

## **L - SISTEMI APERTI**

## **ENERGIA INTERNA**

$$E = n C_v T \quad (C_v \text{ molare} = \text{J/kmol } ^\circ\text{C})$$

$$E = m c_v T \quad (c_v \text{ massico} = \text{J/kg } ^\circ\text{C})$$

## **ENERGIA INTERNA SPECIFICA**

$$e = E/m = c_v T$$

## **ENTALPIA**

$$H = E + pV$$

$$H = n C_p T \quad (C_p \text{ molare} = \text{J/kmol } ^\circ\text{C})$$

$$H = m c_p T \quad (c_p \text{ massico} = \text{J/kg } ^\circ\text{C})$$

## **ENTALPIA SPECIFICA**

$$h = H/m = c_p T$$

$$h = e + p v = e + p/d$$

## ALCUNE FORMULE DI CALCOLO

$$G = d \times Q$$

dove:

G = PORTATA MASSICA (kg/s)

d = DENSITA' (kg/m<sup>3</sup>)

Q = PORTATA VOLUMETRICA (m<sup>3</sup>/s)

$$P = G \times (h_2 - h_1)$$

dove:

P = POTENZA (kW)

G = PORTATA MASSICA (kg/s)

$h_1, h_2$  = ENTALPIA SPECIFICA INIZIALE E FINALE (kJ/kg)

## **SISTEMA TERMODINAMICO CHIUSO**

SISTEMA TERMODINAMICO CHE PUO' ESSERE RACCHIUSO ENTRO UNA SUPERFICIE DI CONTROLLO ATTRAVERSO LA QUALE NON PUO' AVVENIRE UN FLUSSO DI MASSA

IL SISTEMA PUO' SCAMBIARE CALORE E LAVORO COL MONDO ESTERNO

LA MASSA E' COSTANTE

LE ALTRE GRANDEZZE (PRESSIONE, TEMPERATURA, ECC.) POSSONO VARIARE NEL TEMPO

## **SISTEMA TERMODINAMICO APERTO**

SISTEMA TERMODINAMICO RACCHIUSO ENTRO UNA SUPERFICIE DI CONTROLLO ATTRAVERSO LA QUALE AVVIENE UN FLUSSO DI MASSA

IL SISTEMA PUO' SCAMBIARE MASSA, CALORE E LAVORO COL MONDO ESTERNO

LA MASSA NON E' COSTANTE

ANCHE LE ALTRE GRANDEZZE (PRESSIONE, TEMPERATURA, ECC.) POSSONO VARIARE NEL TEMPO

# **SISTEMA TERMODINAMICO APERTO IN REGIME STAZIONARIO (O PERMANENTE) E CON FLUSSO UNIDIREZIONALE**

SISTEMA TERMODINAMICO ATTRAVERSO IL QUALE AVVIENE UN FLUSSO DI MASSA, CON LE SEGUENTI CONDIZIONI:

- LE GRANDEZZE FISICHE E TERMODINAMICHE NON VARIANO NEL TEMPO
- IL FLUSSO AVVIENE IN UN'UNICA DIREZIONE
- MUOVENDOSI IN DIREZIONE PERPENDICOLARE AL FLUSSO, LE GRANDEZZE TERMODINAMICHE NON VARIANO (CIOE' ASSUMONO LO STESSO VALORE IN OGNI PUNTO DI UNA SEZIONE PERPENDICOLARE AL FLUSSO)

NEL SEGUITO SI CONSIDERERANNO SISTEMI TERMODINAMICI APERTI, IN REGIME STAZIONARIO, CON FLUSSO UNIDIREZIONALE E DOTATI DI DUE SOLE SEZIONI DI SCAMBIO DI FLUIDO CON L'ESTERNO (UNA DI INGRESSO E UNA DI USCITA)

# **PRIMO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA PER SISTEMI CHIUSI**

$$Q + L = DE$$

## PRIMO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA PER SISTEMI APERTI IN REGIME STAZIONARIO

ALL'ENERGIA INTERNA SI DEVE SOMMARE ANCHE IL CARICO TOTALE POSSEDUTO DAL FLUIDO NELLA SEZIONE DI INGRESSO E IN QUELLA DI USCITA

$$\begin{aligned}c &= z + p/\gamma + u^2/2g = z + p/gd + u^2/2g = \\ &= z + pv/g + u^2/2g = (gz + pv + u^2/2) / g\end{aligned}$$

c = CARICO TOTALE DEL FLUIDO (NON SI USA LA LETTERA H PER EVITARE DI CONFONDERLO CON L'ENTALPIA)

v = VOLUME SPECIFICO DEL FLUIDO

u = VELOCITÀ DEL FLUIDO

z = QUOTA GEODETICA DEL FLUIDO



## PRIMO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA PER SISTEMI APERTI IN REGIME STAZIONARIO

$$Q + L = (E_2 - E_1) + mg (c_2 - c_1)$$

$$mq + m\ell = m(e_2 - e_1) + m [(gz_2 + p_2 v_2 + u_2^2/2) - (gz_1 + p_1 v_1 + u_1^2/2)]$$

$$\begin{aligned} q + \ell &= (e_2 - e_1) + [(gz_2 + p_2 v_2 + u_2^2/2) - (gz_1 + p_1 v_1 + u_1^2/2)] = \\ &= [(e_2 + p_2 v_2) + (gz_2 + u_2^2/2)] - [(e_1 + p_1 v_1) + (gz_1 + u_1^2/2)] = \\ &= (h_2 + gz_2 + u_2^2/2) - (h_1 + gz_1 + u_1^2/2) \end{aligned}$$

$q$  = ENERGIA TERMICA PER UNITÀ DI MASSA FORNITA AL SISTEMA

$\ell$  = ENERGIA MECCANICA PER UNITÀ DI MASSA FORNITA AL SISTEMA DA MACCHINE ESTERNE

1 = SEZIONE DI INGRESSO

2 = SEZIONE DI USCITA

## PRIMO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA PER SISTEMI APERTI IN REGIME STAZIONARIO

$$q + \ell = (h_2 + gz_2 + u_2^2/2) - (h_1 + gz_1 + u_1^2/2) = \\ = (h_2 - h_1) + (gz_2 - gz_1) + (u_2^2/2 - u_1^2/2)$$

VALE PER L'UNITÀ DI MASSA CHE PASSA ATTRAVERSO IL SISTEMA

- LA DIFFERENZA  $(z_2 - z_1)$  FRA INGRESSO E USCITA DELLA MACCHINA E' SEMPRE TRASCURABILE
- SOLITAMENTE ANCHE LA DIFFERENZA  $(u_2^2/2 - u_1^2/2)$  FRA INGRESSO E USCITA DELLA MACCHINA PUO' ESSERE TRASCURATA, PERCHE' LE VELOCITA' SONO PICCOLE OPPURE E' PICCOLA LA LORO DIFFERENZA

IL PRIMO PRINCIPIO SI RIDUCE A:

$$q + \ell = h_2 - h_1$$

# **PRIMO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA PER SISTEMI CHIUSI**

$$Q + L = E_2 - E_1$$

1 e 2 RAPPRESENTANO DUE ISTANTI DI TEMPO DIVERSI

## PRIMO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA PER SISTEMI APERTI IN REGIME STAZIONARIO

$$q + \ell = h_2 - h_1$$

1 e 2 RAPPRESENTANO LA SEZIONE DI INGRESSO E QUELLA DI USCITA

IN REGIME STAZIONARIO, E' INDIFFERENTE DIRE CHE:

- 1 e 2 RAPPRESENTANO LE CONDIZIONI CHE IL FLUIDO ASSUME NELLA SEZIONE DI INGRESSO E IN QUELLA DI USCITA, NEI DUE ISTANTI DI TEMPO SUCCESSIVI NEI QUALI LE VA AD ATTRAVERSARE
- 1 e 2 RAPPRESENTANO LE CONDIZIONI DIVERSE CHE, NELLO STESSO ISTANTE, PARTICELLE DI FLUIDO DIVERSE ASSUMONO RISPETTIVAMENTE NELLA SEZIONE DI INGRESSO E IN QUELLA DI USCITA

## **COMPRESSORE**

E' UNA MACCHINA OPERATRICE A FLUSSO CONTINUO (O ASSIMILABILE A TALE) CHE INCREMENTA LA PRESSIONE DI UN FLUIDO FORNENDO AD ESSO ENERGIA MECCANICA, SENZA APPREZZABILI SCAMBI DI ENERGIA TERMICA CON L'ESTERNO, DATO IL BREVE TEMPO DI PERMANENZA DEL FLUIDO ENTRO LA MACCHINA

ESSENDO UN COMPONENTE ADIABATICO:

$$l = h_2 - h_1$$

## **COMPRESSIONE IDEALE**

AVVIENE IN UNA MACCHINA IDEALE CHE OPERA SU UN FLUIDO IDEALE

NON ESISTONO ATTRITI E QUINDI DISPERSIONI DI ENERGIA ALL'INTERNO DELLA MASSA FLUIDA, E NEMMENO ATTRITI FRA LE PARTI DELLA MACCHINA

LA COMPRESSIONE IDEALE E' ISOENTROPICA

LA COMPRESSIONE IDEALE ASSORBE IL MINIMO LAVORO POSSIBILE, A PARITA' DI RAPPORTO DI COMPRESSIONE ( $\beta = p_2/p_1$ )

## COMPRESSIONE REALE

PUO' ESSERE REALE IL FLUIDO E/O LA MACCHINA

ANCHE LA COMPRESSIONE REALE E' ADIABATICA

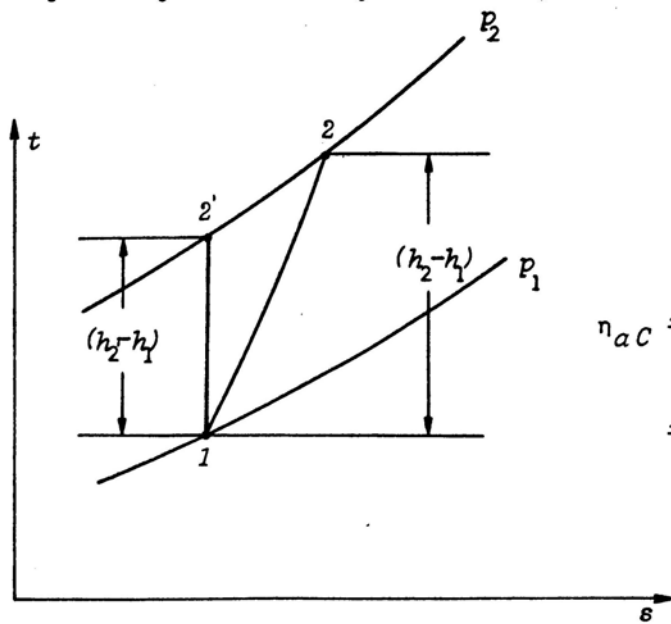
LA PRESENZA DI ATTRITI E QUINDI DISPERSIONI DI ENERGIA ALL'INTERNO DELLA MASSA FLUIDA PROVOCA DUE FENOMENI:

- LA COMPRESSIONE REALE NON E' ISOENTROPICA
- LA COMPRESSIONE REALE ASSORBE UNA MAGGIOR QUANTITA' DI LAVORO, A PARITA' DI RAPPORTO DI COMPRESSIONE ( $\beta = p_2 / p_1$ ), RISPETTO ALLA COMPRESSIONE IDEALE

SE LA MACCHINA E' PURE REALE, IL LAVORO ASSORBITO DALLA COMPRESSIONE E' ULTERIORMENTE INCREMENTATO DALLE DISPERSIONI PRESENTI NELLA MACCHINA STESSA

## RENDIMENTO ADIABATICO DI COMPRESSIONE

RAPPORTO FRA IL LAVORO NECESSARIO PER UNA COMPRESSIONE IDEALE E QUELLO NECESSARIO PER LA COMPRESSIONE REALE, A PARITA' DI RAPPORTO DI COMPRESSIONE



$$\eta_{ac} = \frac{h_{2'} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{c_{p2'}(t_{2'} - t_1)}{c_{p2}(t_2 - t_1)} = \frac{t_{2'} - t_1}{t_2 - t_1}$$

$$\eta_{ac} = l_{id} / l_r = (h_{2'} - h_1) / (h_2 - h_1) = (T_{2'} - T_1) / (T_2 - T_1)$$



## POTENZA DI UN COMPRESSORE

POTENZA IDEALE

$$P_i = G (h_2' - h_1)$$

G = PORTATA MASSICA (kg/h kg/s t/h .....

POTENZA REALMENTE FORNITA AL FLUIDO

$$P_r = G (h_2 - h_1) = P_i / \eta_{ac}$$

$\eta_{ac}$  = RENDIMENTO ADIABATICO DI COMPRESSIONE  
(70% - 85%)

TIENE CONTO DEL FATTO CHE NELLA TRASFORMAZIONE REALE GLI  
ATTRITI DEL FLUIDO CAUSANO UNA PERDITA DI ENERGIA

POTENZA MECCANICA ALL'ALBERO DEL COMPRESSORE

$$P_m = P_r / \eta_m$$

$\eta_m$  = RENDIMENTO MECCANICO (90% - 98%)

TIENE CONTO DELLE PERDITE PER ATTRITO DELL'ALBERO DEL  
COMPRESSORE SUI PROPRI CUSCINETTI

POTENZA ELETTRICA ASSORBITA DAL MOTORE

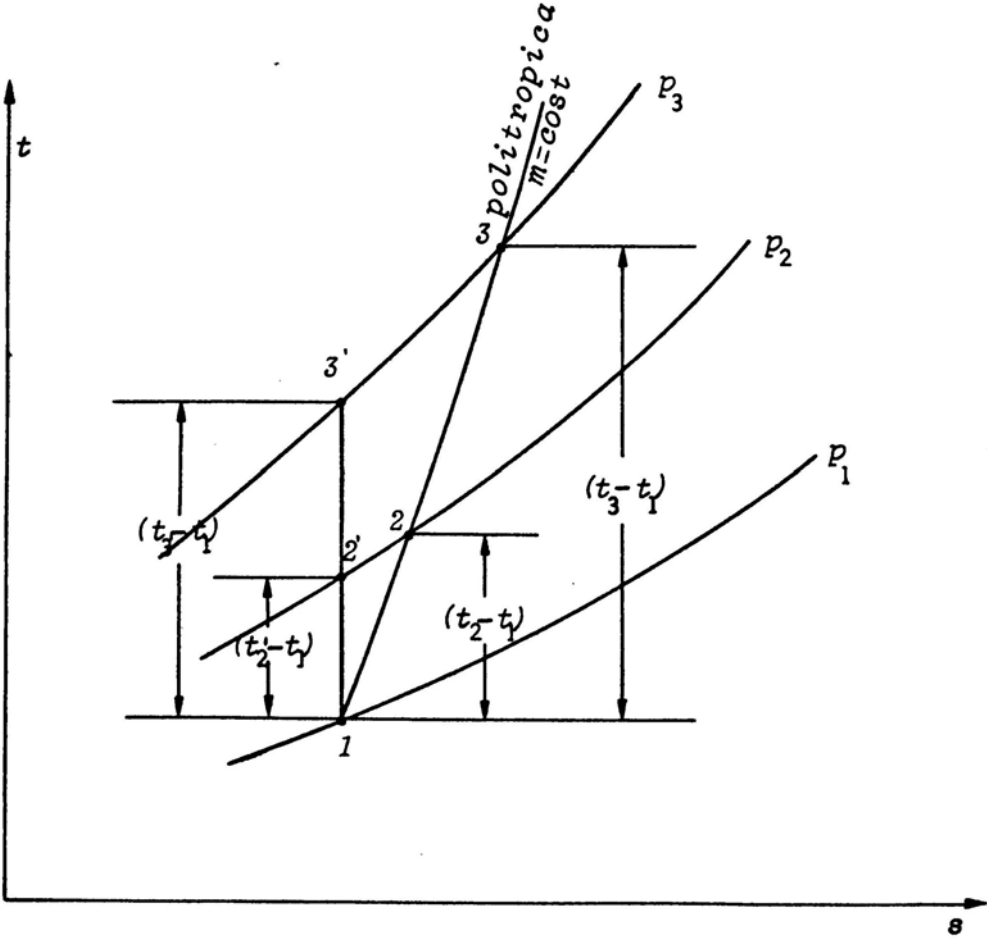
$$P_e = P_m / \eta_e$$

$\eta_e$  = RENDIMENTO ELETTRICO ( 90% - 97%)

ESPRIME IL RAPPORTO FRA L'ENERGIA MECCANICA ALL'ALBERO DEL  
MOTORE E L'ENERGIA ELETTRICA ASSORBITA DALLO STESSO

**RELAZIONE FRA RENDIMENTO ADIABATICO DI  
 COMPRESSIONE E RAPPORTO DI COMPRESSIONE**

$\eta_{ac}$  DIMINUISCE AL CRESCERE DI  $\beta$



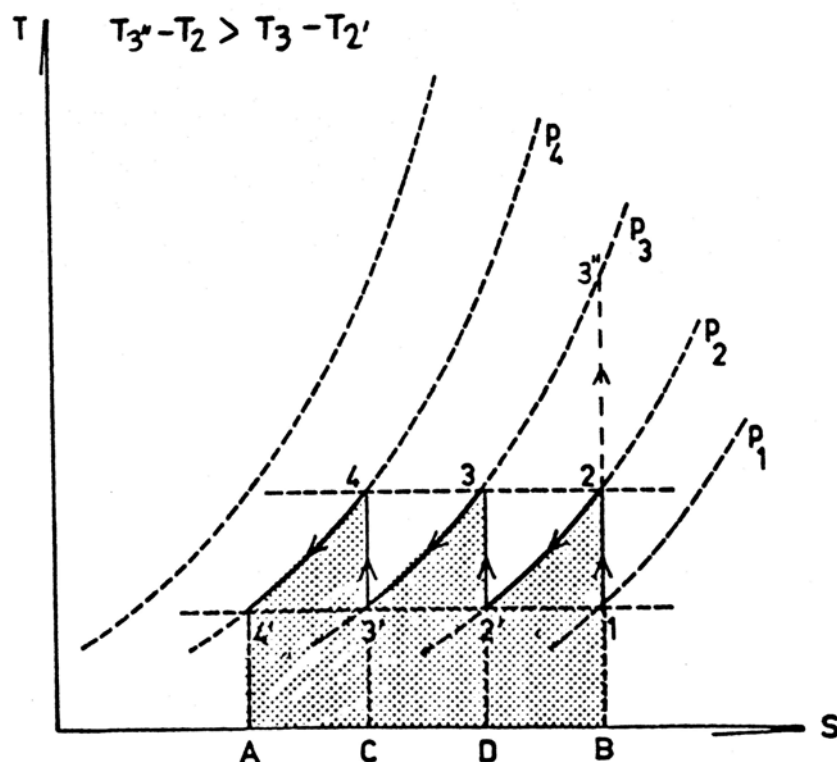
## **METODI PER DIMINUIRE IL LAVORO DI COMPRESSIONE**

1. DIVIDENDO LA COMPRESSIONE IN PIU' STADI (CIASCUNO DEI QUALI CON  $\beta = 2 - 5$ ) SI AUMENTA IL RENDIMENTO ADIABATICO DI COMPRESSIONE
2. ESEGUENDO UN'INTERREFRIGERAZIONE INTERMEDIA FRA I DIVERSI STADI, SI RIDUCONO LE TEMPERATURE ALLE QUALI AVVIENE LA TRASFORMAZIONE E QUINDI SI RIDUCE IL LAVORO NECESSARIO A PARITA' DI  $\beta$  DI STADIO

## INTERREFRIGERAZIONE INTERMEDIA

RAFFREDDANDO IL FLUIDO FRA I DUE STADI DI COMPRESSIONE, IL LAVORO TOTALE DI COMPRESSIONE E' MINORE RISPETTO A QUELLO NECESSARIO SENZA L'INTERREFRIGERAZIONE

LA DIFFERENZA E' DOVUTA AL FATTO CHE NEL PIANO T-S LE ISOBARE SONO DIVERGENTI, PER CUI, A PARITA' DI  $\beta$ , UNA COMPRESSIONE CHE PARTE DA UNA TEMPERATURA PIU' ELEVATA RICHIEDE UN LAVORO MAGGIORE



## **TIPOLOGIE DI COMPRESSORI**

### **COMPRESSORI ALTERNATIVI (A PISTONI)**

SONO ADATTI PER RAPPORTI DI COMPRESSIONE DI STADIO ELEVATI E PER PORTATE CONTENUTE

IL FLUSSO NON E' CONTINUO, PER CUI RICHIEDONO UNO STABILIZZATORE DI PRESSIONE A MONTE E UNO A VALLE

### **COMPRESSORI CENTRIFUGHI**

SONO ADATTI PER RAPPORTI DI COMPRESSIONE DI STADIO PIU' CONTENUTI E PER PORTATE ELEVATE

### **COMPRESSORI A VITE**

SONO ADATTI PER RAPPORTI DI COMPRESSIONE DI STADIO ELEVATI (COME I COMPRESSORI ALTERNATIVI) E PER PORTATE ELEVATE (COME I COMPRESSORI CENTRIFUGHI)

## ESPANSORE

E' UNA MACCHINA MOTRICE A FLUSSO CONTINUO (O ASSIMILABILE A TALE), NELLA QUALE IL FLUIDO SUBISCE UNA RIDUZIONE DI PRESSIONE, CEDENDO ENERGIA MECCANICA, CHE VIENE RACCOLTA ALL'ALBERO DELL'ESPANSORE STESSO

L'ESPANSIONE AVVIENE SENZA APPREZZABILI SCAMBI DI ENERGIA TERMICA CON L'ESTERNO, DATO IL BREVE TEMPO DI PERMANENZA DEL FLUIDO ENTRO LA MACCHINA, PER CUI PUO' ESSERE CONSIDERATA ADIABATICA

$$\ell = h_2 - h_1 \quad (2 = \text{USCITA} - 1 = \text{INGRESSO})$$

E' UNA MACCHINA MOTRICE PER CUI  $\ell$  RISULTA NEGATIVO

SOLITAMENTE SI CONSIDERA IL VALORE ASSOLUTO DI  $\ell$ , CHE SI ESPRIME COME:

$$\ell = h_1 - h_2$$

## **TIPOLOGIE DI ESPANSORI**

### **ESPANSORI ALTERNATIVI (A PISTONI)**

SONO ADATTI PER RAPPORTI DI ESPANSIONE DI STADIO ELEVATI E PER PORTATE CONTENUTE

IL FLUSSO NON E' CONTINUO, PER CUI RICHIEDONO UNO STABILIZZATORE DI PRESSIONE A MONTE E UNO A VALLE

SONO IMPIEGATI MOLTO RARAMENTE

### **ESPANSORI CENTRIFUGHI (TURBINE)**

SONO ADATTI PER RAPPORTI DI ESPANSIONE DI STADIO PIU' CONTENUTI E PER PORTATE ELEVATE

SONO UTILIZZATI NELLA MAGGIOR PARTE DELLE APPLICAZIONI (TURBINE A VAPORE - TURBINE A GAS)

## **ESPANSORE IDEALE**

AVVIENE IN UNA MACCHINA IDEALE CHE OPERA SU UN FLUIDO IDEALE

NON ESISTONO ATTRITI E QUINDI DISPERSIONI DI ENERGIA ALL'INTERNO DELLA MASSA FLUIDA, E NEMMENO ATTRITI FRA LE PARTI DELLA MACCHINA

L'ESPANSIONE IDEALE E' ADIABATICA E ISOENTROPICA

L'ESPANSIONE IDEALE PRODUCE IL MASSIMO LAVORO POSSIBILE, A PARITA' DI RAPPORTO DI ESPANSIONE ( $\beta = p_1 / p_2$ )



## ESPANSIONE REALE

PUO' ESSERE REALE IL FLUIDO E/O LA MACCHINA

ANCHE L'ESPANSIONE REALE PUO' ESSERE CONSIDERATA ADIABATICA

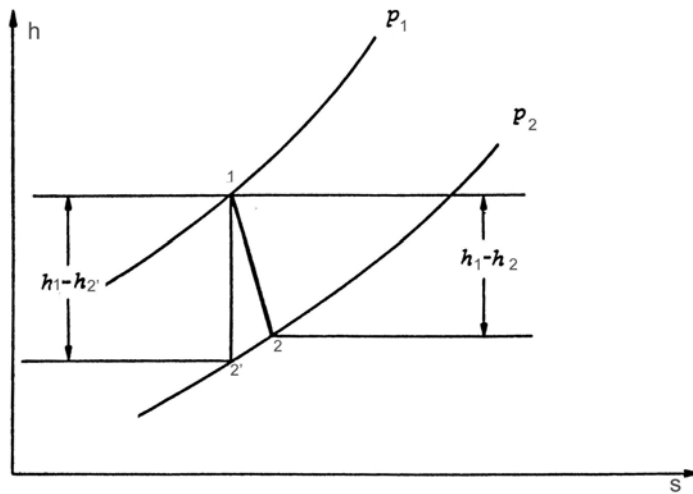
LA PRESENZA DI ATTRITI E QUINDI DISPERSIONI DI ENERGIA ALL'INTERNO DELLA MASSA FLUIDA PROVOCA DUE FENOMENI:

- L'ESPANSIONE REALE NON E' ISOENTROPICA
- L'ESPANSIONE REALE PRODUCE UNA MINOR QUANTITA' DI LAVORO, A PARITA' DI RAPPORTO DI ESPANSIONE, RISPETTO ALL'ESPANSIONE IDEALE

SE ANCHE LA MACCHINA E' REALE, IL LAVORO PRODOTTO DALL'ESPANSIONE REALE E' ULTERIORMENTE DIMINUITO DALLE DISPERSIONI PRESENTI NELLA MACCHINA STESSA

## RENDIMENTO ADIABATICO DI ESPANSIONE

RAPPORTO FRA IL LAVORO OTTENUTO DA UN'ESPANSIONE REALE E QUELLO OTTENIBILE DALL'ESPANSIONE IDEALE, A PARITA' DI RAPPORTO DI ESPANSIONE



$$\eta_{ae} = l_r / l_{id} = (h_1 - h_2) / (h_1 - h_{2'}) = (T_1 - T_2) / (T_1 - T_{2'})$$

## POTENZA DI UN ESPANSORE

POTENZA IDEALE

$$P_i = G (h_1 - h_2')$$

POTENZA REALMENTE FORNITA DAL FLUIDO

$$P_r = G (h_1 - h_2) = P_i \times \eta_{ae}$$

$\eta_{ae}$  = RENDIMENTO ADIABATICO DI ESPANSIONE  
(75% - 90%)

TIENE CONTO DEL FATTO CHE NELLA TRASFORMAZIONE REALE GLI  
ATTRITI DEL FLUIDO CAUSANO UNA PERDITA DI ENERGIA

## POTENZA DI UN ESPANSORE

POTENZA MECCANICA ALL'ALBERO DELL'ESPANSORE

$$P_m = P_r \eta_m$$

$\eta_m$  = RENDIMENTO MECCANICO (90% - 98%)

TIENE CONTO DELLE PERDITE PER ATTRITO DELL'ALBERO  
DELL'ESPANSORE SUI PROPRI CUSCINETTI

POTENZA ELETTRICA PRODOTTA DAL GENERATORE ELETTRICO  
ACCOPIATO ALL'ESPANSORE

$$P_e = P_m \eta_e$$

$\eta_e$  = RENDIMENTO ELETTRICO ( 90% - 97%)

ESPRIME IL RAPPORTO FRA L'ENERGIA ELETTRICA PRODOTTA DAL  
GENERATORE E L'ENERGIA MECCANICA ALL'ALBERO DELL'ESPANSORE

## **TRASFORMAZIONE POLITROPICA**

OGNI TRASFORMAZIONE ADIABATICA REALE, CHE AVVIENE CON AUMENTO DI ENTROPIA, E' DESCRIVIBILE TRAMITE UN'EQUAZIONE (DETTA POLITROPICA) DEL TIPO:

$$pV^m = \text{COSTANTE}$$

PER LE ESPANSIONI  $m < k = C_p/C_v$

PER LE COMPRESSIONI  $m > k = C_p/C_v$

IL CALCOLO DELLA TRASFORMAZIONE SEGUENDO L'EQUAZIONE DELLA POLITROPICA PORTA DIRETTAMENTE AL RISULTATO CHE SI OTTERREBBE CONSIDERANDO PRIMA L'ADIABATICA IDEALE E POI APPLICANDO IL RENDIMENTO ( $\eta_{ac}$  OPPURE  $\eta_{ae}$  A SECONDA DELLA TRASFORMAZIONE)

**RELAZIONE FRA RENDIMENTO ADIABATICO DI COMPRESSIONE O ESPANSIONE E RAPPORTO DI COMPRESSIONE O ESPANSIONE**

$\eta_{ac}$  E  $\eta_{ae}$  DIMINUISCONO AL CRESCERE DI  $\beta$