

# FISICA TECNICA E IMPIANTI TERMOTECNICI (Ing. EDILE – 9 CFU)

Prof. Enzo BOMBARDIERI

## PRESUPPOSTI DEL CORSO

Una proficua frequenza alle lezioni presuppone una buona conoscenza degli argomenti svolti nei **corsi di Analisi Matematica e Fisica - propedeutici** al corso - con particolare riferimento a:

- concetti base di meccanica (velocità, forza, quantità di moto, lavoro, energia, potenza, leggi principali della meccanica newtoniana);
- concetti di termodinamica applicata (lavoro, calore, 1° e 2° principio, calore specifico, bilanci di massa ed energia per sistemi chiusi e aperti, gas e liquidi perfetti);
- concetti di trasmissione del calore (conduzione, convezione, irraggiamento e relative leggi fondamentali);
- concetti base di meccanica dei fluidi (pressione, portata, bilancio di energie per sistemi fluenti, perdite di carico, macchine operatrici).

E' opportuno seguire il corso opzionale di Termofisica degli edifici in quanto per molti aspetti complementare alla seconda parte del corso (Impianti Termotecnici)

## SCOPO DEL CORSO

Al termine del corso gli studenti dovranno essere in grado di:

1. Effettuare una prima analisi relativamente alla scelta dell'impianto adeguato per una data tipologia edilizia, sapendo cogliere pregi e difetti delle soluzioni disponibili.
2. Calcolare i carichi termici estivi e invernali (anche con metodi semplificati) di un qualsiasi edificio civile o del terziario.
3. Per le tipologie impiantistiche più comuni, dare un dimensionamento di massima ed essere in grado di scegliere e designare i principali elementi (caldaia, gruppo frigorifero, pompe, tubazioni, unità terminali, centrali di trattamento aria, canalizzazioni dell'aria).
4. Stendere un primo lay-out o riservare, nella progettazione edilizia, gli spazi necessari ai componenti dell'impianto (centrali termiche, centrali frigorifere, canalizzazioni d'aria, ecc.).

## STRUTTURA E PROGRAMMA DEL CORSO

Il corso si compone di:

- **Lezioni (60 ore)**, in cui sono svolti argomenti teorici e accennati alcuni esempi numerici (sempre limitati al singolo argomento in questione).
- **Esercitazioni (30 ore)**, in cui, con l'assistenza del docente o di un suo incaricato, gli studenti s'impegnano, oltre che nell'applicazione di esercizi relativi alla parte teorica, nell'esecuzione di un progetto d'impianto (un impianto di riscaldamento tradizionale a radiatori o/e un impianto di condizionamento) al fine di sperimentare l'applicazione delle nozioni apprese a casi reali. **Lo svolgimento del progetto e la presentazione degli elaborati sono condizioni necessarie per l'ammissione all'orale dell'esame.**

## FONDAMENTI DI TERMODINAMICA TECNICA

### a) Il Sistema Termodinamico.

Unità di misura. Sistema Internazionale (Tab. CNR - UNI ISO 1000) - Sis. Tecnico e Anglosassone. Pareti e vincoli. Definizioni e misurabilità dell'energia interna. Il calore come modalità di scambio energetico. Il primo principio della termodinamica in forma estesa e in forma differenziale.

**b) Stati d'equilibrio.**

Grandezze di stato fisico e di percorso. Grandezze intensive ed estensive. Dipendenza del lavoro e del calore dal tipo di trasformazione termodinamica. I postulati entropici. Proprietà della relazione fondamentale. Processi reversibili e irreversibili. Trasformazioni quasistatiche. Equazione di Gibbs. Depositi quasistatici di calore e di lavoro. Il secondo principio della termodinamica (enunciati di Clausius e Kelvin). Le equazioni di stato fisico. Parametri caratterizzanti un sistema termodinamico ( $c_p$  e  $c_p^*$ ,  $c_v$  e  $c_v^*$ ,  $k_t$ ,  $\alpha$ ). Grandezze massiche e molari.

**c) Stabilità dell'equilibrio di un sistema monocomponente.**

Il potenziale chimico (cenni). La regola delle fasi. Transizioni di fase. Equazione di Clausius - Clapeyron in forma differenziale e finita.

## APPLICAZIONI

**d) Il gas ideale monocomponente.**

Equazioni di stato. Esperienza di Joule. Le capacità termiche molari (e massiche) a P e V costanti. Le trasformazioni a T, P, V costanti. La relazione di Mayer. La trasformazione adiabatica quasistatica e reale (rendimento isoentropico  $\eta_{is}$ ). L'entropia di un gas perfetto. Cenni sul comportamento dei gas reali.

**e) Miscela bifasiche.**

Vapore d'acqua. Principali trasformazioni del vapore d'acqua. Grandezze fondamentali ( $v_x$ ,  $h_x$ ,  $s_x$ ,  $u_x$ ). Titolo di vapore.

**f) I diagrammi di stato fisico.**

I diagrammi (p - T), (p - v), (T - s). Il diagramma di MOLLIER (h - s) per il vapore d'acqua. Processi e trasformazioni cicliche. Cicli diretti (orari o motori) e inversi (antiorari). Il ciclo frigorifero.

**g) Trasformazioni in un fluido con deflusso (cenni).**

Definizioni di regime stazionario.

**h) L'aria umida.**

Le grandezze fondamentali. Diagrammi psicrometrici dell'ASHRAE (o di Grosvenor) e di Mollier per l'aria umida. Le trasformazioni dell'aria umida. Temperatura di saturazione e temperatura di rugiada. Condizionamento estivo e invernale.

## FENOMENI DI TRASPORTO

**i) Il moto dei fluidi nei condotti.**

Il termine di degradazione energetica. Numero di Reynolds. Regimi di movimento di un liquido in un condotto (regimi: laminare, turbolento e di transizione). Bilancio di massa per i sistemi aperti (o fluenti). Bilancio di energie per sistemi fluenti (fluidi comprimibili e incomprimibili, teorema di Bernoulli). Perdite di carico continue e localizzate. Abaco di Moody. Formule di Darcy - Weisbach, di Chézy, di Colebrook, di Kutter e di Darcy. Fattore d'attrito. Sforzo tangenziale: legame con la velocità. Coefficienti di viscosità dinamica e cinematica. Profili di velocità. Potenza di una macchina idraulica operatrice (pompa). Calcolo delle prevalenze manometrica e totale di una pompa. Curve caratteristiche. Collegamenti in serie e in parallelo.

**l) Introduzione alla conduzione del calore**

Il postulato di Fourier. Il bilancio energetico in regime stazionario nel caso a simmetria piana: l'equazione di Fourier. La lastra piana; le pareti piane multistrato (con e senza generazione di potenza termica). Metodo dell'analogia elettrica. Il bilancio energetico nel caso di simmetria cilindrica. Il tubo isolato. Analogia elettrica. Il raggio critico.

La conduzione in regime variabile: numero di Biot, metodo delle capacità concentrate.

**m) Trasmissione del calore per irraggiamento**

Potere emissivo. Brillanza. Irradiazione. Grandezze monocromatiche e complessive. Il corpo nero: leggi di Planck, Stefan - Boltzmann, Wien. I coefficienti d'assorbimento, riflessione, trasmissione ed emissione. Legge di Kirchhoff. Il corpo grigio. Scambio di calore fra corpi neri: il fattore di forma. Schermi antiradianti.

**n) Trasmissione del calore per convezione.**

Coefficiente di trasmissione del calore per convezione. Legge di Newton. Resistenza termica complessiva. Calcolo del coefficiente convettivo: numeri adimensionali ( $Re$ ,  $Pr$ ,  $Nu$ ,  $Gr$ ), correlazioni.

**o) Scambiatori di calore.**

Definizioni e generalità. Bilancio energetico in condizioni stazionarie. Dimensionamento di massima di uno scambiatore di calore equicorrente, controcorrente, a flusso incrociato. Metodo del Numero delle Unità di Trasporto ( $\epsilon$ -NTU) e confronto fra i vari metodi di dimensionamento. Coefficiente "F" per gli scambiatori a flusso incrociato.

## TERMODINAMICA APPLICATA - IMPIANTISTICA

Sistemi termodinamici chiusi; scambi energetici: interazioni di tipo calore e lavoro. Energia interna e 1° Principio. Modello di gas perfetto e liquido perfetto: leggi costitutive e capacità termiche massiche e volumiche, trasformazioni termodinamiche e loro rappresentazione sui piani (p-v), (T-s), (h-s).

Sistemi aperti: concetti di portata (massica e volumetrica) e potenza (termica e meccanica), definizione d'entalpia, bilancio di massa e d'energia.

Cicli termodinamici diretti e inversi, 2° Principio, entropia, rappresentazione in coordinate (T-s).

Passaggi di stato: regola di Gibbs delle fasi, calore latente d'evaporazione/condensazione, liquefazione/solidificazione ecc.

## MOTO DEI FLUIDI ENTRO CONDOTTI

Pressione idrostatica. Flusso di un **fluido incompressibile** non viscoso: equazione di continuità e bilancio della quantità di moto (eq. di Bernoulli), uso delle due equazioni.

Fluidi viscosi newtoniani: viscosità, attrito alla parete, dissipazione viscosa, moto laminare e turbolento, numero di Reynolds, influenza della rugosità superficiale della parete.

Perdite di carico continue: diagramma di Moody e diagrammi d'uso pratico per tubazioni commerciali, perdite di carico localizzate, metodo del coefficiente di perdita localizzata e metodo della lunghezza equivalente. Cenni di simbologia idraulica.

Procedura pratica di dimensionamento di una tubazione; caratteristica del circuito (caratteristica resistente).

## MACCHINE A FLUIDO OPERATRICI

Nomenclatura: pompe, ventilatori, compressori. Bilancio energetico di una macchina operatrice, espressione del lavoro di pompaggio e della potenza richiesta dalla pompa, rendimento, curve caratteristiche.

Pompe: classificazione e curve caratteristiche tipiche, collegamento in serie ed in parallelo.

Ventilatori: classificazione e curve caratteristiche tipiche, campi d'impiego.

Compressori: descrizione schematica dei tipi principali (volumetrico e fluidodinamico) e loro campo d'impiego, lavoro isotermico, adiabatico e politropico; inter-refrigerazione, compressori multistadio.

## PSICROMETRIA E ARIA UMIDA

Miscela ideali di gas e vapori, pressione parziale, pressione (tensione) di vapore, aria umida, grandezze caratteristiche dell'aria umida ( $X$ ,  $\phi$ ,  $\xi$ ), grandezze termodinamiche (p, h), diagrammi dell'aria umida: diagramma di Mollier e di Grosvenor (Carrier - ASHRAE), definizione di temperature di bulbo umido e di temperature di rugiada.

Principali trasformazioni elementari dell'aria umida (miscelazione, riscaldamento sensibile, raffreddamento sensibile, raffreddamento con deumidificazione, umidificazione adiabatica, umidificazione a vapore), tipiche

trasformazioni combinate per il condizionamento invernale (miscela + preriscaldamento + umidificazione + postriscaldamento) e per il condizionamento estivo (miscela + raffreddamento + postriscaldamento).

## **IL CALCOLO TERMICO INVERNALE PER IMPIANTI DI SOLO RISCALDAMENTO**

Condizioni di progetto. Regime stazionario. Trasmissione del calore attraverso le strutture dell'edificio: pareti, solai, pavimenti, ecc. (con esempi). Ponti termici. Ventilazione naturale. Riscaldamento intermittente e messa a regime. Riscaldamento con totale rinnovo dell'aria. Umidificazione e sua influenza sul bilancio termico. Bilancio termico complessivo dell'edificio e bilancio del singolo locale. Definizione di grado-giorno e calcolo semplificato del fabbisogno energetico stagionale.

## **DISPOSIZIONI DI LEGGE: L. 373/76 - L. 10/91 – Aggiornamenti successivi**

Concetti generali ispiratori della legislazione vigente. Calcolo della potenza (UNI 7357): definizione di Cd, Cv, Cg e limiti. Progetto dell'impianto. Le limitazioni sull'energia (UNI 10344): definizione dei rendimenti di produzione, distribuzione, regolazione ed emissione, verifica del rendimento medio stagionale. Tubazioni per Impianti Termici. Isolamento delle tubazioni.

## **IL CALCOLO TERMICO ESTIVO**

Condizioni esterne di progetto. Variazione delle condizioni durante la giornata. Bilancio energetico dell'ambiente condizionato: carichi termici sensibili e latenti, scopo del calcolo termico estivo. Radiazione solare attraverso il vetro; definizione di SHG e uso delle relative tabelle, fattori d'accumulo, schermi, ombre portate. Trasmissione del calore attraverso muri e tetti, irradiati e non; definizione di CLTD e uso delle relative tabelle. Infiltrazioni d'aria. Carichi termici interni. Fattori vari, perdite. Determinazione delle condizioni dell'aria da immettere nell'ambiente, portata d'aria esterna e condizioni dell'aria in ingresso ai trattamenti; bilanci e fabbisogni energetici relativi ai singoli trattamenti. Esempi.

## **LA PRODUZIONE DEL CALORE 1**

Fluido termovettore. Combustibili; metano, gas di rete, GPL, gasolio, olio combustibile. Bilancio energetico di una caldaia. Parti costituenti una caldaia per la produzione d'acqua calda. Tipi di caldaie: caldaie autonome (e relativa classificazione), caldaie di media potenza a tubi di fumo, caldaie di grossa potenza e a vapore (solo cenno). Bruciatori atmosferici e ad aria soffiata. Camini e norme relative. Installazione di caldaie autonome e norme relative.

## **PRODUZIONE DEL CALORE 2**

Centrali termiche a gas per la produzione di acqua calda di potenza superiore a 35 kW: normative ISPESL (raccolta "R" D.M. 1.12.75). Dispositivi di controllo e di sicurezza: termostato di blocco, termostato d'esercizio, pressostato di blocco, valvola d'intercettazione combustibile, valvola di sicurezza, vasi d'espansione, ecc. Analisi dello schema esecutivo di una centrale termica.

## **PRODUZIONE DEL FREDDO 1**

Ciclo termodinamico inverso (frigorifero): bilanci energetici. Definizione di COP. Macchine frigorifere e pompe di calore.

Ciclo frigorifero a compressione: realizzazione, fluidi frigoriferi d'uso comune, rappresentazione del ciclo sul piano (p - h), considerazioni energetiche. Centrale frigorifera, con compressore bistadio, funzionante con R 134a.

## **PRODUZIONE DEL FREDDO 2**

Macchine frigorifere utilizzate nella pratica del condizionamento dell'aria: classificazione e parametri tipici di prestazione. Descrizione e analisi dei principali componenti, linee guida per la scelta. Accorgimenti per l'installazione: parzializzazione, accumulo del freddo, portate d'acqua. Scelta del fluido condensante (aria, acqua a perdere, acqua di torre), cenni sulle torri di raffreddamento.

Cenni sulle macchine frigorifere ad assorbimento.

## **IMPIANTO DI RISCALDAMENTO AUTONOMO A RADIATORI**

Radiatori in ghisa, in alluminio, in acciaio: descrizione e generalità. Emissione termica nominale secondo UNI 6514.

Procedura di dimensionamento dell'impianto: scelta dei radiatori, determinazione delle portate d'acqua, calcolo della rete di distribuzione (scelta dei percorsi e dei diametri delle tubazioni, scelta o verifica della pompa tramite il calcolo delle perdite di carico); accessori (valvole, saracinesche, termostati e cronotermostati, valvole termostatiche).

## **IMPIANTO INVERNALE / ESTIVO A TERMOCONVETTORI**

Ventilconvettori: classificazione, generalità, parametri di funzionamento, scelta.

Procedura di dimensionamento dell'impianto: metodo di scelta dei ventilconvettori, determinazione delle portate d'acqua (estive e invernali), scelta dello schema d'impianto e calcolo della rete di distribuzione (diametri delle tubazioni, scelta delle pompe), calcolo e scelta degli accessori.

## **IMPIANTO A TUTTA ARIA 1**

Schema d'impianto a tutta aria, generalità, bilanci di massa e bilanci energetici, aria di ripresa, aria di rinnovo, aria di ricircolo, aria d'espulsione, pressione relativa degli ambienti.

Le unità di trattamento centralizzato dell'aria: scelta dei trattamenti, descrizione dei dispositivi componenti (serrande, filtri, batterie di scambio termico, umidificatori ad acqua e a vapore, ventilatori).

## **IMPIANTI A TUTTA ARIA 2**

I canali di distribuzione dell'aria: cenni sui metodi di dimensionamento e particolarità costruttive.

Cenni sulle problematiche connesse alla diffusione dell'aria negli ambienti, le unità di immissione dell'aria trattata (bocchette, anemostati, griglie, ecc.).

## **ALTRE TIPOLOGIE DI IMPIANTO**

Impianti ad aria primaria e ventilconvettori, impianti a pannelli radianti, termoconvettori, tubi alettati. Condizionatori autonomi ad armadio, "split -system".

## **IMPIANTI INDUSTRIALI (CENNI)**

Problematiche tipiche del riscaldamento industriale. Stratificazione dell'aria. Infiltrazioni ed effetto camino. Riscaldamento con aerotermi, termostrisce, generatori d'aria calda. Termoventilazione. Ventilazione estiva. Raffrescamento adiabatico.

## **REGOLAZIONE AUTOMATICA (CENNI)**

Regolazione on-off: termostati, umidostati, pressostati. Concetto di differenziale.

Regolazione modulante di scambiatori di calore: per variazione di portata e per variazione di temperatura sul primario o sul secondario. Acqua: valvole deviatrici e miscelatrici, aria, serrande.

Regolatori pneumatici, elettrici, elettronici (analogici e digitali). Azione proporzionale (P), azione proporzionale + integrale (PI), azione proporzionale + integrale + derivativa (PID).

## **SCHEMI FUNZIONALI DI IMPIANTO**

Descrizione e analisi d'alcuni schemi funzionali caratteristici d'impianto.

## BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

### Per la parte di Fisica Tecnica:

- *Fisica tecnica. Termodinamica e trasmissione del calore*, Giambelli; Ed. Clup, Milano.
- *Fisica tecnica. Esercizi*, Giambelli - Magli; Ed. Clup, Milano.
- *Termodinamica e trasmissione del calore*, Y.A. Cengel; McGraw -Hill Libri Italia S.r.l. Editore, Milano.
- *Introduzione alla termodinamica tecnica*, Pedrocchi -Silvestri; Ed. Città Studi, Milano.
- *Introduzione ai fenomeni di trasporto*, Pedrocchi - Silvestri; Ed. Città Studi, Milano.
- *Esercizi di termodinamica*, Bianchi - Sturlese; Ed. Clup, Milano.
- *Problemi di trasmissione del calore*, Bettanini - De Ponte; Patron Ed., Bologna.

**N.B.:** per alcune parti del programma saranno fornite, a cura del Docente, dispense e alcune esercitazioni per la preparazione alla prova scritta. Per la parte di programma relativa alle *Trasformazioni termodinamiche* e ad *Elementi di fluidodinamica* si può fare riferimento all'ultima parte del testo: "*Meccanica e Macchine*", Enzo BOMBARDIERI, Cappelli Editore, Bologna.

### Per la parte di Impianti Termotecnici:

Dispense ed esercitazioni fornite dal Docente (e disponibili presso il Centro Stampa).

Pubblicazione AERMEC: elementi di termoventilazione e condizionamento. (\*)

Pubblicazione AERMEC: introduzione al condizionamento dell'aria. (\*)

C. Pizzetti: "Condizionamento dell'aria e refrigerazione" (2 volumi) - Ed. Tamburini - Masson - 3a ed.

Dall'O' - Palmizi: Impianti di riscaldamento - Ed. CLUP.

L. Agnoletto - P. Romagnoli - O. Saro: Legge 10/91 - Guida agli adempimenti per la progettazione edile ed impiantistica. Edizioni PEG.

Rumor - Strohmenger: Riscaldamento, Ventilazione, Condizionamento, Ricupero energetico, Impianti sanitari - Ed. HOEPLI.

Nicola Rossi: Manuale del Termotecnico - Ed. HOEPLI.

(\*) Non protocollati ma disponibili all'uso temporaneo presso la biblioteca.

## MODALITÀ D'ESAME

L'esame consta di una prova scritta e di una prova orale che devono essere sostenute nel medesimo appello.

## PRECEDENZE D'ESAME: ANALISI MATEMATICA e FISICA.

**N. B.:** Durante lo svolgimento del Corso, previo accordo all'inizio dell'insegnamento, si possono effettuare n° 2 prove scritte al termine, rispettivamente, del punto (h) la **prima prova** e al termine del Corso la **seconda prova**. Il superamento delle **due** prove consente al Candidato di accedere **direttamente** all'esame **orale**.

### L'esame prevede, inoltre:

- Consegna degli **elaborati** relativi all'attività di **IMPIANTI TERMOTECNICI** (almeno una settimana prima della data d'esame).

**Prof. Enzo BOMBARDIERI**