



## UNIVERSITÀ DI PISA

### ENERGETICA GENERALE I E II

ALESSANDRO FRANCO

Anno accademico 2020/21  
CdS INGEGNERIA DELL'ENERGIA  
Codice 651II  
CFU 12

Moduli	Settore/i	Tipo	Ore	Docente/i
ENERGETICA GENERALE I	ING-IND/10	LEZIONI	60	ALESSANDRO FRANCO
ENERGETICA GENERALE II	ING-IND/09	LEZIONI	60	ALESSANDRO FRANCO

#### Programma (contenuti dell'insegnamento)

##### Energetica I

Le varie forme di energia e le classificazione. Fonti energetiche ed usi finali. Richiamo sui concetti di energia e flusso di energia (potenza). Percezione di grandezze energetiche. Esempi di ordini di grandezza e dati. Richiami sulle applicazioni dei bilanci di massa ed energia (prima legge della termodinamica) con riferimento ad alcuni specifici casi applicativi. Confronto tra i vari termini energetici (termini e meccanici) in alcuni sistemi fluenti utilizzando gas, acqua e vapore. Esempi applicativi: la turbina a vapore e la idropulitrice meccanica. Richiami sulle proprietà termofisiche del vapore d'acqua ed utilizzazione delle tabelle termodinamiche. Valutazione della potenza di alcuni sistemi energetici di interesse tecnico pratico. Caso riferito ad uso di vapore di acqua per un processo agroalimentare. Un impianto termoelettrico basato su ciclo Rankine: confronto tra casi ideali e caso con irreversibilità della turbina. Analisi di sistemi energetici sulla base del primo e del secondo principio della termodinamica. Considerazioni sulle dissipazioni termiche verso l'ambiente. Il concetto di qualità delle forme di energia. Trasformazioni ed irreversibilità. Il concetto di degradazione dell'energia. Il concetto di exergia. Exergia associata a diversi sistemi: sorgenti termiche a temperatura fissa, massa con capacità termica finita, sistemi fluenti. Valutazioni numeriche e confronti. Definizione di exergia di sistemi fluenti. I casi del gas ideale e del liquido compresso. Esempi. Definizione del fattore exergetico. Valutazioni numeriche. Exergia associata ad una radiazione di corpo nero. Valutazioni associate ad alcuni casi significativi. Potenza exergetica specifica associata alla radiazione solare. Implicazioni del secondo principio della Termodinamica sull'analisi di sistemi energetici. Il concetto di "risparmio energetica", efficientamento di sistemi energetici. Sistemi energetici con effetti utili eterogenei: gli impianti cogenerativi. Le fonti rinnovabili. Esempio applicativo: confronto tra impianto per la produzione di vapore ed impianto CHP. Rendimenti di secondo principio ed irreversibilità associati a processi di scambio termico. Il caso dei generatori di vapore degli impianti termoelettrici a ciclo Rankine. Valutazione numeriche. Analisi del ciclo Brayton. Confronto tra ciclo Brayton ideale e ciclo Brayton reale: analisi delle irreversibilità nei vari componenti. Conversione diretta ed indiretta dell'energia. I combustibili e le combustioni. Classificazione dei combustibili sulla base di elementi quantitativi. Visione di primo principio: il potere calorifico inferiore e superiore e la temperatura di fiamma adiabatica. Determinazione di alcuni valori caratteristici (metano ed iso-ottano) a partire dalle entalpie molari di formazione dei composti con il metodo del bilancio energetico. Valutazione quantitativa della temperatura adiabatica di fiamma del metano coi i valori dei calori specifici medi delle sostanze coinvolte nel processo. Le combustioni reali. Combustibili e combustioni: da una visione di primo principio a quella di secondo principio. Energia libera di Gibbs molare di formazione. Energia libera di Gibbs standard di reazione dei combustibili. Determinazione dell'exergia chimica dei combustibili: il problema della definizione di un ambiente di riferimento. Modello di sostanza di riferimento e valutazione di alcuni valori dell'exergia chimica di combustibili: monossido di carbonio e metano. Le combustioni reali e le irreversibilità intrinseche ed estrinseche. Gli impianti termoelettrici: limite degli impianti basati su ciclo Rankine (centrali termoelettriche a vapore) e su impianti basati su ciclo Brayton (centrali turbogas). Limiti dei sistemi semplici. Impianti a ciclo combinato Brayton-Rankine. Implementazione della logica dell'impianto a ciclo combinato anche per combustibili solidi: sistemi con gassificazione. Impianto con sistemi a combustione esterna: sistemi EFGT ed EFCC. Analisi comparative di impianti termoelettrici alimentati da diversi combustibili basati su bilanci di massa ed energia. Stima dei consumi di combustibile, delle emissioni di CO<sub>2</sub> e di valori specifici di emissione. Valutazioni numeriche. Usi dell'energia e risorse energetiche. Evoluzione storica degli usi e dei consumi. Gli sviluppi dell'ultimo secolo e negli ultimi 15 anni. Indicatori di utilizzazione dell'energia. Situazione attuale. Fonti primarie e quantità utilizzate. Energia elettrica: modalità di produzione e risorse energetiche utilizzate. Il recente sviluppo delle fonti rinnovabili. I combustibili fossili. Petrolio e prodotti petroliferi. Classificazione dei prodotti petroliferi. Esempi tipici e dati quantitativi. Distillazione frazionata dei prodotti petroliferi. Disponibilità di risorse petrolifere. Il problema dei limiti della disponibilità di risorse ed il continuo superamento. I carboni fossili: classificazione dei carboni fossili e dati caratteristici. Il gas naturale. I combustibili fossili e l'uso in impianti per la conversione di energia. Confronto tra i diversi combustibili in relazione ai rapporti caratteristici aria



## UNIVERSITÀ DI PISA

combustibile. Combustioni con eccesso di aria: valori caratteristici dei rapporti aria-combustibile in condizioni stechiometriche ed in condizioni reali. Le combustioni negli impianti termoelettrici: funzionamento delle caldaie e problemi indotti dalla riduzione della qualità del carbone. Schemi impiantistici tradizionali.

Le diverse tipologie di carbone e le combustioni: stima dei rapporti aria-combustibile. Gli usi dei carboni sub-bituminosi e lignitici. Superamento della combustione convenzionale: la combustione a letto fluido e gli schemi impiantistici relativi. I processi di gassificazione del carbone e gli impianti IGCC.

Bilancio energetico di un sistema con gassificatore di carbone. Utilizzazione dei gas di sintesi per combustione in impianti IGCC. Valori caratteristici dei rapporti aria/combustibile nel caso di combustione di syngas. Fonti rinnovabili e quasi rinnovabili. Il problema della classificazione: classificazioni su basi energetiche e su basi merceologiche. Esempi. Energia geotermica. Il fenomeno geotermico e le risorse geotermiche: elementi fisici di base.

Risorse geotermiche valorizzabili energeticamente. Classificazione sulla base delle proprietà termodinamiche. Diverse tipologie di risorsa geotermica: chimismo del fluido, stato fisico, temperatura e pressione. Valorizzazione energetica delle risorse geotermiche per la produzione di potenza. Impianti a vapore secco, impianti a separazione di vapore ed impianti a ciclo binario. Un caso impiantistico significativo: l'impianto geotermoelettrico di Valle Secolo (area di Larderello): schema impiantistico e bilanci energetici.

Utilizzazione delle risorse geotermiche: definizione dei concetti di rinnovabilità e sostenibilità dell'uso. Il problema dell'uso economicamente sostenibile. Energia solare. La radiazione solare. Elementi fisici di riferimento. Costante solare. Radiazione solare diretta e diffusa. Modelli semplificati per il calcolo della radiazione solare incidente su una superficie.

Calcolo della radiazione solare incidente in funzione delle diverse condizioni stagionali e di nuvolosità del cielo. Valutazioni numeriche effettuate con riferimento a 3 giornate tipo. Energie irradiate su una superficie: valori caratteristici. L'inseguimento solare: effetto degli angoli di inclinazione rispetto alla superficie orizzontale ed azimutale.

Utilizzazione della radiazione solare per la produzione di potenza. Solare termoelettrico o termodinamico: la concentrazione della radiazione solare. Collettori parabolici lineari, concentratori puntuali (solar dish) e sistemi a torre solare. Schemi impiantistici per la realizzazione di impianti solari a concentrazione. Rendimenti caratteristici. Conversione diretta della potenza: il solare fotovoltaico. Cenni ai principi fisici generali della conversione.

Elementi di base della conversione fotovoltaica. Celle fotovoltaiche, moduli fotovoltaici e generatori fotovoltaici. Curva caratteristica di un modulo fotovoltaico ed effetto della variazione della radiazione solare. Varie tecnologie disponibili e modalità di realizzazione di impianti fotovoltaici. Potenzialità e limiti della tecnologia. Biomasse per energia e bioenergie: cenni alla tematica e valutazioni preliminari. Calcoli di densità energetica delle biomasse residuali.

Biomasse per energia e biocombustibili. Le varie filiere per la produzione di biocombustibili da biomasse. Biomasse ligno-cellulosiche e processi termochimici. Biomasse oleaginose e produzione di biodiesel per transesterificazione. Biomasse amidaceo-zuccherine e produzione di bioetanolo. Biomasse umide e produzione di biogas con digestione anaerobica. Energia eolica. Il sistema dei venti e l'interesse energetico. Potenza trasportata da correnti eoliche. Caratterizzazione delle risorse eoliche. Velocità media. Distribuzione probabilistica di Weibull. Energia idraulica ed impianti idroelettrici. Principi fisici di base. Concetti di salto geodetico e portata volumetrica. Analisi di alcuni dati quantitativi caratteristici. Impianti di conversione dell'energia. Possibili schemi impiantistici e modalità di funzionamento.

### ENERGETICA II

Richiami sui principali meccanismi di trasmissione del calore. La conduzione termica. Conducibilità termica e diffusività termica dei materiali. Esempi dimensionali ed esame dei dati dimensionali relativi a sostanze e materiali di interesse tecnico. Esempio applicativo: la potenza termica dispersa da una finestra con tre diverse strutture.

Scambio termico per convezione e per irraggiamento. Equazioni costitutive e grandezze fondamentali. Convezione naturale ed irraggiamento. Confronto tra termini convettivi e radianti. Il coefficiente di scambio convettivo. Valutazione dei termini di scambio convettivo e radiante in alcuni casi di interesse tecnico-pratico. La persona inserita all'interno di un ambiente. Il problema del tubo che trasporta vapore in un ambiente termostato.

Scambio termico per convezione. Convezione forzata in regime laminare. Esempi di sistemi con scambio termico in convezione forzata in regime laminare. Correlazioni per il numero di Nusselt. Esempio applicativo: il collettore solare con flusso termico imposto. Scambio termico tra fluidi in tubi cilindrici: equazione risolvibile.

Scambio termico in convezione forzata: richiamo delle principali correlazioni (Colburn, Dittus-Boelter, Sieder-Tate) ed applicazioni. Scambio termico tra fluidi con temperatura esterna costante: il caso del raffreddamento ed il caso del riscaldamento del fluido. Il concetto di "lunghezza caratteristica". Valutazioni numeriche. Gli scambiatori di calore: primi esempi e classificazioni.

Scambiatori di calore a miscelamento e loro rilevanza nell'energetica: il caso delle torri evaporative. Scambiatori di calore a rigenerazione: esempio concettuale di funzionamento. Scambiatori di calore a superficie. Classificazione di scambiatori di calore a superficie ed esempi. Casi di particolare interesse tecnico: gli scambiatori di calore a tubi e mantello (shell and tube) e gli scambiatori di calore a piastre (piane ed alettate). Indice di compattezza di scambiatori di calore a superficie.

Applicazione degli scambiatori di calore a miscelamento: la torre evaporativa ad umido. Valutazione della portata d'aria e della portata di acqua di reintegro basata su bilanci energetici. Calcolo termico di scambiatori di calore a superficie: il metodo della differenza di temperatura media logaritmica (LMTD). Applicazioni del metodo LMTD all'analisi di scambiatori di calore. Esempio applicativo e valutazioni numeriche.

Il calcolo termico degli scambiatori di calore: problema diretto e problema inverso. Metodo dell'efficienza ( $\epsilon$ -NTU) per il dimensionamento di scambiatori di calore. Definizione dei valori di efficienza di alcuni scambiatori. Utilizzazione del metodo dell'efficienza per il dimensionamento di uno scambiatore di calore e per la valutazione del funzionamento in condizioni operative diverse da quelle di progetto.

Scambiatori di calore con geometrie più complesse. Indice di compattezza di scambiatori di calore e diametro idraulico dei condotti. Il fouling negli scambiatori di calore. Dimensionamento di scambiatori di calore: il problema fluidodinamico. Analogia di Colburn e similitudine tra problema termico e problema fluidodinamico. Esempi applicativi e valutazioni numeriche sul fouling e sulle perdite di pressione.

Utilizzazione di scambiatori in impianti reali; scelta delle particolari tipologie da utilizzare e dimensionamento di massima: il caso di una rete di teleriscaldamento che utilizza vapore geotermico: scambiatore di calore di centrale, scambiatori di sottostazione e scambiatori di utenza. Analisi di un impianto cogenerativo basato su ciclo Brayton con due diverse tipologie di scambiatori di calore: uno scambiatore rigenerativo gas-gas ed un generatore di vapore gas-liquido (vapore).

Valutazioni numeriche sull'impianto cogenerativo distribuito nella lezione precedente. Differenze tra analisi di primo e di secondo principio. Analisi di alcuni dettagli impiantistici. Impianti per la produzione di potenza basati su cicli termodinamici: gli impianti nucleari di potenza. Analisi dello schema impiantistico di un impianto basato su tecnologia PWR.

Sviluppo dell'analisi dell'impianto nucleare PWR distribuito nella lezione precedente. Analisi del ciclo termodinamico e dimensionamento di



## UNIVERSITÀ DI PISA

massima dei componenti del generatore di vapore. Possibile efficientamento dell'impianto. Impianti a ciclo combinato: il ruolo del Generatore di Vapore a Recupero. Evoluzione tecnologica degli impianti a ciclo combinato con minimizzazione della perdita exergetica del generatore di vapore a recupero. Esempi di casi impiantistici.

Analisi e bilanci energetici di impianti a ciclo combinato con generatori di vapore a due ed a tre livelli di pressione a partire da schemi reali. Impianti termoelettrici alimentati a carbone e con oli combustibili. Analisi di tre diverse tipologie impiantistiche convenzionali: impianti a ciclo subcritico, impianti a ciclo supercritico convenzionale, impianti ipercritici. Tecnologie per la riduzione degli impatti ambientali di impianti con combustioni tradizionali. Impianti di piccola taglia basati su motore a combustione interna: esempio e dimensionamento di massima di un piccolo impianto cogenerativo con motore a combustione interna a ciclo Diesel.

Impianti per la cogenerazione (CHP). Esame dei vari schemi impiantistici a partire dall'esempio del motore a combustione interna con recupero termico. Configurazioni con schema a ciclo Rankine in contropressione. Configurazioni con schema a ciclo Rankine con spillamento di vapore. Configurazioni con turbina a gas e recupero.

Impianti di piccola taglia per la produzione di potenza elettrica finalizzati alla valorizzazione di risorse energetiche a medio-bassa entalpia: i sistemi ORC. Basi termodinamiche e fluidi operativi. Confronto tra le proprietà termofisiche di un fluido organico (R134a) ed acqua. Esempi. Il processo di liquefazione del gas naturale: valutazione della spesa energetica del processo. Il problema del recupero dell'energia nelle stazioni di rigassificazione.

Impianto per la produzione di potenza basato con separazione di vapore: sviluppo di un caso impiantistico reale in configurazione CHP. Calcolo dei rendimenti di primo e di secondo principio e considerazioni sulla possibile ottimizzazione del ciclo.

Usi diretti dell'energia geotermica. Sistemi con prelievo di fluido geotermico e sistemi senza prelievo di fluido. Sistemi con scambiatore monofase e sistemi bifase. Usi indiretti delle risorse geotermiche a bassa temperatura: le pompe di calore geotermiche (cenni). Recupero dell'energia "fredda", con produzione di potenza, associato ad un processo di rigassificazione del gas naturale liquefatto.

Utilizzazione energetica dell'energia solare. Classificazione dei possibili usi. Usi a bassa temperatura: i collettori solari piani. Struttura dei collettori solari piani. Perdite energetiche e rendimenti di funzionamento dei collettori solari piani.

Utilizzazione di collettori solari piani per la produzione di acqua calda per usi sanitari: dimensionamento e valutazione della produttività di uno specifico sistema. La concentrazione solare: collettori solari a media temperatura. Collettori parabolici lineari. Utilizzazioni dell'energia solare a temperature intermedie: esempio di un dissalatore di acqua.

Utilizzazione dell'energia solare per processi che richiedono energia termica a media temperatura: un impianto per la dissalazione solare in accoppiamento con un sistema di collettori parabolici lineari. Valutazioni generali e dimensionamento di massima di un sistema specifico.

Utilizzazione energetica delle biomasse: un impianto per la produzione combinata di potenza elettrica e termica alimentato con cippato di legno: analisi dello schema impiantistico.

Analisi di un impianto per la produzione di energia elettrica e termica basato su ciclo Rankine a spillamento di vapore alimentato con cippato di legno. Dalla risorsa eolica ai sistemi di conversione dell'energia eolica. Le velocità di massimo trasporto di energia. Le turbine eoliche. Curve caratteristiche delle turbine eoliche. Correlazione tra dimensione della turbina e potenza. Valutazioni numeriche.

Turbine eoliche. Curve caratteristiche. Coefficienti di prestazione. Velocità caratteristiche. Cenni sulle modalità di funzionamento dei profili alari. Valori caratteristici dei coefficienti di prestazione di diverse tipologie di turbine eoliche.

### Modalità d'esame

**Energetica I:** si fanno 2/3 domande. La prima consiste nello svolgimento di un breve esercizio, le altre due saranno a grandi linee una su una Fonte Fossile ed uno su una Fonte Rinnovabile. La durata complessiva, in via orientativa sarà di 45 minuti – 1 ora.

**Energetica I e II (Energetica Generale):** si fanno invece 3/4 domande che coprono a grandi linee le 4 tematiche del corso. La durata orientativa è di circa 1 ora e mezzo compresi i 45 minuti dell'esercizio. La prima domanda è in genere un esercizio un po' più articolato di quello relativo al modulo Energetica I (della durata di 30-45 minuti). Serve per capire la base di partenza del candidato e se ha approfondito o meno alcune questioni preliminari legate al corso (in definitiva quanto svolto nelle prime 6 settimane). L'esercizio viene svolto in autonomia. Le domande tendono a valutare soprattutto l'impostazione metodologica. Per quanto riguarda lo studio è più importante focalizzare l'attenzione sulle questioni di metodo piuttosto che sui dettagli e sugli aspetti di natura più descrittiva. In sede di esame, come peraltro fatto a lezione, può essere richiesto anche lo svolgimento di qualche conto (per cui può fare comodo una calcolatrice!).

Ultimo aggiornamento 21/10/2020 16:11