

# **CAPITOLO 1**

## **CICLO RANKINE (CICLO A FLUIDO BIFASE)**

### **TURBINE A VAPORE**

## **CICLO RANKINE**

IL CICLO TERMODINAMICO RANKINE E' COMPOSTO DA QUATTRO TRASFORMAZIONI PRINCIPALI (COMPRESSIONE, RISCALDAMENTO, ESPANSIONE E CONDENSAZIONE), PIÙ ALTRE TRASFORMAZIONI ACCESSORIE CHE CARATTERIZZANO LE DIVERSE VARIANTI POSSIBILI

POICHE' NELLE TRASFORMAZIONI IL FLUIDO DI LAVORO ALTERNA LE FASI LIQUIDO E VAPORE, IL CICLO E' DETTO A FLUIDO BIFASE

IL FLUIDO DI LAVORO È COSTITUITO, NELLA STRAGRANDE MAGGIORANZA DELLE APPLICAZIONI, DA ACQUA

## CICLO RANKINE - TURBINE A VAPORE

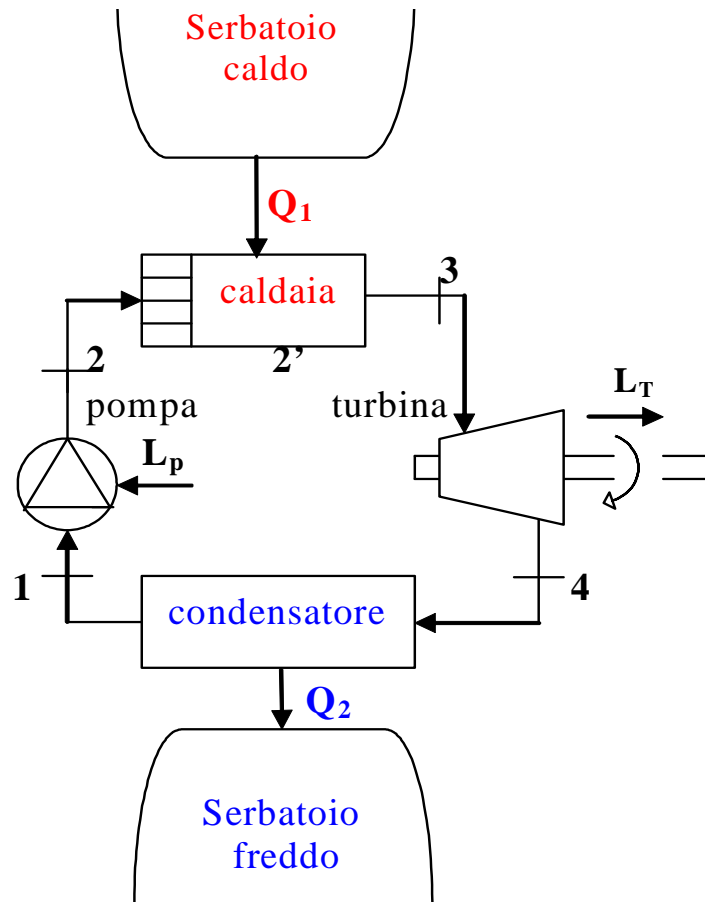
I COMPONENTI PRINCIPALI DELL'IMPIANTO (DOVE AVVENGONO LE QUATTRO TRASFORMAZIONI PRINCIPALI) SONO:

- POMPA
- GENERATORE DI VAPORE
- TURBINA
- CONDENSATORE

IL COMPONENTE PRINCIPALE E' QUELLO CHE PRODUCE ENERGIA (MECCANICA ==> ELETTRICA) ED E' LA TURBINA, DETTA TURBINA A VAPORE

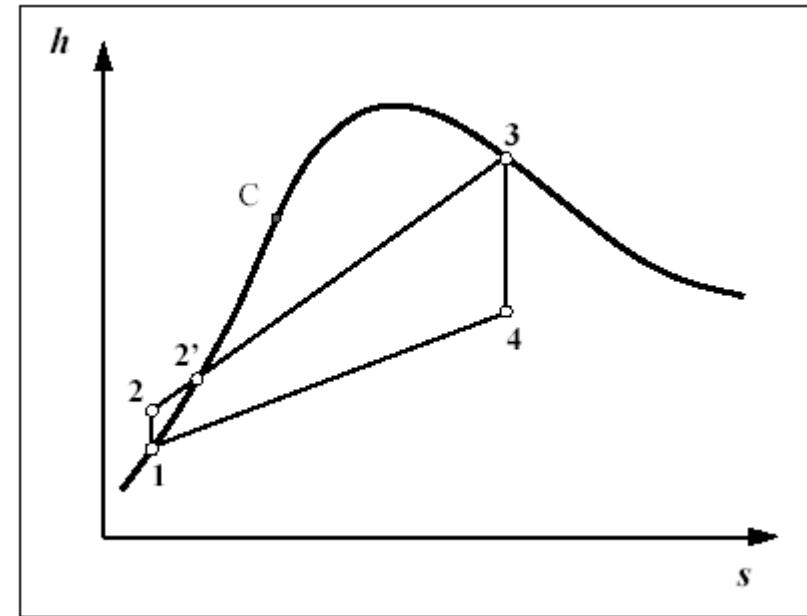
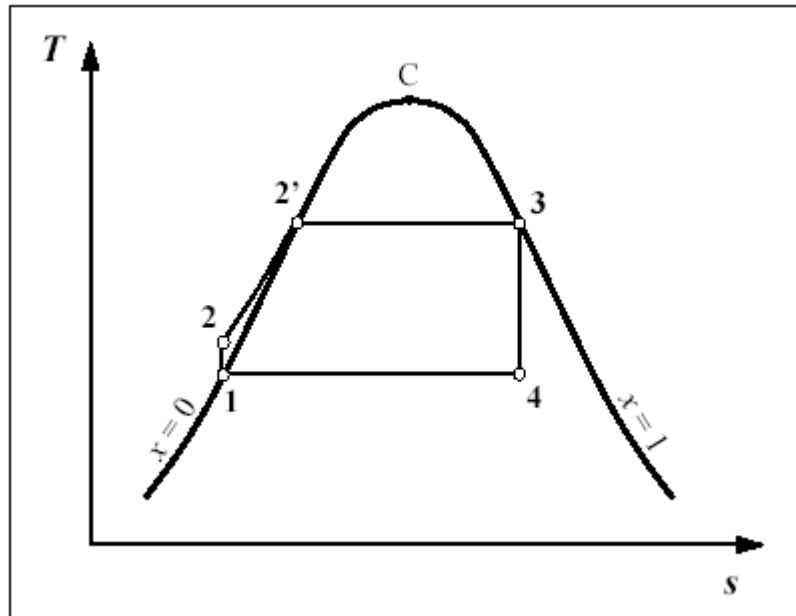
L'APPLICAZIONE TIPICA DEL CICLO RANKINE È PER IMPIANTI FISSI DI PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA, DI ELEVATA POTENZA

# CICLO RANKINE SEMPLICE A VAPORE SATURO



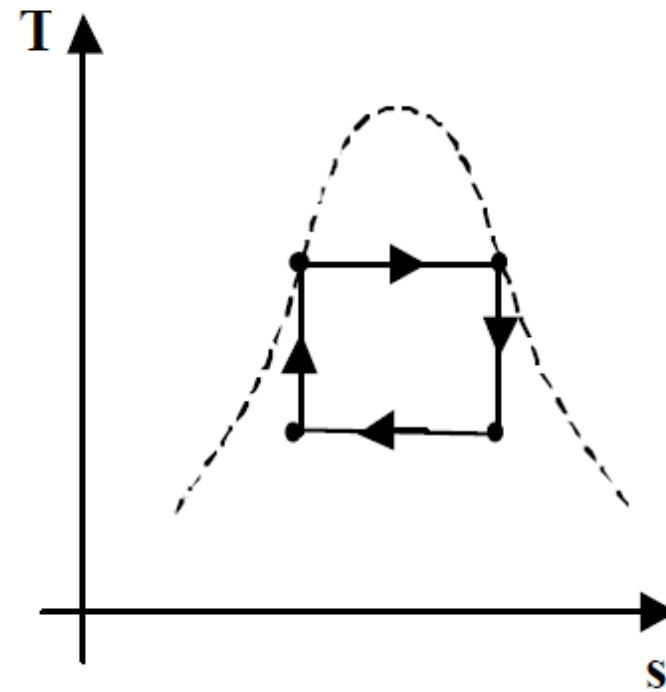
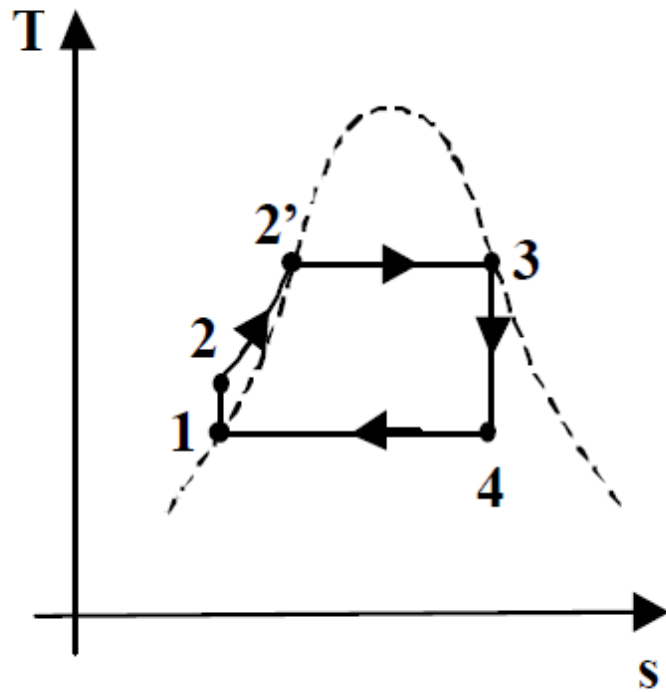
- 1 - 2    POMPAGGIO DEL LIQUIDO
- 2 - 2'    RISCALDAMENTO DEL LIQUIDO
- 2' - 3    EVAPORAZIONE
- 3 - 4    ESPANSIONE
- 4 - 1    CONDENSAZIONE

# CICLO RANKINE SEMPLICE A VAPORE SATURO - IDEALE



- 1 - 2 POMPAGGIO DEL LIQUIDO
- 2 - 2' RISCALDAMENTO DEL LIQUIDO
- 2' - 3 EVAPORAZIONE
- 3 - 4 ESPANSIONE
- 4 - 1 CONDENSAZIONE

# CICLO RANKINE SEMPLICE A VAPORE SATURO CONFRONTO COL CICLO DI CARNOT



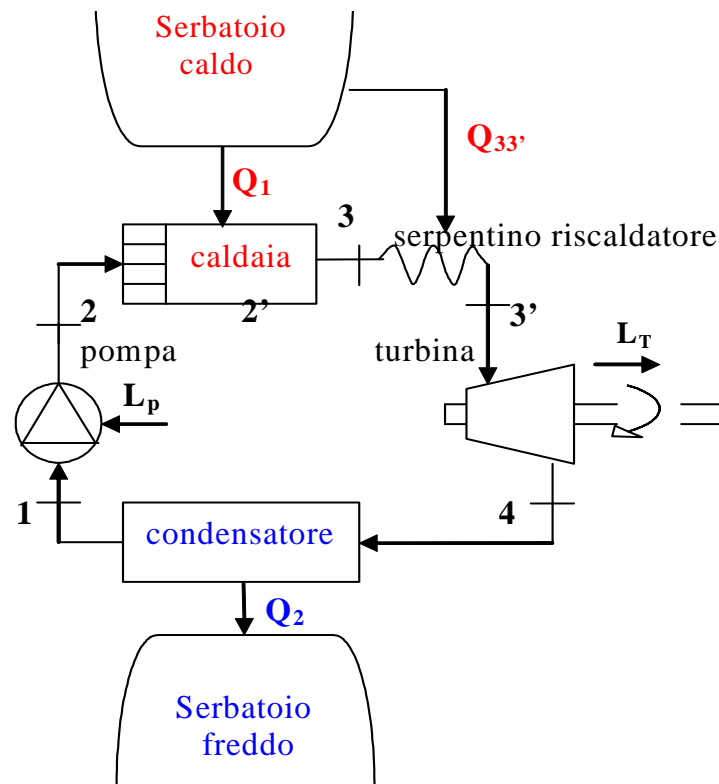
# **CICLO RANKINE SEMPLICE A VAPORE SATURO CONFRONTO COL CICLO DI CARNOT**

IL CICLO RANKINE A VAPORE SATURO E' IL CICLO TERMODINAMICO CHE PIU' SI AVVICINA ALLA FORMA (E QUINDI AL RENDIMENTO) DEL CICLO DI CARNOT.

IL SUO PROBLEMA, PERO' E LEGATO AL FATTO CHE PER SALIRE IL RENDIMENTO OCCORRE FAR SALIRE LA TEMPERATURA MASSIMA DEL CICLO E QUESTO INCREMENTO COMPORTA AUTOMATICAMENTE UN AUMENTO DELLA PRESSIONE DEL VAPORE, PER CUI SI VERIFICANO PROBLEMI DI RESISTENZA DEI MATERIALI.

LA RISPOSTA A QUESTO PROBLEMA E' DATA DAL CICLO A VAPORE SURRISCALDATO.

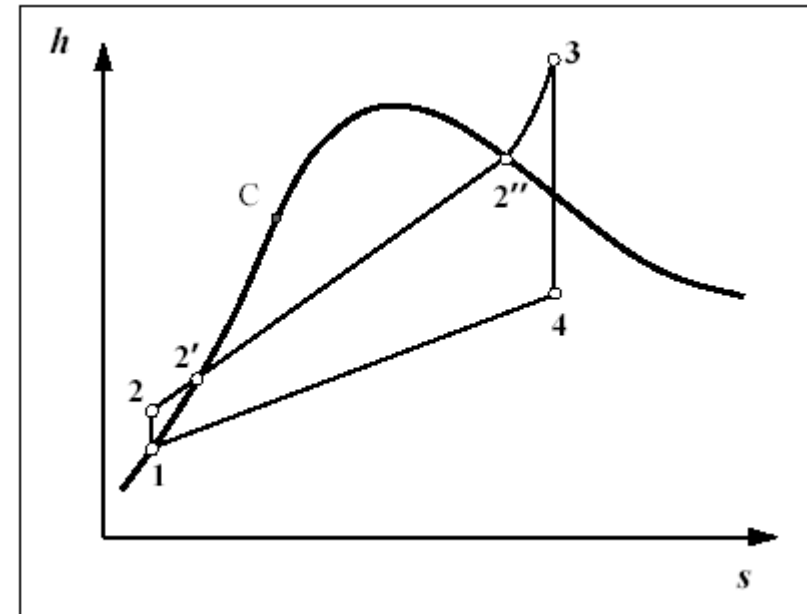
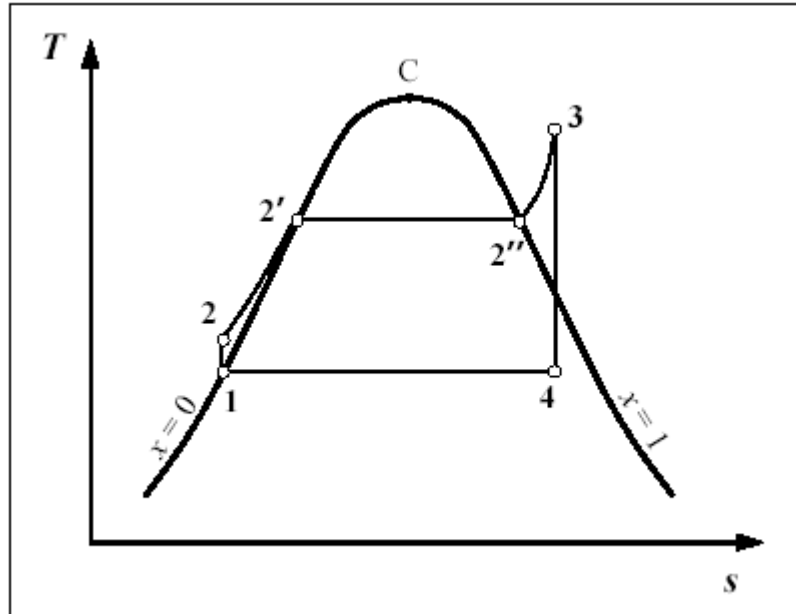
# CICLO RANKINE SEMPLICE A VAPORE SURRISCALDATO



- 1 - 2    POMPAGGIO DEL LIQUIDO
- 2 - 2'    RISCALDAMENTO DEL LIQUIDO
- 2' - 3    EVAPORAZIONE
- 3 - 3'    SURRISCALDAMENTO DEL VAPORE
- 3' - 4    ESPANSIONE
- 4 - 1    CONDENSAZIONE



# CICLO RANKINE SEMPLICE A VAPORE SURRISCALDATO - CICLO IDEALE



- 1 - 2 POMPAGGIO DEL LIQUIDO
- 2 - 2' RISCALDAMENTO DEL LIQUIDO
- 2' - 2'' EVAPORAZIONE
- 2'' - 3 SURRISCALDAMENTO DEL VAPORE
- 3 - 4 ESPANSIONE
- 4 - 1 CONDENSAZIONE

# **CICLO RANKINE SEMPLICE A VAPORE SURRISCALDATO - CICLO IDEALE**

IL CICLO A VAPORE SURRISCALDATO HA IL VANTAGGIO DI AUMENTARE LA TEMPERATURA MASSIMA SENZA AUMENTARE LA PRESSIONE.

LA SUA FORMA SI DISCOSTA DAL CICLO DI CARNOT IN MISURA MAGGIORE RISPETTO AL CICLO A VAPORE SATURO, TUTTAVIA, ARRIVANDO AD UNA TEMPERATURA PIU' ALTA, SI CONFRONTA CON UN RENDIMENTO DI CARNOT MAGGIORE RISPETTO A QUELLO OTTENIBILE DA CICLO A VAPORE SATURO.

IN CONCLUSIONE, CONSIDERATE LE TEMPERATURE E PRESSIONI UTILIZZABILI CON GLI ACCIAI DISPONIBILI, IL CICLO A VAPORE SURRISCALDATO ARRIVA DA UN RENDIMENTO MAGGIORE RISPETTO A QUELLO DI UN CICLO A VAPORE SATURO.

# **STRUMENTI DISPONIBILI PER IL CALCOLO DI CICLI A VAPORE (D'ACQUA)**

- TABELLE DEL VAPOR D'ACQUA SATURO
- TABELLE DEL VAPOR D'ACQUA SURRISCALDATO
- DIAGRAMMA ENTROPICO (T - s)
- DIAGRAMMA DI MOLLIER (h - s)

# GRANDEZZE TOTALI E SPECIFICHE

LE ESPRESSIONI RELATIVE AI LAVORI ( $l_t, l_p, l_u$ ) ED ALLE QUANTITÀ DI CALORE ( $q_1, q_2$ ) IN GIOCO NEL CICLO SONO **SPECIFICHE** (CIOÈ RIFERITE ALL'UNITÀ DI MASSA DEL FLUIDO DI LAVORO NEL CICLO) E QUINDI VALUTATE IN kcal/kg OPPURE IN kWh/kg

PER OTTENERE I CORRISPONDENTI DATI DI POTENZA, OCCORRE MOLTIPLICARE I VALORI DEL LAVORO O DEL CALORE PER LA PORTATA IN GIOCO (G) NELLA TRASFORMAZIONE TERMODINAMICA.

# CICLO IDEALE

LAVORO TURBINA

$$l'_t = h_3 - h_4$$

LAVORO POMPA

$$l'_p = h_2 - h_1 = v (p_2 - p_1)$$

LAVORO UTILE DEL CICLO

$$l'_u = l'_t - l'_p = (h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)$$

CALORE ENTRANTE (GENERATORE DI VAPORE)

$$q'_1 = h_3 - h_2$$

CALORE USCENTE (CONDENSATORE)

$$q'_2 = h_4 - h_1$$

RENDIMENTO DEL CICLO

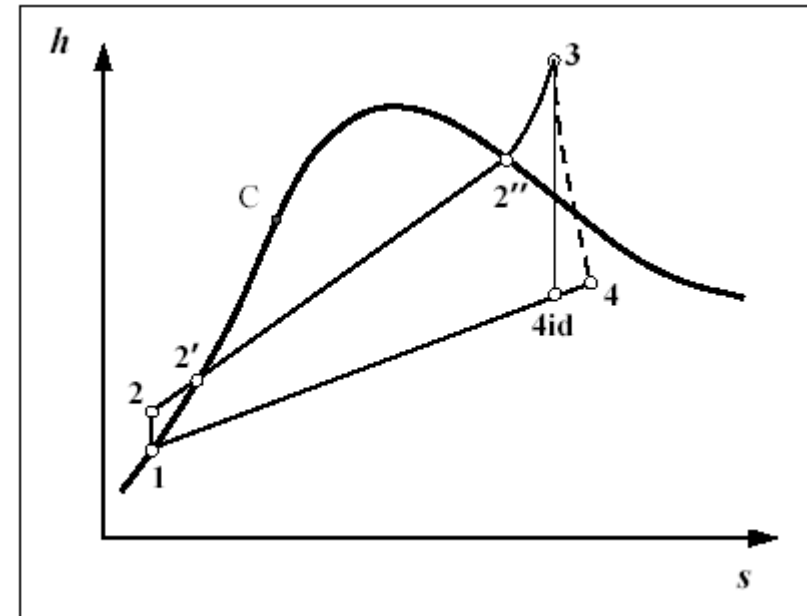
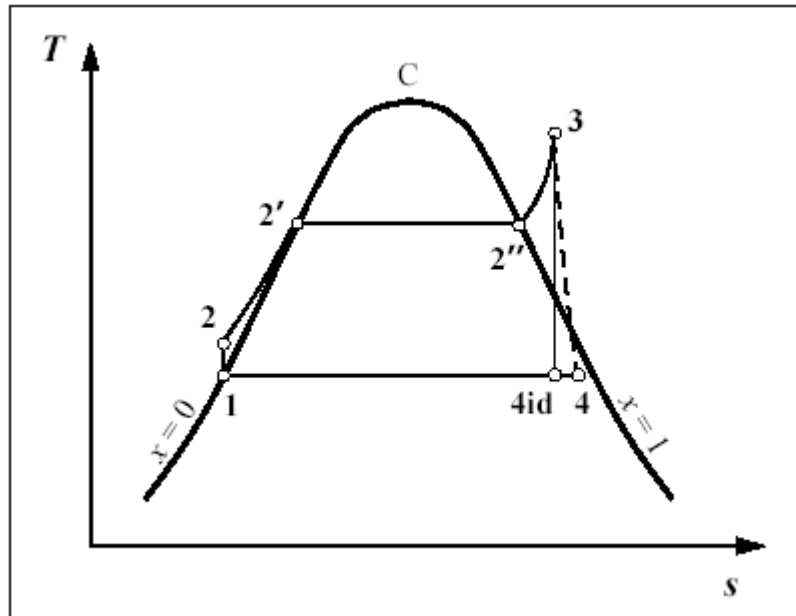
$$\eta = l'_u / q'_1$$

# TERMODINAMICA DEL CICLO REALE

IL CICLO RANKINE REALE SI DIFFERENZIA DA QUELLO IDEALE PERCHÈ SI CONSIDERANO I SEGUENTI FENOMENI:

- RENDIMENTI (IDRAULICO, MECCANICO ED ELETTRICO) DELLA POMPA, CHE FANNO AUMENTARE L'ENERGIA RICHIESTA PER IL POMPAGGIO
- RENDIMENTO COMPLESSIVO DEL GENERATORE DI CALORE (IL CALORE CEDUTO AL FLUIDO È MINORE DI QUELLO OTTENIBILE IN BASE AL POTERE CALORIFICO DEL COMBUSTIBILE BRUCIATO)
- RENDIMENTI (ADIABATICO, MECCANICO ED ELETTRICO) DELLA TURBINA E DEL GENERATORE ELETTRICO AD ESSA ACCOPPIATO, CHE FANNO DIMINUIRE L'ENERGIA ELETTRICA PRODUCIBILE
- PERDITE DI CARICO DEL FLUIDO NELL'ATTRAVERSAMENTO DEI DIVERSI COMPONENTI

# CICLO RANKINE SEMPLICE A VAPORE SURRISCALDATO - CICLO REALE



- 1 - 2 POMPAGGIO DEL LIQUIDO
- 2 - 2' RISCALDAMENTO DEL LIQUIDO
- 2' - 2'' EVAPORAZIONE
- 2'' - 3 SURRISCALDAMENTO DEL VAPORE
- 3 - 4id ESPANSIONE IDEALE
- 3 - 4 ESPANSIONE REALE
- 4 - 1 CONDENSAZIONE

NELLA COMPRESSIONE REALE 1-2,  
IL PUNTO 2 HA ENTROPIA  
MAGGIORE DEL PUNTO 2' DI FINE  
COMPRESSIONE IDEALE  
LA PICCOLA DIFFERENZA NON E'  
VISIBILE NEL DISEGNO

# CICLO REALE

LAVORO TURBINA

$$l_t = (h_3 - h_4) \eta_{mt} \eta_{et} = (h_3 - h_{4'}) \eta_{mt} \eta_{et} \eta_{adt}$$

LAVORO POMPA

$$l_p = (h_2 - h_1) / \eta_{mp} \eta_{ep}$$

LAVORO UTILE DEL CICLO

$$l_u = l_t - l_p = (h_3 - h_4) \eta_{mt} \eta_{et} - (h_2 - h_1) / \eta_{mp} \eta_{ep}$$

CALORE ENTRANTE (GENERATORE DI VAPORE)

$$q_1 = (h_3 - h_2) / \eta_{gv}$$

CALORE USCENTE (CONDENSATORE)

$$q_2 = h_4 - h_1$$

RENDIMENTO DEL CICLO

$$\eta = l_u / q_1 \quad \text{che risulta } \ll \text{ del rendimento del ciclo ideale}$$



# CICLO REALE

## RENDIMENTI

- $\eta_{mt}$  = RENDIMENTO MECCANICO DELLA TURBINA
- $\eta_{mp}$  = RENDIMENTO MECCANICO DELLA POMPA
- $\eta_{gv}$  = RENDIMENTO DEL GENERATORE DI VAPORE
- $\eta_{adt}$  = REND. ADIABATICO TURBINA =  $(h_3 - h_4) / (h_3 - h_{4'})$
- $\eta_{et}$  = RENDIMENTO ELETTRICO DELLA TURBINA
- $\eta_{ep}$  = RENDIMENTO ELETTRICO DELLA POMPA

# CICLO REALE

## CALCOLO DELLE GRANDEZZE TOTALI

POTENZA TURBINA

$$P_t = G \cdot I_t$$

POTENZA POMPA

$$P_p = G \cdot I_p$$

POTENZA UTILE

$$P_u = P_t - P_p = G \cdot (I_t - I_p)$$

POTENZA TERMICA INTRODotta NEL CICLO (GENERATORE DI VAPORE)

$$P_1 = G \cdot q_1$$

POTENZA TERMICA USCENTE DAL CICLO (CONDENSATORE)

$$P_2 = G \cdot q_2$$

# CICLO REALE

## CONSUMO SPECIFICO DI VAPORE

$$q_v = 1 / l_u \quad (\text{kg vapore} / \text{kcal})$$

$$q_v = 860 / l_u \quad (\text{kg vapore} / \text{kWh})$$

## CONSUMO SPECIFICO DI CALORE

$$q_c = q_1 / l_u = 1 / \eta \quad (\text{adimensionale})$$

$$q_c = 860 / \eta \quad (\text{kcal} / \text{kWh})$$

## CONSUMO SPECIFICO DI COMBUSTIBILE

$$q_b = q_c / H_i$$

$H_i$  = POTERE CALORIFICO INFERIORE DEL COMBUSTIBILE (IN kcal/kg  
OPPURE IN kcal/mc).

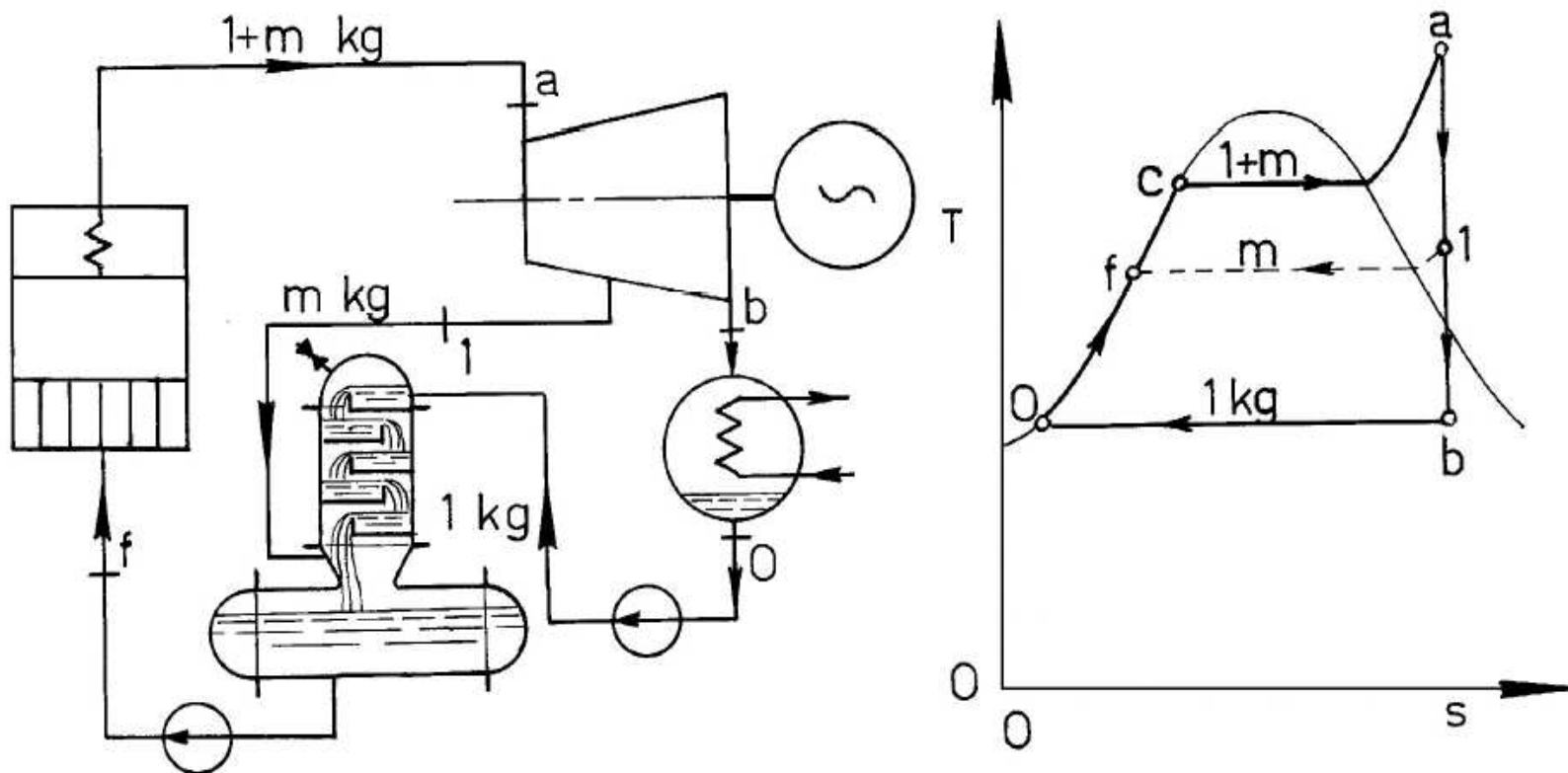
ESPRIMENDO  $q_c$  IN kcal/kWh,  $q_b$  RISULTA ESPRESSO IN kg comb./kWh O IN  
mc comb./kWh.

# RIGENERAZIONE

LA RIGENERAZIONE CONSISTE NELLO SPILLAMENTO DI VAPORE, IN POSIZIONE INTERMEDIA DELLA TURBINA, E NEL SUO UTILIZZO PER PRERISCALDARE IL LIQUIDO, DOPO IL POMPAGGIO E PRIMA DELL'INGRESSO IN CALDAIA

DOPO IL POMPAGGIO, IL LIQUIDO SI TROVA ALLA TEMPERATURA MINIMA DEL CICLO PER CUI È SUFFICIENTE SPILLARE VAPORE DAGLI STADI FINALI DELLA TURBINA, A TEMPERATURA PIUTTOSTO BASSA, PER OTTENERE UN RISCALDAMENTO DEL LIQUIDO

# RIGENERAZIONE



LA PORTATA DI VAPORE SPILLATA DALLA TURBINA NEL PUNTO 1 VIENE UTILIZZATA PER PRERISCALDARE L'ACQUA DI ALIMENTO DA 0 AD f

# RIGENERAZIONE

IN UNO STESSO IMPIANTO, È POSSIBILE EFFETTUARE PIÙ RIGENERAZIONI IN SERIE: IL LIQUIDO, IN USCITA DAL PRIMO RIGENERATORE, PUÒ ESSERE ULTERIORMENTE RISCALDATO MEDIANTE VAPORE, SPILLATO DALLA TURBINA A PRESSIONE PIÙ ALTA RISPETTO A QUELLO INVIATO AL PRIMO RIGENERATORE

OGNI RIGENERAZIONE SUCCESSIVA COMPORTA UN EFFETTO BENEFICO INFERIORE RISPETTO ALLE PRECEDENTI, IN QUANTO IL VAPORE VIENE SPILLATO A PRESSIONE SEMPRE PIÙ ALTA E QUINDI È MINORE L'ENERGIA PRODOTTA DALLO STESSO IN TURBINA

# PRESTAZIONI DELLE MACCHINE REALI

LE TURBINE A VAPORE HANNO UNA POTENZA CHE PUÒ ANDARE DALLE DECINE ALLE CENTINAIA DI MW, FINO AD ARRIVARE AI 1.000 MW DELLE GROSSE CENTRALI

SE E' DISPONIBILE CALORE DI SCARTO DA PROCESSI INDUSTRIALI O, COME PER I CICLI MISTI GAS-VAPORE, DAI FUMI DI SCARICO DI UNA TURBINA A GAS, SI POSSONO REALIZZARE ANCHE IMPIANTI CON TURBINE A VAPORE CON POTENZA DI ALCUNI MW

NEGLI IMPIANTI DI PICCOLA POTENZA, CHE GENERALMENTE SI BASANO SULL'UTILIZZO DI CICLI SEMPLICI, IL RENDIMENTO RISULTA INFERIORE AL 40%

ALL'AUMENTARE DELLA POTENZA DEGLI IMPIANTI SI GIUSTIFICA VIA VIA L'UTILIZZO DI CICLI SEMPRE PIÙ COMPLESSI CON RENDIMENTI DELL'ORDINE DEL 43-44% ALLA PUNTA DI CARICO (A CARICO RIDOTTO IL RENDIMENTO DIMINUISCE)

# CAMPI DI IMPIEGO DELLE TURBINE A VAPORE

- CENTRALI ELETTRICHE ENEL DI GRANDE POTENZA, UTILIZZATE PER COPRIRE LA BASE DEL DIAGRAMMA DI CARICO
- CICLI COMBINATI GAS-VAPORE (CON I GAS DI SCARICO A TEMPERATURA ELEVATA DELLE TURBINE A GAS SI RISCALDA VAPORE, CHE VIENE ESPANSO IN UNA TURBINA A VAPORE, OTTENENDO UN CICLO DAL RENDIMENTO COMPLESSIVO CHE PUÒ SUPERARE ANCHE IL 50%)
- IMPIANTI DI COGENERAZIONE, SIA PER USO INDUSTRIALE CHE PER RISCALDAMENTO URBANO



# COMBUSTIBILI

I GENERATORI DI VAPORE UTILIZZATI IN UN IMPIANTO BASATO SU TURBINA A VAPORE POSSONO UTILIZZARE, CON DIVERSE SOLUZIONI COSTRUTTIVE, QUALSIASI TIPO DI COMBUSTIBILE

GENERALMENTE VENGONO UTILIZZATI IL GAS NATURALE, L'OLIO DENSO (AD ALTO ATZ O BASSO BTZ TENORE DI ZOLFO) ED IL CARBONE, CHE SONO I COMBUSTIBILI A MINOR COSTO

# COGENERAZIONE CON TURBINE A VAPORE

LE TURBINE A VAPORE POSSONO ESSERE UTILIZZATE PER LA REALIZZAZIONE DI IMPIANTI DI COGENERAZIONE SIA PER USO INDUSTRIALE CHE PER RISCALDAMENTO URBANO. SONO POSSIBILI:

- IMPIANTI A CONTROPRESSIONE: UTILIZZANO DIRETTAMENTE IL VAPORE PRELEVATO ALL'USCITA DELLA TURBINA (AD UNA PRESSIONE DELL'ORDINE DI QUALCHE BAR), GENERALMENTE PER COPRIRE I FABBISOGNI DI UTENZE INDUSTRIALI
- IMPIANTI A CONDENSATORE CALDO: UTILIZZANO IL VAPORE (PRELEVATO DALLA TURBINA AD UNA PRESSIONE DELL'ORDINE DI 1 BAR ASS. O POCO PIÙ) PER LA PRODUZIONE DI ACQUA CALDA O SURRISCALDATA (PER UTENZE INDUSTRIALI O PER RETI DI TELERISCALDAMENTO)

I DUE SISTEMI POSSONO ANCHE ESSERE PRESENTI CONTEMPORANEAMENTE (PERCHE' CI SONO UTENZE DI VAPORE E UTENZE DI ACQUA CALDA)

# COMPONENTI DELL'IMPIANTO A VAPORE

## **POMPA IDRAULICA**

NEL CICLO RANKINE LA COMPRESSIONE AVVIENE NELLA FASE LIQUIDA E PERTANTO VIENE EFFETTUATA MEDIANTE UNA POMPA IDRAULICA.

## **GENERATORE DI VAPORE**

IL RISCALDAMENTO DEL FLUIDO DI LAVORO DALLA FASE LIQUIDA ALLA FASE VAPORE AVVIENE IN UN UNICO COMPONENTE DENOMINATO GENERATORE DI VAPORE O CALDAIA

IL RENDIMENTO DI UN GENERATORE DI VAPORE (RAPPORTO TRA L'ENERGIA TERMICA NETTA CEDUTA AL FLUIDO E L'ENERGIA TERMICA CONSUMATA) PUÒ ARRIVARE AL 92%-93%

# COMPONENTI DELL'IMPIANTO A VAPORE

## TURBINA A VAPORE

LA TURBINA A VAPORE È IL COMPONENTE NEL QUALE VIENE REALIZZATA L'ESPANSIONE DEL FLUIDO DI LAVORO (VAPORE)

COSTRUTTIVAMENTE LA TURBINA A VAPORE VIENE SUDDIVISA IN PIÙ SEZIONI O STADI CHE VENGONO ATTRAVERSATI IN SERIE DAL VAPORE CHE, ESPANDENDOSI, CEDE L'ENERGIA RICEVUTA SOTTO FORMA DI PRESSIONE ALLE PALETTE DELLA TURBINA, L'ALBERO DELLA QUALE È COLLEGATO, GENERALMENTE MEDIANTE UN RIDUTTORE DI GIRI, AD UN GENERATORE ELETTRICO

IL NUMERO DI STADI DIPENDE DAL SALTO ENTALPICO CHE IL VAPORE SUBISCE NEL PASSARE DALLE CONDIZIONI DI INIZIO ESPANSIONE A QUELLE DI FINE ESPANSIONE E QUINDI DAL TIPO DI CICLO CHE SI DESIDERA REALIZZARE

# COMPONENTI DELL'IMPIANTO A VAPORE

## CONDENSATORE

IL VAPORE ALL'USCITA DELLA TURBINA VIENE RIPORTATO ALLO STATO LIQUIDO MEDIANTE UNA CONDENSAZIONE EFFETTUATA IN UN APPOSITO SCAMBIATORE DI CALORE (GENERALMENTE DI TIPO SHELL AND TUBE), DETTO CONDENSATORE

IL CONDENSATORE NON VIENE UTILIZZATO NEL CASO DI IMPIANTI DI COGENERAZIONE IN CUI IL VAPORE, PRELEVATO ALL'USCITA DELLA TURBINA AD UNA PRESSIONE DI ALCUNI BAR, VIENE INVIATO DIRETTAMENTE AGLI IMPIANTI INDUSTRIALI PER COPRIRE I FABBISOGNI DI VAPORE DEGLI STESSI

# COMPONENTI DELL'IMPIANTO A VAPORE

## CONDENSATORE

RICHIEDE L'UTILIZZAZIONE DI ACQUA PER IL RAFFREDDAMENTO DEL VAPORE. CI SONO VARIE POSSIBILITA':

- INSTALLAZIONE DELL'IMPIANTO PRESSO CORSI O SPECCHI D'ACQUA, CHE HANNO TEMPERATURE VARIABILI, A SECONDA DELLA STAGIONE, DAI 5°C AI 25°C. CONSEGUENTEMENTE, LA TEMPERATURA DI CONDENSAZIONE VARIA TRA I 20°C ED I 40°C
- CIRCUITO AD ACQUA DI TORRE: ALL'USCITA DEL CONDENSATORE L'ACQUA VIENE INVIATA AD UNA TORRE DI RAFFREDDAMENTO, CHE LA PORTA A TEMPERATURA CHE DIPENDE DALLA TEMPERATURA DELL'ARIA ESTERNA. TEMPERATURA DI CONDENSAZIONE POTRA' VARIARE TRA 15°C E 45°C, A SECONDA DELLA STAGIONE
- IMPIANTO DI COGENERAZIONE: IL FLUIDO DI RAFFREDDAMENTO E' L'ACQUA CALDA O SURRISCALDATA DEL CIRCUITO D'UTENZA