramma di Ragone).

Batterie elettrochimiche

Classificazione e principi di funzionamento, energia specifica teorica ed effettiva, effetto del livello di carica e della temperatura sulla tensione, effetto dell'intensità di corrente sulla capacità, caratteristiche prestazionali dei principali tipi di batteria elettrochimica.

Idrogeno

Caratteristiche generali del vettore energetico idrogeno e del suo possibile ruolo nel sistema energetico.

Produzione

Panoramica sui sistemi di produzione dell'idrogeno. Elettrolisi: classificazione e principi di funzionamento dei principali tipi di elettrolizzatore (alcalini, AEM, PEM, SOEC), caratteristiche funzionali e operative, confronto tra le prestazioni.

Accumulo

Problemi generali e requisiti dei sistemi di accumulo di idrogeno; classificazione, caratteristiche di sistemi di accumulo fisico (idrogeno compresso, criocompresso, liquido) e chimico (idruri metallici, ammoniaca, LOHC), confronto tra le prestazioni.

Impiego

Cenni ai processi Power-to-Gas e Power-to-Liquid; celle a combustibile: caratteristiche generali, principi di funzionamento dei principali tipi di celle a combustibile (AFC, PEM, PAFC, MCFC, SOFC), parametri operativi (rendimento di cella e complessivo, tensione, curva caratteristica).

APPROCCIO ALLA DECARBONIZZAZIONE DEI SISTEMI ENERGETICI

Classificazione delle tipologie di emissioni inquinanti e differenziazione degli emission scope (Scope 1, 2, 3). Identificazione dei parametri di emissione di un sistema energetico in relazione al processo di interesse (consumo specifico e fattore di emissione specifico).

Calcolo dei fattori di emissione in relazione alla tipologia di vettore energetico impiegato e classificazione dei processi in relazione a norme e protocolli vigenti (GHG Protocol).

Introduzione ai concetti di Carbon Verification, Certification and Trade per il riconoscimento dei crediti di CO₂, regolati da enti normatori quali ISO, Bureau Veritas, Verra & Gold Standard.

ANALISI ECONOMICA DI IMPIANTI DI GENERAZIONE DI ENERGIA ELETTRICA E DI ACCUMULO

Impianti di generazione: *Levelised Cost Of Electricity* (LCOE).

Impianti di accumulo di energia elettrica: *Levelised Cost OF Storage* (LCOS).

Impianti di produzione di idrogeno: *Levelised Cost Of Hydrogen* (LCOH).

Eventuali propedeuticità

Anche se non sono previste propedeuticità formali, prima di frequentare il corso di è fortemente consigliato di aver sostenuto gli esami di Chimica, Elettrotecnica, Fisica Tecnica e Macchine.

Testi di riferimento

Dispense fornite dal docente e disponibili sulla piattaforma MS Teams.

Per ulteriori approfondimenti:

- Burton, T. L., N. Jenkins, E. Bossanyi, D. Sharpe e M. Graham (2021). *Wind Energy Handbook*. 3a ed. Wiley. isbn: 9781119451143. doi: [10.1002/9781119451143](https://doi.org/10.1002/9781119451143) .
- D. Cocco, P. Puddu. *Tecnologie delle Energie Rinnovabili*, 3a ed., Padova: Servizi Grafici Editoriali, 2016. ISBN: 9788889884331.
- Goswami, D. Y. (2015). *Principles of Solar Engineering*. 3a ed. CRC Press, Taylor & Francis. isbn: 9781466563797.
- Mertens, K. (2018). *Photovoltaics: Fundamentals, Technology, and Practice*. 2a ed. Wiley. isbn: 9781119401049.
- J. Larminie e A. Dicks. *Fuel Cell Systems Explained*. 2a ed. John Wiley & Sons, 2003. ISBN: 9781118878330. DOI: [10.1002/9781118878330](https://doi.org/10.1002/9781118878330) .
- M. Sterner e I. Stadler. *Handbook of Energy Storage*. 1a ed. Berlino, Heidelberg: Springer, 2019. ISBN: 978-3-662-55504-0.
- Petrovic, S. *Battery Technology Crash Course: A Concise Introduction*. 1a ed. Springer. isbn: 9783030572693. doi: [10.1007/978-3-030-57269-3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57269-3) .
- Petrovic, S. *Electrochemistry Crash Course for Engineers*. 1a ed. Springer. isbn: 9783030615628. doi: [10.1007/978-3-030-61562-8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-61562-8) .
- Lefrou, C., P. Fabry e J.-C. Poignet (2012). *Electrochemistry: The Basics, With Examples*.

1a ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. isbn: 978-3-642-30250-3. doi: [10.1007/978-3-642-30250-3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-30250-3)

- Lehner, M., R. Tichler, H. Steinmüller e M. Koppe (2014). Power-to-Gas: Technology and Business Models. 1a ed. SpringerBriefs in Energy. Springer International Publishing. isbn: 978-3-319-03995-4. doi: [10.1007/978-3-319-03995-4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-03995-4).

- F. P. Incropera. Climate Change: A Wicked Problem. New York: Cambridge University Press, 2016. ISBN: 9781107521131.

- International Energy Agency. Projected Costs of Generating Electricity. 2020 Edition. <http://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>

Modalità d'esame

L'esame prevede una prova orale e la presentazione di un'esercitazione svolta in gruppo.

La prova orale ha lo scopo di verificare l'apprendimento e la padronanza dei concetti teorici del corso, nonché la capacità di discutere criticamente problemi legati agli argomenti affrontati nel corso.

Le esercitazioni hanno lo scopo di verificare la padronanza degli argomenti del corso dal punto di vista quantitativo e prevedono la valutazione tecnico-economico di semplici sistemi energetici caratterizzati da profili di carico prestabiliti e dotati di sistemi di generazione e di accumulo.