

## **Programma di Macchine per Allievi Ingegneri Chimici** **Anno Accademico 2025-26**

Testo di riferimento

Renato della Volpe, *Macchine*, Liguori Editore, 2011, ISBN-13 978-88-207-4972-9

Nel programma che segue vengono riportati i paragrafi del testo di riferimento relativi agli argomenti elencati. I contenuti di tali paragrafi sono indicativi e possono risultare talora sovrabbondanti, talora non esaustivi rispetto a quanto esposto durante il corso. Gli argomenti non espressamente associati ad un paragrafo sono trattati nella bibliografia riportata in calce a questo programma.

### **1. Introduzione.**

- 1.1. Macchine e Impianti.
- 1.2. Macchine motrici.
- 1.3. Macchine operatrici.
- 1.4. Impianti motore.
- 1.5. Impianti operatore.
- 1.6. Principio di conservazione dell'energia.
- 1.7. Sistemi aperti e sistemi chiusi.
- 1.8. Il volume di controllo.

### **2. Energia e fabbisogno energetico.**

- |  |     |
|--|-----|
| 2.1. Energia Termica.  | I.1 |
| 2.2. Energia Meccanica.                                      | I.1 |
| 2.3. Il fabbisogno energetico nel processo industriale.      | I.2 |
| 2.4. Fabbisogno energetico nazionale.                        |     |
| 2.5. Fabbisogno energetico mondiale.                         |     |
| 2.6. La tonnellata equivalente di petrolio.                  |     |
| 2.7. Combustibili fossili; carbone, petrolio e gas naturale. |     |
| 2.8. Impatto ambientale.                                     |     |
| 2.9. Fonti rinnovabili.                                      |     |
| 2.10. Il risparmio energetico.                               |     |

### **3. Richiami di termodinamica applicata.**

- 3.1. Primo principio per un sistema aperto.
- 3.2. La funzione entalpia.
- 3.3. Convenzione di Clausius.
- 3.4. Equazioni del Gibbs.
- 3.5. Secondo principio.
- 3.6. Forma meccanica dell'equazione dell'energia.
- 3.7. Le trasformazioni di adduzione e sottrazione del calore.
- 3.8. Le trasformazioni di compressione ed espansione.
- 3.9. Trasformazioni reversibili e reali.
- 3.10. Il piano del lavoro.
- 3.11. Lavoro di pulsione e differenze  $pdv$  e  $vdp$ .
- 3.12. Applicazioni al caso della compressione e dell'espansione.
- 3.13. La trasformazione politropica.
- 3.14. Le trasformazioni elementari.
- 3.15. Calcolo degli esponenti e dei calori specifici.

3.16.	Rappresentazione nei piani termodinamici.	
3.17.	Il lavoro della trasformazione politropica.	
3.18.	Esempi numerici.	
3.19.	Enunciati di primo e secondo principio.	
3.20.	Perpetui mobili di prima e seconda specie.	
3.21.	Trasferimenti di calore tra sistema e ambiente.	II.1
3.22.	Concetto di qualità dell'energia.	II.2
3.23.	La trasformazione ciclica.	II.2
3.24.	Concetto di lavoro utile e rendimento di un ciclo diretto.	II.2
3.25.	Il ciclo di Carnot.	II.3
3.26.	Calcolo del lavoro utile e del rendimento di un ciclo di Carnot.	
3.27.	Rappresentazione nei piani termodinamici.	
3.28.	Esempi numerici.	
3.29.	Limiti del ciclo di Carnot.	II.4
3.30.	Le temperature medie di adduzione sottrazione del calore.	II.5
3.31.	La temperatura adiabatica di fiamma.	
3.32.	Cicli reversibili e reali.	
3.33.	Concetto di irreversibilità interna ed esterna.	
3.34.	Esempi numerici.	
3.35.	La perdita di lavoro.	
3.36.	Analisi nei piani entropici.	
<b>4.</b>	<b>Impianti motore termici.</b>	<b>IV.15</b>
4.1.	La combustione negli IMT.	IV.15
4.1.1.	Combustione esterna ed interna al fluido motore.	IV.15
4.1.2.	Effetti del rapporto aria combustibile.	
4.1.3.	Combustibili solidi, liquidi e gassosi.	
4.2.	Rendimento globale di un impianto motore primo termico.	IV.15
4.3.	Il consumo specifico di calore.	IV.15
4.4.	Il consumo specifico di combustibile.	IV.15
4.5.	Esempi numerici.	IV.15
4.6.	La catena dei rendimenti.	IV.15
4.7.	Il rendimento di combustione.	IV.15
4.8.	Il rendimento reale.	IV.15
4.9.	Il rendimento meccanico.	IV.15
4.10.	Il grado di perfezionamento dell'impianto.	IV.15
4.11.	La catena delle perdite.	
4.12.	Le perdite di combustione.	IV.15
4.13.	Combustione interna ed esterna al fluido motore.	IV.15
4.14.	Effetti del rapporto aria combustibile.	IV.15
4.15.	Combustibili solidi, liquidi e gassosi.	IV.15
4.16.	Le perdite di ciclo e la potenza termica scaricata nell'ambiente esterno.	IV.15
4.17.	Le perdite meccaniche.	IV.15
4.18.	Gli ausiliari.	IV.15
4.19.	Diagramma del Sankey.	
4.20.	Esempi numerici.	
4.21.	Classificazione degli IMT.	
4.22.	Analisi tecnico economica di un IMT.	
4.23.	Costo di impianto, di esercizio e totale.	
4.24.	La manutenzione ordinaria e straordinaria.	
4.25.	Il costo unitario di impianto.	

<b>5. Impianti motore con turbina a vapore.</b>	<b>V</b>
5.1. Generalità e definizioni.	V.1
5.2. Schema di principio e ciclo termodinamico di riferimento.	V.1
5.3. Impianto a circuito aperto.	
5.4. Il ciclo a vapore saturo di Rankine.	V.2
5.5. Rappresentazione nei piani entropici.	V.2
5.6. Le trasformazioni del ciclo di Rankine.	V.2
5.7. Calcolo delle prestazioni: lavoro utile e rendimento.	V.2
5.8. Effetti della pressione massima sul lavoro utile e rendimento del ciclo.	V.2
5.9. Esercitazione: analisi cicli di Rankine aperti al variare della pressione di esercizio.	
5.10. Concetto di temperatura media di adduzione e sottrazione del calore.	
5.11. Impianti a circuito chiuso.	
5.12. Il condensatore: generalità e definizioni.	V.2.2
5.13. Tipologie e principio di funzionamento.	V.2.2
5.14. Bilancio termico e profili di temperatura.	V.2.2
5.15. Effetto della temperatura del fluido refrigerante in ingresso al condensatore, della sua portata e della superficie di scambio.	V.2.2
5.16. Effetti della pressione minima sul lavoro utile e rendimento del ciclo.	
5.17. Esercitazione: calcolo del lavoro utile e del rendimento di un ciclo di Rankine chiuso e confronto con un impianto a circuito aperto.	
5.18. Il ciclo a vapore surriscaldato di Hirn.	V.2
5.19. Rappresentazione nei piani entropici.	V.2
5.20. Le trasformazioni nel ciclo di Hirn.	V.2
5.21. Calcolo delle prestazioni: lavoro utile e rendimento.	V.2
5.22. Il ciclo limite quale unione di cicli parziali.	
5.23. Il rendimento in termini dei rendimenti dei cicli parziali.	
5.24. Esercitazione: confronto ciclo di Rankine ed Hirn a pari pressione minima e massima. Calcolo delle prestazioni dei cicli parziali.	
5.25. Il surriscaldamento ripetuto. Schema di principio e rappresentazione nei piani entropici.	V.2
5.26. Lavoro utile e rendimento.	V.2
5.27. Vantaggi e svantaggi e limiti di applicabilità.	V.2
5.28. Esercitazione: confronto ciclo di Hirn con semplice e doppio surriscaldamento. Calcolo delle prestazioni dei cicli parziali.	
5.29. Limiti del ciclo semplice.	
5.30. Il ciclo rigenerato: generalità e definizioni.	V.2.1
5.31. La trasformazione iso-diabatica e lo spillamento del vapore.	
5.32. Il bilancio termico al rigeneratore.	V.2.1
5.33. Analisi dei profili di temperatura.	
5.34. Effetto della portata di vapore spillato e della superficie di scambio sui profili termici.	
5.35. Lavoro utile e calore addotto in presenza di spillamenti.	V.2.1
5.36. Effetto della portata di vapore e della qualità del vapore spillato sul lavoro utile e sul rendimento del ciclo limite rigenerato.	
5.37. Il fattore di miglioramento. Effetto Clausius ed effetto Carnot.	V.2.1
5.38. Schema a due e più spillamenti di vapore.	
5.39. Il pre-riscaldatore d'aria.	V.2.1
5.40. Il ciclo reale negli impianti a vapore.	
5.41. Il rendimento interno di pompa e turbina.	

5.42.	Le perdite interne dei fasci tubieri.	
5.43.	Concetto di rendimento interno di impianto con riferimento alle inefficienze dei componenti primari.	
5.44.	Esercitazione: calcolo del rendimento interno di un impianto di media potenza.	
5.45.	La potenza della turbina a vapore in presenza di spillamenti rigenerativi.	
5.46.	Espressioni riferite alla portata al condensatore e al generatore di vapore.	
5.47.	Esercitazione: calcolo delle prestazioni di un ciclo a vapore surriscaldato in presenza di un singolo spillamento di vapore surriscaldato.	
5.48.	Il consumo specifico di vapore.	
5.49.	Esempi numerici.	
5.50.	Condensatori e torri evaporative.	V.2.2
5.51.	Esercitazione: calcolo della portata di fluido refrigerante di un impianto di grande potenza.	
5.52.	Il degassaggio chimico e fisico.	
5.53.	Principio di funzionamento di un degassatore.	V.2.1
5.54.	Schemi di componente.	
5.55.	Impianto a vapore da 320 MW.	
5.56.	Analisi di dettaglio dell'impianto e dei componenti.	
5.57.	Diagrammi caratteristici.	
<b>6.</b>	<b>Generatori di vapore.</b>	<b>VI</b>
6.1.	Generalità e definizioni.	VI.1
6.2.	Classificazione.	
6.3.	La caldaia a grande corpo.	VI.2
6.4.	La caldaia a tubi di fumo a fiamma diretta e a ritorno di fiamma.	VI.2
6.5.	La caldaia a tubi d'acqua.	VI.3
6.6.	I circuiti dell'acqua: economizzatore, vaporizzatore e surriscaldatore.	VI.3
6.7.	Lo scambio termico.	
6.8.	La temperatura della parete.	
6.9.	La disposizione dei corpi e i profili di temperatura.	
6.10.	La circolazione naturale nelle caldaie a tubi d'acqua.	VI.3
6.11.	Cifra di circolazione e forza spingente.	VI.3
6.12.	Disposizione del fascio tubiero vaporizzatore: sub-orizzontale, sub-verticale, verticale.	VI.3
6.13.	Limiti della circolazione naturale.	VI.3
6.14.	Il <i>film boiling</i> e il DNB.	VI.3
6.15.	La circolazione assistita.	VI.3
6.16.	Caldaie mono-tubolari.	VI.4
6.17.	Il circuito dell'aria.	
6.18.	Il circuito dei fumi.	
6.19.	Il circuito dell'acqua.	VI.5
6.20.	Il pre-riscaldatore d'aria.	VI.5
6.21.	Pre-riscaldatori statici e rigenerativi.	VI.5
6.22.	Il tiraggio.	VI.6
6.23.	Tiraggio naturale e meccanico.	VI.6
6.24.	Tiraggio forzato, indotto e bilanciato.	VI.6
6.25.	La distribuzione delle pressioni nel circuito aria-fumi.	
6.26.	Rendimento di un generatore di vapore.	VI.7
6.27.	Bilancio di primo principio.	
6.28.	La misura del rendimento: metodo diretto, metodo indiretto.	VI.7

<b>7. Analisi della compressione e dell'espansione.</b>	IV
7.1. Generalità e definizioni.	IV.1
7.2. Analisi della compressione adiabatica reversibile.	IV.2
7.3. Rappresentazione dei piani termodinamici $p-v$ , $T-s$ e $h-s$ .	IV.2
7.4. Calcolo del lavoro reversibile di compressione via $dh$ e $vdp$ .	IV.2
7.5. La compressione politropica con adduzione di calore.	IV.2
7.6. Rappresentazione dei piani termodinamici $p-v$ , $T-s$ e $h-s$ .	IV.2
7.7. Calcolo del calore addotto e del lavoro di compressione.	IV.2
7.8. La compressione adiabatica reale.	IV.3
7.9. Rappresentazione dei piani termodinamici $p-v$ , $T-s$ e $h-s$ .	IV.3
7.10. Espressioni del lavoro reale.	IV.3
7.11. Forma meccanica dell'equazione dell'energia e lavoro di attrito.	IV.3
7.12. La politropica equivalente e il calore di irreversibilità.	IV.4
7.13. Calcolo della variazione entropica nella politropica reversibile e nella adiabatica reale.	IV.4
7.14. Confronto tra le due trasformazioni.	IV.4
7.15. Il rendimento adiabatico di compressione.	IV.5
7.16. Espressioni ed andamenti funzionali.	IV.5
7.17. Analisi delle perdite.	
7.18. Concetto di contro-recupero e rappresentazione nei piani termodinamici.	IV.4
7.19. Il rendimento politropico di compressione	IV.6
7.20. Analisi delle perdite.	
7.21. Confronto con il rendimento adiabatico.	IV.7
7.22. Esempi numerici.	IV.14
7.23. Analisi della espansione adiabatica reversibile.	IV.8
7.24. Rappresentazione dei piani termodinamici $p-v$ , $T-s$ e $h-s$ .	IV.8
7.25. Calcolo del lavoro reversibile di espansione via $dh$ e $vdp$ .	IV.8
7.26. La espansione politropica con adduzione di calore.	IV.8
7.27. Rappresentazione dei piani termodinamici $p-v$ , $T-s$ e $h-s$ .	IV.8
7.28. Calcolo del calore addotto e del lavoro di espansione.	IV.8
7.29. La espansione adiabatica reale.	IV.9
7.30. Rappresentazione dei piani termodinamici $p-v$ , $T-s$ e $h-s$ .	IV.9
7.31. Espressioni del lavoro reale.	
7.32. Forma meccanica dell'equazione dell'energia e lavoro di attrito.	
7.33. La politropica equivalente e il calore di irreversibilità.	IV.9
7.34. Calcolo della variazione entropica nella politropica reversibile e nella adiabatica reale.	IV.9
7.35. Confronto tra le due trasformazioni.	IV.9
7.36. Il rendimento adiabatico di espansione.	IV.10
7.37. Espressioni ed andamenti funzionali.	IV.10
7.38. Analisi delle perdite.	
7.39. Concetto di recupero e rappresentazione nei piani termodinamici.	IV.10
7.40. Il rendimento politropico di espansione.	IV.11
7.41. Analisi delle perdite.	IV.12
7.42. Confronto con il rendimento adiabatico.	IV.13
7.43. Esempi numerici.	IV.14
7.44. Esercitazione: equilibrio di linea d'asse turbina-compressore.	
<b>8. Impianti Motore con Turbina a Gas.</b>	VII
8.1. Generalità, definizioni e schemi di impianto.	VII.1

8.2.	Circuito aperto e chiuso.	VII.1
8.3.	Il ciclo di Brayton-Joule.	VII.2
8.4.	Analisi nei piani entropici.	VII.2
8.5.	Calcolo del lavoro utile e del rendimento del ciclo ideale.	VII.2
8.6.	Condizioni di massimo lavoro utile e di massimo rendimento.	VII.2
8.7.	Cicli termodinamici rilevanti.	VII.2
8.8.	Il ciclo limite di Joule.	
8.9.	Il ciclo reale di Joule.	VII.3
8.10.	Espressioni del lavoro utile e del rendimento.	VII.3
8.11.	Condizioni di massimo lavoro utile e di massimo rendimento.	VII.3
8.12.	Effetto della temperatura massima e della efficienza delle macchine.	VII.3
8.13.	Andamenti funzionali parametrizzati nelle variabili di prestazione.	VII.3
8.14.	La camera di combustione; caratteristiche operative.	VII.7
8.15.	Il bilancio termico sulla camera di combustione.	
8.16.	Il controllo della temperatura di ingresso in turbina.	VII.7
8.17.	Relazioni tra il rapporto di miscela e la temperatura di ingresso in turbina.	
8.18.	Espressioni della potenza reale.	
8.19.	La compressione del combustibile.	
8.20.	La condizione di ciclica nel ciclo reale. Implicazioni.	
8.21.	La rigenerazione nel ciclo ideale di Joule.	VII.4.1
8.22.	Schema dell'impianto e ciclo di riferimento.	VII.4.1
8.23.	Analisi del calore di rigenerazione e profili di temperatura.	VII.4.1
8.24.	Effetto del rapporto di compressione sul margine di recupero termico.	VII.4.1
8.25.	La condizione limite.	VII.4.1
8.26.	Espressioni del rendimento.	VII.4.1
8.27.	Dipendenze funzionali dal rapporto di compressione e dalla temperatura di ingresso in turbina.	VII.4.1
8.28.	La rigenerazione nel ciclo di Joule reale.	VII.4.1
8.29.	Ciclo di riferimento.	VII.4.1
8.30.	Il grado di rigenerazione e i profili di temperatura al rigeneratore.	VII.4.1
8.31.	Analisi del rendimento.	VII.4.1
8.32.	Confronto caso ideale e reale.	VII.4.1
8.33.	Le condizioni di massimo rendimento.	VII.4.1
8.34.	La compressione inter-refrigerata: generalità, definizioni e schemi di impianto.	VII.4.2
8.35.	Analisi del ciclo reale.	VII.4.2
8.36.	Espressioni del lavoro utile e condizioni del suo massimo incremento.	VII.4.2
8.37.	Analisi nel piano T-s.	VII.4.2
8.38.	Espressioni del rendimento.	VII.4.2
8.39.	Condizioni per la positività del fattore di miglioramento.	VII.4.2
8.40.	Confronto condizioni di massimo lavoro utile e massimo rendimento.	VII.4.2
8.41.	Caso reversibile.	VII.4.4
8.42.	Esempio numerico.	
8.43.	Il riscaldamento ripetuto: generalità, definizioni e schemi di impianto.	VII.4.3
8.44.	Analisi del ciclo reale.	VII.4.3
8.45.	Espressioni del lavoro utile e condizione del suo massimo incremento.	VII.4.3
8.46.	Analisi nel piano T-s.	VII.4.3
8.47.	Espressioni del rendimento.	VII.4.3
8.48.	Condizioni per la positività del fattore di miglioramento.	VII.4.3
8.49.	Confronto condizioni di massimo lavoro utile e massimo rendimento.	VII.4.3
8.50.	Caso reversibile.	VII.4.4

8.51.	Simultanea applicazione della inter-refrigerazione e del riscaldamento ripetuto.	VII.4.5
8.52.	Esercitazione: impianto motore con turbina a gas, calcolo della potenza reale e del rendimento. Applicazione della compressione inter-refrigerata.	
<b>9.</b>	<b>Impianti Motore Termici a Ciclo Combinato Gas-Vapore.</b>	VII.10
9.1.	Generalità, definizioni e schemi di impianto.	VII.10
9.2.	Analisi del ciclo nei piani entropici.	VII.10
9.3.	Condizioni per l'applicabilità della tecnica.	VII.10
9.4.	Sostenibilità e vantaggi.	VII.10
9.5.	La caldaia a recupero e l'efficienza del recupero termico.	
9.6.	Esempi numerici.	
9.7.	Il bilancio di potenza nella caldaia a recupero e i profili termici.	VII.10.2
9.8.	Condizioni di <i>pinch-point</i> .	VII.10.2
9.9.	La temperatura dei gas al camino.	VII.10.2
9.10.	Relazione con la portata di vapore producibile e suo impatto sulla efficienza del ciclo sottoposto.	
9.11.	Limiti dell'impianto a singolo livello di pressione.	VII.10.2
9.12.	Impianti a due o più livelli di pressione.	VII.10.2
9.13.	Schemi di impianto.	VII.10.2
9.14.	Il rendimento del ciclo combinato <i>unfired</i> .	VII.10
9.15.	Espressioni del rendimento in funzione dei parametri di prestazione.	
9.16.	Effetti delle efficienze dei due impianti sul ciclo combinato.	
9.17.	Sistemi <i>fired</i> .	VII.10.3
9.18.	Il rendimento del ciclo combinato <i>fired</i> .	
9.19.	Confronto con il ciclo <i>unfired</i> .	
9.20.	Esempi costruttivi con integrazione di combustibile.	
9.21.	Esercitazione: impianto a ciclo combinato di tipo <i>unfired</i> e <i>fired</i> . Calcolo delle prestazioni.	
<b>10.</b>	<b>Motori a Combustione Interna Alternativi.</b>	VIII
10.1.	Generalità, definizioni e schemi di impianto.	VIII.1
10.2.	Il motore a due e a quattro tempi.	VIII.1
10.3.	Il motore ad accensione comandata e per compressione.	VIII.1
10.4.	Elementi costitutivi.	VIII.1
10.5.	Cilindrata e rapporto volumetrico di compressione.	VIII.1
10.6.	Cicli reversibili di riferimento: ciclo Otto, Diesel e Sabathè.	VIII.2
10.7.	Rappresentazione nei piani termodinamici.	VIII.2
10.8.	Le fasi di riferimento.	VIII.2
10.9.	Espressioni del lavoro utile e del rendimento.	VIII.2
10.10.	Confronto ciclo ideale, limite e reale presunto.	
10.11.	Il ciclo indicato di un motore a quattro tempi.	VIII.3
10.12.	Rappresentazione nei piani p-V e p-theta.	VIII.3
10.13.	La distribuzione delle fasi; confronto con il caso reversibile.	VIII.3
10.14.	Lavoro indicato, attivo e passivo.	VIII.5
10.15.	Potenza indicata e pressione media indicata.	VIII.5
10.16.	Potenza asse e pressione media effettiva.	VIII.5
10.17.	Il motore a due tempi.	VIII.4
10.18.	Generalità, definizioni e schemi di impianto.	VIII.4
10.19.	Il ciclo reale e le problematiche di lavaggio.	VIII.4
10.20.	Il diagramma indicato di un motore a due tempi	

10.21.	Confronto tra il motore a due e quattro tempi.	VIII.4
10.22.	Elementi di combustione pre-miscelata e diffusiva.	VIII.5
10.23.	Limiti di infiammabilità; tempo di incubazione e numero di ottano.	VIII.8
10.24.	Numero di cetano.	VIII.9
10.25.	Velocità di combustione e andamenti dei ratei di combustione.	
10.26.	Espressioni della potenza.	VIII.5
10.27.	Curve di potenza.	VIII.5
10.28.	La coppia motrice; curve di coppia.	VIII.5
10.29.	Il coefficiente di riempimento.	VIII.5
10.30.	Effetti inerziali nei collettori di aspirazione.	VIII.5
10.31.	Dipendenza dal numero di giri del coefficiente di riempimento.	VIII.5
10.32.	Relazione con la pressione media effettiva.	
10.33.	Esempi di curve di potenza e di coppia.	VIII.6
10.34.	Relazioni coppia, pme e coefficiente di riempimento.	VIII.6
10.35.	Piani quotati.	VIII.7
10.36.	Sistemi di alimentazione del combustibile nei motori ad accensione comandata.	VIII.10
10.37.	Il carburatore elementare.	VIII.10
10.38.	Sistemi di alimentazione del combustibile nei motori ad accensione per compressione.	VIII.12
10.39.	L'iniezione meccanica con pompa Bosch.	VIII.12.1
10.40.	Il polverizzatore.	VIII.12.1
10.41.	Esempi costruttivi.	VIII.12.2
10.42.	L'iniezione nei motori benzina.	VIII.11
10.43.	Cenni sulla sovralimentazione.	VIII.14
10.44.	Esercitazione: calcolo del ciclo reversibile di Otto e Diesel.	
<b>11.</b>	<b>Sistemi per la Produzione Combinata di Energia Meccanica e Termica.</b>	<b>IX</b>
11.1.	Generalità e definizioni.	IX.1
11.2.	L'indice di sfruttamento del combustibile nel caso di produzione separata e cogenerativa.	IX.1
11.3.	Il rapporto calore-lavoro; intervalli di interesse.	
11.4.	Sistemi cogenerativi con impianto motore termico con turbina a gas.	IX.2.1
11.5.	Schemi di principio e rappresentazioni nei piani entropici.	
11.6.	Esercitazione: calcolo degli indici di prestazione di un sistema cogenerativo con turbina a gas.	
11.7.	Sistemi cogenerativi con impianto motore termico con turbina a vapore.	IX.2.2
11.8.	Sistemi a contro-pressione e derivazione e condensazione.	IX.2.2
11.9.	Schemi di principio e rappresentazioni nei piani entropici.	IX.2.2
11.10.	Esercitazione: calcolo degli indici di prestazione di un impianto cogenerativo con turbina a vapore a contro-pressione.	
11.11.	Sistemi cogenerativi con motore alternativo a combustione interna.	IX.2.4
11.12.	Schemi di principio.	IX.2.4
11.13.	Confronto sistemi cogenerativi con motore ad accensione comandata e per compressione.	IX.2.4
11.14.	Panoramica dei sistemi cogenerativi in relazione ai parametri di merito	
<b>12.</b>	<b>La Trasmissione del Lavoro nelle Macchine.</b>	<b>III</b>
12.1.	Classificazione definizioni ed esempi costruttivi.	III.1
12.2.	Concetto di stadio di operatrice e motrice dinamica.	III.3
12.3.	Macchine a flusso radiale, misto ed assiale.	

12.4.	Macchine mono-stadio e multi-stadio.	
12.5.	Moto adiabatico nei condotti ad area variabile.	III.3
12.6.	Grandezze di ristagno.	
12.7.	Efficienza delle trasformazioni di accelerazione e decelerazione.	
12.8.	La separazione della corrente fluida e la perdita energetica.	
12.9.	Esempi.	
12.10.	Le equazioni di Eulero.	III.4
12.11.	Forma cinetica.	III.4
12.12.	I triangoli di velocità e gli angoli di flusso assoluto e relativo.	III.4
12.13.	Macchine radiali centrifughe e centripete.	III.7
12.14.	Rilevanza del rapporto tra i raggi ai fini della trasmissione del lavoro.	
12.15.	L'entalpia totale nel moto assoluto e relativo.	
12.16.	Connessione tra l'equazione di Eulero e l'equazione dell'energia.	III.4
12.17.	Rappresentazione della compressione reale nel piano h-s.	IV.4
12.18.	Rappresentazione della espansione reale nel piano h-s.	IV.9
12.19.	Il grado di reazione.	III.3-4
12.20.	Concetto di carico di ruota, di stadio e di macchina.	
12.21.	La caratteristica di lavoro di una operatrice a flusso radiale.	XI.4, XIV.4
12.22.	La caratteristica di lavoro di una operatrice a flusso assiale.	
12.23.	Effetto dell'angolo di pala in uscita ad una ruota di operatrice centrifuga sulla curva di lavoro.	XI.7, XIV.4
12.24.	Triangoli di velocità con pale rivolte all'indietro, radiali ed in avanti.	XI.7
12.25.	Le perdite energetiche nei condotti fissi e mobili.	XI.4, XI.7
12.26.	Genesi della caratteristica interna di una operatrice.	XI.4, XIV.4
12.27.	Effetto del numero di giri.	

### 13. Le pompe

13.1.	Operatrici e motrici idrauliche.	XIV.1
13.2.	Classificazione definizioni ed esempi costruttivi.	XIV.17
13.3.	La caratteristica di un circuito idraulico.	XIV.7
13.4.	Concetto di prevalenza utile e dinamica.	XIV.7
13.5.	Rappresentazione nel piano $H-Q$ .	XIV.7
13.6.	La prevalenza di una operatrice.	XIV.2, XIV.4
13.7.	La prevalenza manometrica.	XIV.2
13.8.	Le perdite volumetriche e meccaniche.	XIV.3
13.9.	Rendimento di macchina e catena dei rendimenti.	XIV.3
13.10.	Diagramma del Sankey applicato al circuito e alla macchina.	XIV.3
13.11.	Cenni di teoria della similitudine.	XIV.5
13.12.	I gruppi adimensionali fondamentali.	
13.13.	Cenni al numero di giri specifico.	XIV.6
13.14.	Le leggi di affinità.	XIV.5
13.15.	Applicazioni.	XIV.4
13.16.	Classificazione definizioni ed esempi costruttivi.	XIV
13.17.	Pompe centrifughe.	XIV.17
13.18.	Triangoli di velocità e piani caratteristici di funzionamento.	XIV.8
13.19.	Punto di funzionamento di una macchina installata in un circuito.	XIV.7
13.20.	Stabilità di funzionamento.	XIV.9

13.21.	Effetti delle proprietà del fluido sull'incremento di pressione e sulla potenza richiesta da un'operatrice.	XIV.4
13.22.	Criteri di scelta di una pompa.	XIV.8, XIV.12
13.23.	Diagrammi di selezione e piani caratteristici.	XIV.8
13.24.	Esempi.	XIV.8, XIV.12
13.25.	La tornitura della girante; esempi ed applicazioni.	XIV.8
13.26.	La cavitazione nelle pompe: generalità e definizioni.	XIV.10
13.27.	Concetto di $NPSH_r$ e $NPSH_a$ .	XIV.10.1
13.28.	Andamenti funzionali con la portata.	XIV.10.1
13.29.	Metodi per aumentare il carico disponibile e ridurre il richiesto.	XIV.10.2
13.30.	Massima altezza di aspirazione.	XIV.10.4
13.31.	Esempi numerici.	XIV.10.1
13.32.	Pompe assiali: esempi costruttivi.	XIV.18
13.33.	Triangoli di velocità e piani caratteristici di funzionamento.	XIV.18
13.34.	Sistemi a pale orientabili; condizioni di fuori progetto.	XIV.18
13.35.	La regolazione delle pompe.	XIV.15
13.36.	Regolazione per variazione del numero dei giri.	XIV.15
13.37.	Regolazione per laminazione.	XIV.15
13.38.	Regolazione per by-pass.	XIV.15
13.39.	Implicazioni sulla cavitazione.	XIV.15
13.40.	Aspetti energetici.	XIV.15
13.41.	Vantaggi e svantaggi.	XIV.15
13.42.	Problematiche e tecniche di avviamento.	XIV.16
13.43.	Esempi costruttivi.	XIV.17
13.44.	Le pompe volumetriche: generalità e definizioni.	XIV.19
13.45.	Pompe volumetriche alternative.	XIV.19
13.46.	Il piano pressione volume; caso ideale e reale.	XIV.19
13.47.	La portata istantanea in aspirazione e mandata.	
13.48.	Le casse d'aria.	
13.49.	Curve caratteristiche ideali e reali.	
13.50.	Calcolo della potenza mediante diagramma indicato.	
13.51.	Pompe a membrana e a diaframma.	XIV.19
13.52.	Pompe volumetriche rotative: generalità e definizioni.	XIV.20
13.53.	Esempi costruttivi.	XIV.20
13.54.	Principio di funzionamento.	
13.55.	Pompe a lobi, a ingranaggi, a palette, a rotore flessibile, a vite e Mohno.	XIV.20
13.56.	La regolazione delle pompe volumetriche.	XIV.19
13.57.	Esercitazione: problemi di esercizio e regolazione di pompe centrifughe.	

#### 14. I compressori

		XI, XII, XIII, XIV
14.1.	Classificazione definizioni ed esempi costruttivi.	XI.1, XIII.1
14.2.	Compressori volumetrici: generalità e definizioni.	XIII.2
14.3.	Il compressore volumetrico alternativo a singolo e doppio effetto.	XIII.2
14.4.	Principio di funzionamento.	XIII.2.1
14.5.	Il piano pressione volume.	XIII.2.1
14.6.	Il coefficiente di riempimento.	XIII.2.1
14.7.	Il lavoro indicato e la potenza indicata.	XIII.2.2

14.8.	Funzionamento ideale e reale.	XIII.2.2
14.9.	Curve caratteristiche ed effetti del rapporto di compressione sulla portata aspirata.	
14.10.	Esempi costruttivi mono-stadio e multi-stadio.	XIII.2.3
14.11.	La regolazione della portata.	XIII.2.4
14.12.	Compressori volumetrici rotativi: generalità e definizioni.	XIII.3
14.13.	Macchine con rapporto di compressione interno e a spostamento.	XIII.3
14.14.	Funzionamento con rapporto di compressione diverso da quello interno.	XIII.3
14.15.	Vantaggi e svantaggi.	XIII.3
14.16.	Compressori scroll, a palette, a lobi, a vite.	XIII.3.1-5
14.17.	Esercitazione: compressori volumetrici alternativi.	
14.18.	Compressori dinamici: generalità e definizioni.	XI.1, XI.2, XII
14.19.	Compressori centrifughi ed assiali, mono-stadio e multi-stadio.	XI.2, XII, XI.9
14.20.	La caratteristica di lavoro e la geometria della girante.	XI.7
14.21.	Lavoro di compressione e carico politropico.	XI.2
14.22.	Relazioni tra carico e rapporto di compressione.	XI.3, XI.5
14.23.	Effetti del tipo di fluido e delle condizioni in aspirazioni.	XI.5
14.24.	Curve di rendimento e di potenza.	XI.4
14.25.	Concetto di stallo e pompaggio.	
14.26.	Massimo rapporto di compressione di stadio per operatrice assiale e radiale mono-stadio.	
14.27.	Il compressore assiale.	III.6, XI.9
14.28.	Confronto efficienze macchine radiali ed assiali.	XI.9
14.29.	Esempi costruttivi.	
14.30.	La regolazione dei compressori dinamici.	
14.31.	Esercitazione: compressori dinamici.	XI.6
14.32.	Ventilatori.	
14.33.	Macchine per il vuoto	

## **Bibliografia di riferimento**

- R. della Volpe, *Macchine*, ed. Liguori.
- R. della Volpe, *Esercizi di Macchine*, ed. Liguori.
- R. della Volpe, *Analisi energetica ed exergetica della compressione e della espansione. Rendimenti*, ed. Liguori.
- O. Vocca, *Lezioni di Macchine*, ed. Liguori.
- G. Lozza, *Turbine a gas e cicli combinati*, ed. Esculapio.
- O. Acton, *Turbomacchine*, ed. UTET.
- R. della Volpe e M. Migliaccio, *Motori a Combustione Interna*, ed. Liguori.
- C. d'Amelio, *Elementi di Turbine a Vapore*, ed. Liguori.