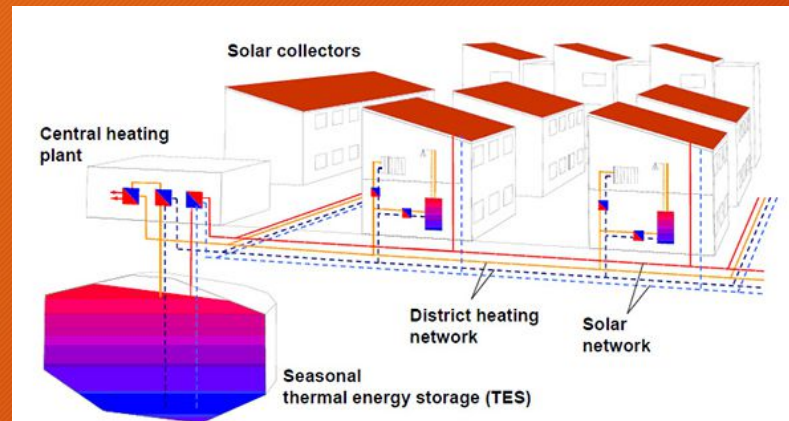
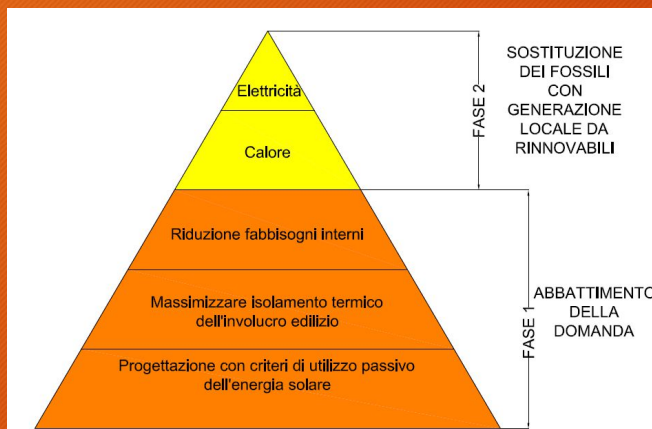


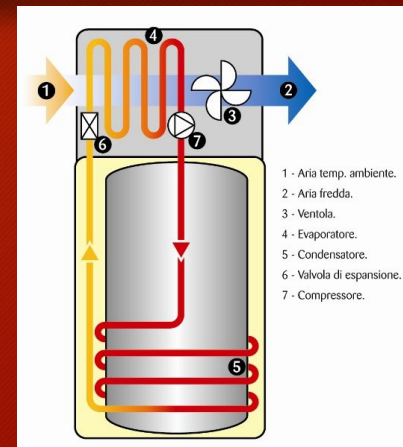
# Energia, entropia, efficienza energetica



I.I.S. CASTELLI  
BRESCIA  
A. S. 2015-16  
Progetto POF n. 20  
v. 1.0



Corso introduttivo  
a cura di Massimo Cerani



# Programma

2

## OBIETTIVI

- E' un corso introduttivo;
- Si affrontano gli aspetti termomeccanici, non quelli chimici relativi alle combustioni

## MATERIALI INTEGRATIVI

- Mappa concettuale sul calore
- Dimostrazioni degli enunciati di R. Clausius e loro implicazioni

### ◦ 1° UNITA'

- dal primo al secondo principio: qualcosa non si conserva!

### ◦ 2° UNITA'

- Entropia ed exergia:
- Non tutta l'energia è "energia disponibile"

### ◦ 3° UNITA'

- Efficienza di alcune macchine e sistemi energetici

### ◦ 4° UNITA'

- Secondo principio e interazioni delle macchine con l'ambiente

•

# 1° UNITA'

## *alcune definizioni*

3

Nella termodinamica classica si studiano sistemi composti da materia sottoforma gassosa, solida o liquida, e le loro interazioni con l'ambiente:

- termo-meccaniche
- chimiche

Si tratta di sistemi continui, analizzati da un punto di vista macroscopico. Gli scambi di energia in tali sistemi sono su scala microscopica (calore) e macroscopica (lavoro).

I sistemi si individuano arbitrariamente in base ad un contorno convenzionale o reale.

Di solito si distinguono in:

- sistemi chiusi (non scambiano massa con l'ambiente)
- sistemi aperti (scambiano massa)
- Isolati (non scambiano né massa né energia)

I primi si analizzano utilizzando la MASSA DI CONTROLLO, ossia individuando un contorno corrispondente alla massa, costante; i secondi si analizzano con il metodo del VOLUME DI CONTROLLO, ossia individuando un contorno chiuso di dato volume, che permette l'analisi dei flussi di massa ed energia che transitano attraverso il volume.

# 1° UNITA'

## *alcune definizioni*

4

Lo stato termodinamico è descritto dalle grandezze:

$P, V, T$

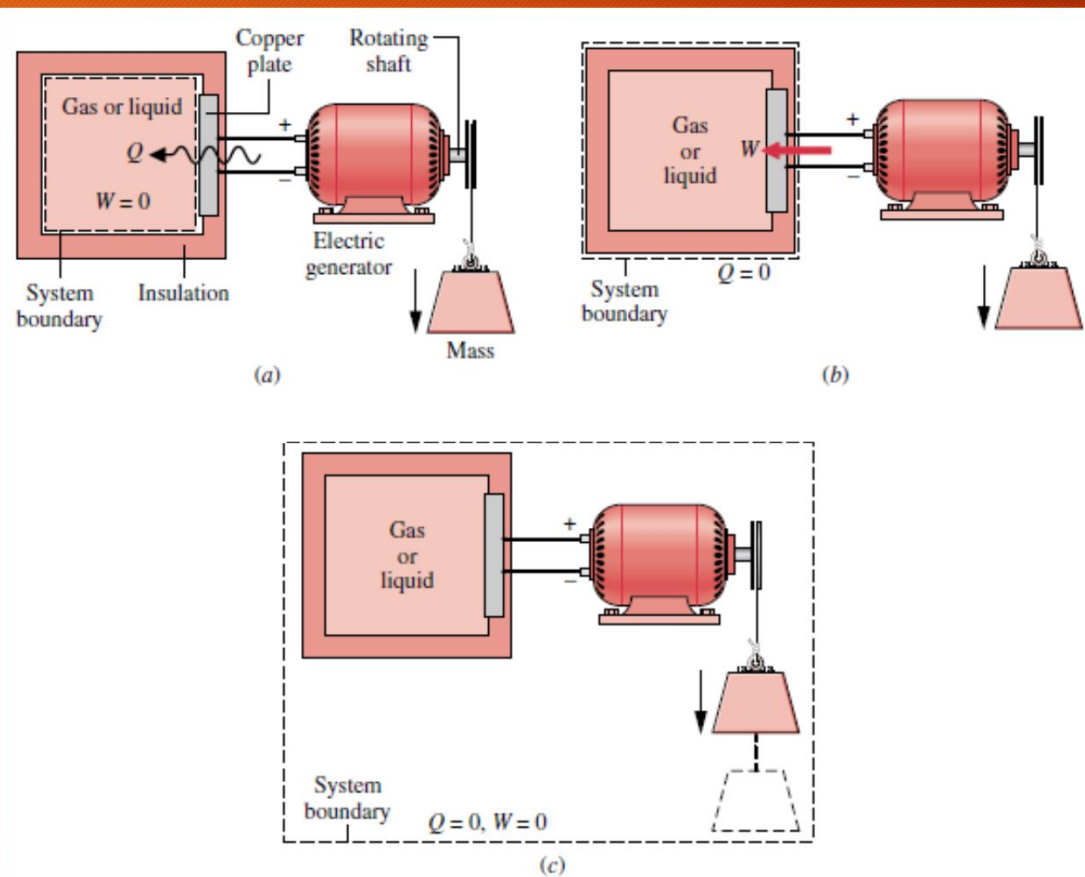
Le grandezze non sono indipendenti quindi si può esprimere lo stato con:

$$F(p, V, T) = 0$$

Detta «equazione di stato»

# 1° UNITA' esempi

5



Differente collocazione del confine di un sistema

# 1° UNITA'

## *cos'è l'energia?*

6

### Formulazione scolastica

### capacità di compiere lavoro

Formulazione secondo la Larousse encyclopédique e  
Encyclopaedic dictionary of physics

capacità o attitudine a produrre 'effetti' della natura più svariata quali: aumento di temperatura di un corpo, deformazione di un corpo, spostamento di un corpo, ecc. e, in particolare, lavoro.

### Formulazione secondo Enciclopedia del '900

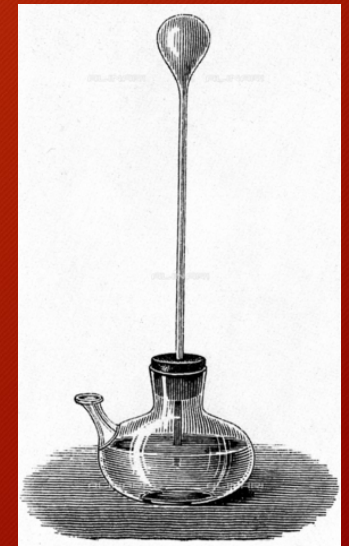
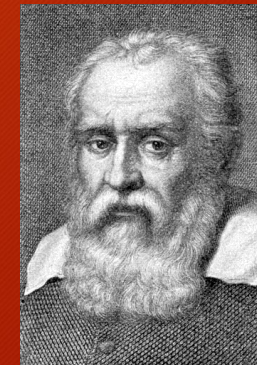
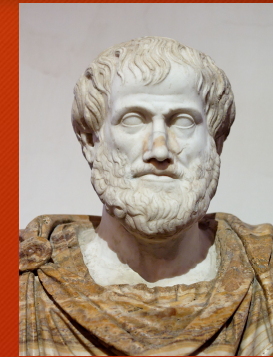
l'energia è un agente o elemento soggetto alla legge di conservazione e suscettibile di trasformazione in varie forme fisicamente omogenee fra loro, ad esempio lavoro e calore. Sotto certe condizioni, materia ed energia sono tramutabili l'una nell'altra in base alla relazione di equivalenza di Einstein

# 1° UNITA'

## la teoria del calore

7

Quando	Chi	Cosa	Note/documenti di riferimento
350 a.c.	350 a.c.	Aristotele	La vita dipende dal calore, ed è alla base dell'alimentazione, sensi, movimento, pensiero Pone assieme ai 4 elementi fondamentali della natura, il calore come quintessenza, per spiegare alcuni fenomeni termici
		Antica Grecia	<b>Prima teoria del calore:</b> Calore è ciò che produce sensazione di caldo Le esperienze comuni mostrano che non è così: esperienza delle mani nell'acqua fredda e calda, e poi in quella tiepida: sensazioni differenti! Democrito: esistono gli atomi di caldo e di freddo
			<b>2° teoria del calore:</b> quando entra nel corpo produce sensazione di caldo, quando esce una produce una sensazione di freddo E' accettata fino al 1592, quando Galilei inventa il termoscopio
1592	1592	G. Galilei	<b>3° teoria del calore:</b> il calore è ciò che modifica l'altezza della colonna del termoscopio ad aria. Prima teoria oggettiva, basata su misurazioni. Galilei crede che si tratti di particelle infinitesime in moto di agitazione.

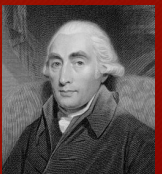
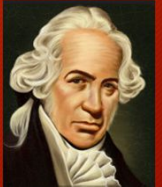


# 1° UNITA'

## la teoria del calore

8

1644	Cartesio	Si tratta del moto di particelle piccolissime contenute nei corpi	
1650-1670	Newton	Il carattere generale dell'universo sembra reversibile. L'universo è un gigantesco pendolo che oscilla all'infinito?	Processi reversibili e irreversibili
1700	filosofi naturali e chimici	Le interpretazioni scientifiche sono fondate sulla visione giudaico cristiana: l'universo è un sistema perfetto e immutabile, che contiene il suo creatore. Newton sostiene che il calore derivi dal moto vibratorio delle parti interne dei corpi (Optics, 1704). I chimici ritengono di aderire alla teoria sostanzialistica, riferendosi alle antiche concezioni greche.	In realtà si constata che non c'è una completa reversibilità. Tra i fenomeni irreversibili 2 hanno attinenza col calore: Q va dai corpi caldi a quelli freddi (asimmetria!); l'attrito trasforma L in Q ma non accade mai il contrario. Prove che il sistema universo si degrada e invecchia.
1714	Daniel Fahrenheit	Invenzione del primo termometro standardizzato a mercurio, funzionante tra -40 e + 626°C	Il riferimento zero è la t di congelamento dell'acqua salata, quindi la solidificazione dell'acqua pura risulta a 32°C e l'ebollizione a 212
1738	Daniel Bernoulli	Sviluppa una teoria cinetica dei gas: in calore è moto interno di particelle dei gas.	"Hydrodinamica"
1742	Anders Celsius	L'astronomo svedese inventa una scala più semplice	0°C per ebollizione e 100°C per congelamento. Dopo varie critiche, inverte i valori. Nei decenni successivi nascono i primi centri di meteorologia.
1760	Joseph Black	Chimico scozzese, esegue esperimenti sul riscaldamento di sostanze diverse, controllandone le T. che sono diverse anche se le sostanze hanno ricevuto la stessa quantità di Q. Il calore è un fluido invisibile, privo di peso, indistruttibile. Ogni sostanza ha una diversa capacità di trattenerlo. Si formula la <b>4° teoria del calore</b> : il CALORICO. Il calore è un fluido calorico invisibile, privo di peso, indistruttibile.	E' messo in crisi il concetto di termometro. Col calorimetro è spiegato che il calorico fa aumentare la T misurata dal termometro.



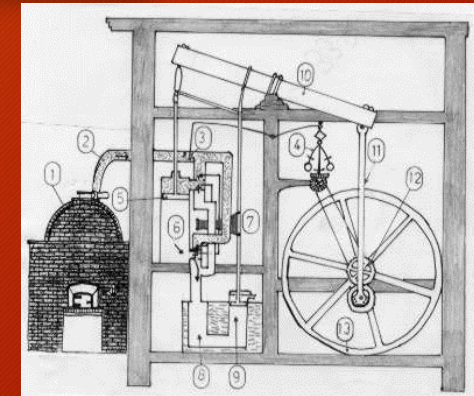
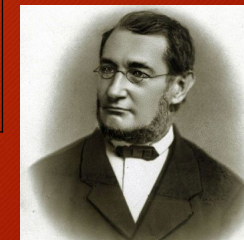
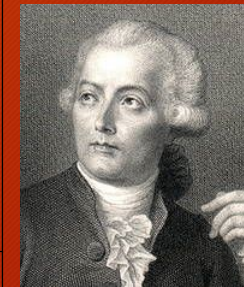
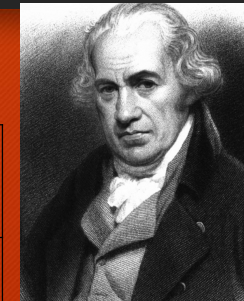


# 1° UNITA'

## la teoria del calore

9

1764	James Watt	Progressi nella fabbricazione della macchina a vapore	
1775	Antoine Lavoisier	Chimico francese, con un calorimetro scopre come il corpo umano si mantiene a T costante.	Il corpo è una specie di macchina, che per combustione chimica produce il calore che lo tiene in vita. Correla la respirazione con il calore prodotto dagli animali. La camera di combustione del corpo umano non sta nel cuore ma nei polmoni. Gli alimenti hanno assorbito energia nella loro crescita, e tale energia è liberata dalla combustione interna della persona che se ne è alimentata.
1814	Julius Mayer	nascita	Scuola teologica protestante, e facoltà di medicina. Studi e formulazione di una teoria sulla origine dell'universo: tutto nasce da un'unica forza, "causa" . In seguito si scinde in numerose forze diverse.



# 1° UNITA'

10

La formulazione scolastica dell'energia non è agevolmente applicabile, e può portare fuori strada. Un gas in un cilindro può sviluppare lavoro meccanico, se riscaldato, ma possiede energia anche se fosse bloccata l'espansione, visto che l'energia fornita dall'esterno ne aumenta l'energia interna (e quindi la sua temperatura)

L'energia totale per un sistema termo meccanico può essere espressa come:

$$E_{tot} = U + E_c + E_p$$

L'energia totale di un sistema è la somma di 3 tipi di energia: Interna, cinetica, potenziale. La prima è energia su scala microscopica, legata ai moti di traslazione, rotazione, vibrazione delle molecole. Ma dipende anche dall'energia potenziale delle stesse molecole, costituita dall'energia chimica di legame. U non è visibile direttamente ma tramite le variazioni di T. Le esperienze di Joule ad inizi '800 hanno dimostrato che  $U = U(T)$  per i gas ideali.

Le altre due sono di tipo macroscopico, una legata alla velocità media del sistema e una alla sua energia di posizione nel campo gravitazionale.

U= energia interna= energia su scala molecolare=  
 $E_c + E_p = \frac{3}{2} * k * T + E_p$   
Con T= temperatura assoluta

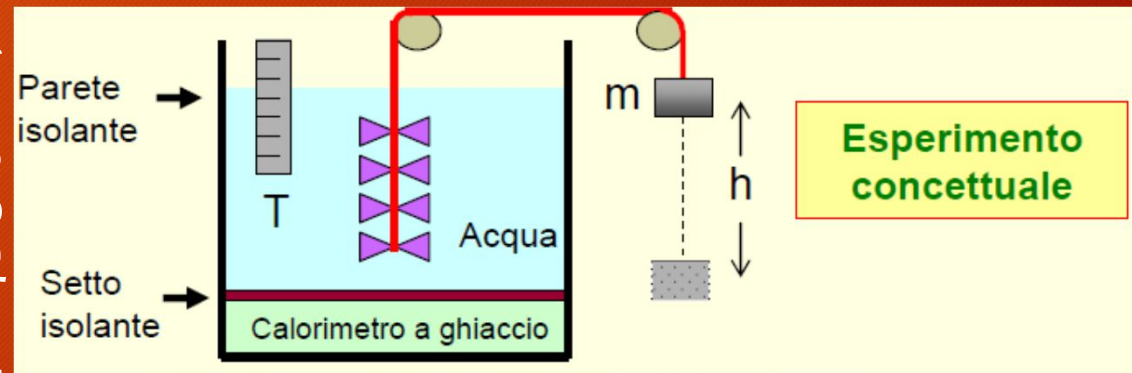
# 1° UNITA'

11

Le interazioni termomeccaniche tra un sistema chiuso e l'ambiente esterno possono essere solo di due tipi: calore e lavoro meccanico. Le esperienze condotte nell'800 hanno mostrato che l'energia totale del sistema si conserva.

Dopo che la massa in caduta ha fatto ruotare il mulinello, rileviamo un lieve incremento di  $T$ . Togliendo il setto isolante, cediamo  $Q$  al calorimetro, e in base alla massa di ghiaccio fusa possiamo determinarne il valore.

Se ripetiamo l'esperimento variando  $W$ , otteniamo un rapporto  $W/Q$  costante e pari a 4,186.



# 1° UNITA' il primo principio

12

In una trasformazione ciclica (passo da  $T_i$  a  $T_f$  e poi ritorno a  $T_i$ ) utilizzando una unica unità di misura per l'energia, otteniamo:

Anche se cambio calore e lavoro scambiati, si ottiene sperimentalmente sempre che:

$(Q-W)$  esprime una nuova grandezza che non dipende dal tipo di trasformazione compiuta ma solo dagli stati iniziale e finale, ossia è una funzione di stato. Questa nuova funzione è definita: "ENERGIA INTERNA" "U"

Poiché calore e lavoro sono flussi di energia in transito, il bilancio energetico può essere ora riscritto come segue:

$$Q = W \text{ ossia } Q - W = 0$$

$$Q - W = \text{COSTANTE}$$

$$U_2 - U_1 = Q - W$$

1° principio della TD

# 1° UNITA'

13

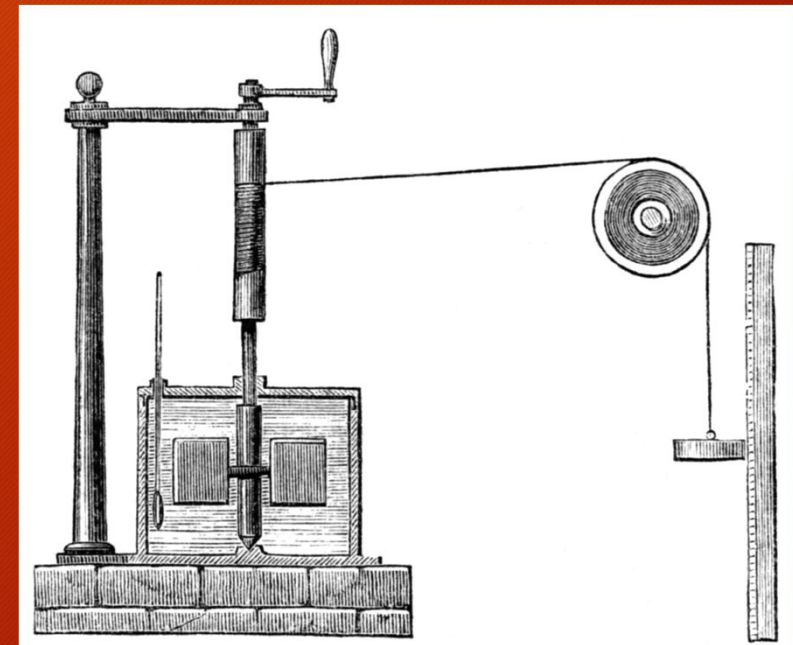
Con le esperienze condotte Joule giunse ad una formulazione alternativa del Primo principio:

Osservando trasformazioni adiabatiche, si rese conto che il lavoro scambiato non dipendeva dal percorso compiuto nella trasformazione, ma dagli estremi.

Dedusse che tale lavoro doveva corrispondere alla variazione di una funzione di stato, che noi chiamiamo

ENERGIA INTERNA

$$U_2 - U_1 + L = 0$$



# 1° UNITA'

## il primo principio

14

Nei sistemi meccanici conservativi vale la relazione:

$$\Delta E_p = -L$$

L è una funzione di stato (dipende solo dai punti iniziale e finale)

In un sistema termodinamico gli scambi di energia con l'esterno, ne modificano l'energia interna

$$\Delta U = \Delta E$$

Ma in generale L non è una funzione di stato: L dipende dal percorso compiuto tra lo stato iniziale e finale. Pertanto  $\Delta E$  deve contenere oltre a L anche un altro tipo di energia, anch'essa non funzione di stato. Questa forma di energia è Q, il calore.

# 1° UNITA'

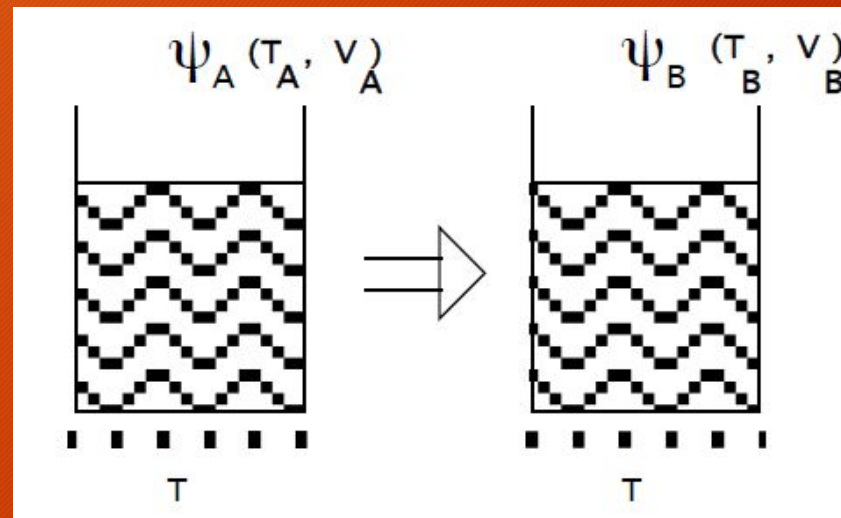
## il primo principio

15

Ipotezziamo di scaldare il recipiente dalla condizione A alla condizione B, con  $T_A < T_B$ . Il sistema non modifica il suo volume, quindi non è scambiato lavoro

$$\Delta U = Q$$

$$L = 0$$

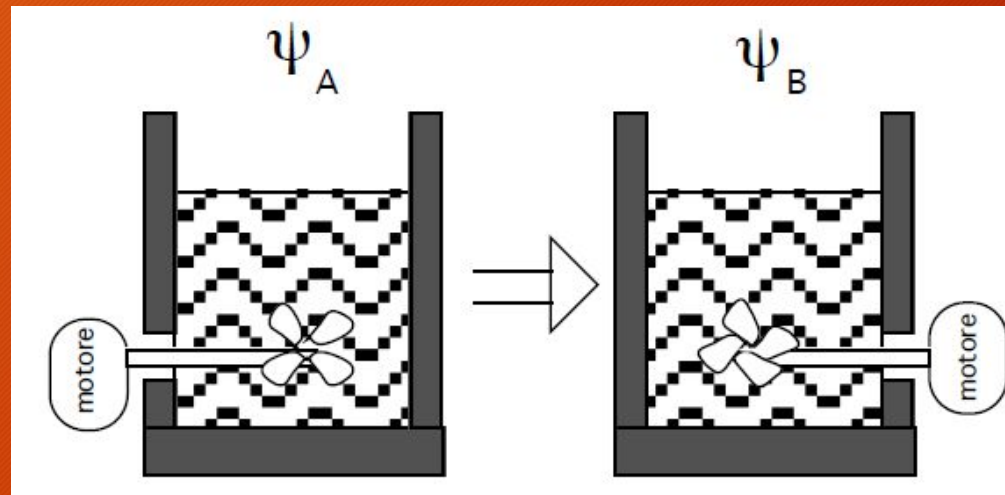


# 1° UNITA' il primo principio

16

Nella seconda parte dell'esperimento, rendiamo il dispositivo adiabatico, e forniamo energia tramite un mulinello Mosso da un motore. Partiamo dalla stessa condizione iniziale A e ci fermiamo nella stessa condizione finale B. In Tal caso:

$$\Delta U = -L$$
$$Q = 0$$





# 1° UNITA'

## il primo principio

17

### CONCLUSIONI

1. Il lavoro svolto tra gli stessi stati termodinamici è differente (quindi L non è funzione di stato)
1. Si può postulare sulla base di quest'esperienza che vale la relazione:

$$\Delta U + L = Q$$

Formulazione completa:

tenendo conto anche delle energie meccaniche già note, cinetica e potenziale.

$$E_2 - E_1 = \Delta E_c + \Delta E_p + \Delta U = Q - W$$

N.B. Calore e lavoro non sono funzioni di stato: per tali grandezze è essenziale conoscere il percorso compiuto tra due stati di una trasformazione.

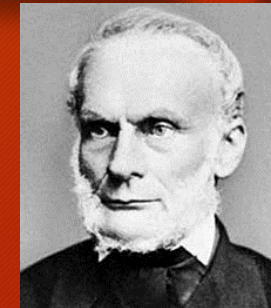
$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$$

In forma di bilancio di potenze:

# 1° UNITA'

19

1822	Rudolf Clausius	Nascita	
	Sadi Carnot	Ultima la sua opera principale: "riflessioni sulla forza motrice del calore". Per la sconfitta della Francia a opera dell'Inghilterra, forte desiderio di rivalsa e desiderio di lavorare per superare le macchine a vapore GB, più efficienti. Conduce prima di Joule gli esperimenti che determinano l'equivalente termico del lavoro meccanico.	Tra '700 e inizi '800 è convinzione comune che il lavoro prodotto dalla macchina a vapore dipende dalla $t_{max}$ in caldaia. Anche Carnot è influenzato dalla teoria del calorico. Dagli studi sulle macchine arriva alla conclusione che il rapporto tra $L$ fornito e $Q$ entrante non dipende in una macchina ideale dal fluido utilizzato ma solo dalle $T$ delle due sorgenti ( un enunciato del 2° P. della TD)
1833	W. Herschel	Astronomo, il calore fornisce energia a tutte le forme di vita. Il sole emette un flusso di energia che è causa della vita sulla terra. E' la causa anche delle turbolenze atmosferiche.	
	T. Young	Studi sull'interferenza della luce. La luce ha natura ondulatoria; gli studi di Herschel sulle analogie tra luce e calore radiante lo portano a sostenere che il calore è un moto vibratorio delle particelle dei corpi.	
	A.M. Ampere	Si fonda sugli studi di Fresnel che confermano la natura ondulatoria della luce; sulla analogia tra luce e calore radiante. Sostiene che l'unica interpretazione plausibile del calore sia di tipo cinetico.	1832: "idees sur la chaleur et la lumiere"



Rudolf Clausius



Sadi Carnot

# 1° UNITA'

20

1840	R. Clausius	Scuole superiori laiche: formazione scientifica e slancio verso studi scientifici universitari. Grande interesse per le macchine termiche ed il calore. Entra all'università di Berlino.	
1842	J. Mayer	Scopre l'equivalenza tra calore e lavoro, ed enuncia per la prima volta il principio di conservazione dell'energia, noto come 1° P. della TD.	L'energia totale dell'universo si mantiene costante, ma le forme di energia si convertono incessantemente le une nelle altre. La sua teoria del mondo naturale non è presa in considerazione in quanto contrasta con la teoria del calorico, che è indistruttibile. Secondo i suoi critici è il calore che si conserva!
1844	R. Clausius	conclude studi universitari e inizia corso di specializzazione ad Halle. Ricerche su prime invenzioni cinesi di rudimentali macchine frigorifere. Studio dei testi di Carnot.	Principio di Carnot: il L non dipende solo da $t_{max}$ , ma anche dal $DT$ tra caldaia e condensatore, quindi una macchina termica è paragonabile ad una ruota di mulino: maggiore il dislivello di T, maggiore il L compiuto.
		Le macchine richiedono non una sorgente di Q, ma un flusso, che entra ed esce; deve esserci anche una sorgente fredda! Esegue verifiche su macchine reali: rendimenti sempre molto inferiori (1/20).	Prime ipotesi: la macchina idealizzata da Carnot è ideale, ossia a moto perpetuo. Ci sono gli attriti.

In meccanica il lavoro fatto in un campo di forze conservative ( senza dissipazioni) è dato da

$$W = \Delta V$$

Ove  $V$  è l'energia potenziale. Se le forze non sono conservative, come in presenza di attriti, non vale il principio di conservazione dell'energia meccanica.

Il 1° principio della TD ristabilisce la legge di conservazione, introducendo un'altra forma attraverso cui può essere scambiata energia: il CALORE.

Si usa esprimere il primo principio anche in forma differenziale in questo modo:

$$dE = \delta Q - \delta W$$

La lettera delta esprime il fatto che a destra abbiamo due differenziali non esatti: il loro valore in una trasformazione dipende dal tipo di percorso compiuto.

Se una funzione può essere espressa anche come somma delle derivate prime rispetto alle sue variabili, allora il suo integrale esiste e dipende solo dai punti iniziale e finale ossia è uguale a  $f(x_2, y_2) - f(x_1, y_1)$ . Se così non è, il differenziale è integrabile ma non equivale alla funzione di partenza.

# 1° UNITA'

23

Il lavoro in una trasformazione termodinamica si ricava ad esempio dall'espansione di un gas in un cilindro: se  $p$  e  $p_a$  sono diversi, la superficie di separazione si muove. Il lavoro vale:

$$\delta W = p * S * dh = p^* dV$$

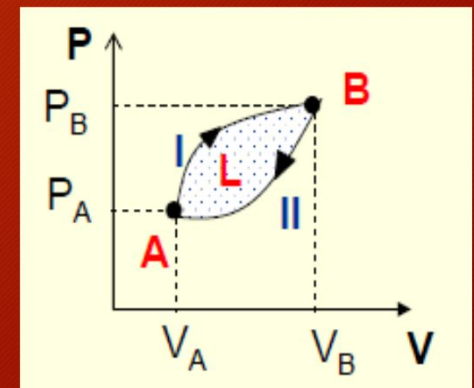
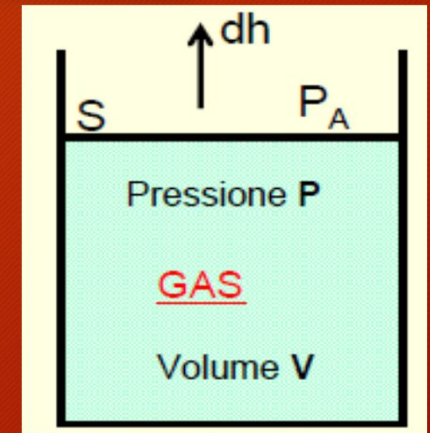
Integrando si ottiene:

[6]

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p * dV$$

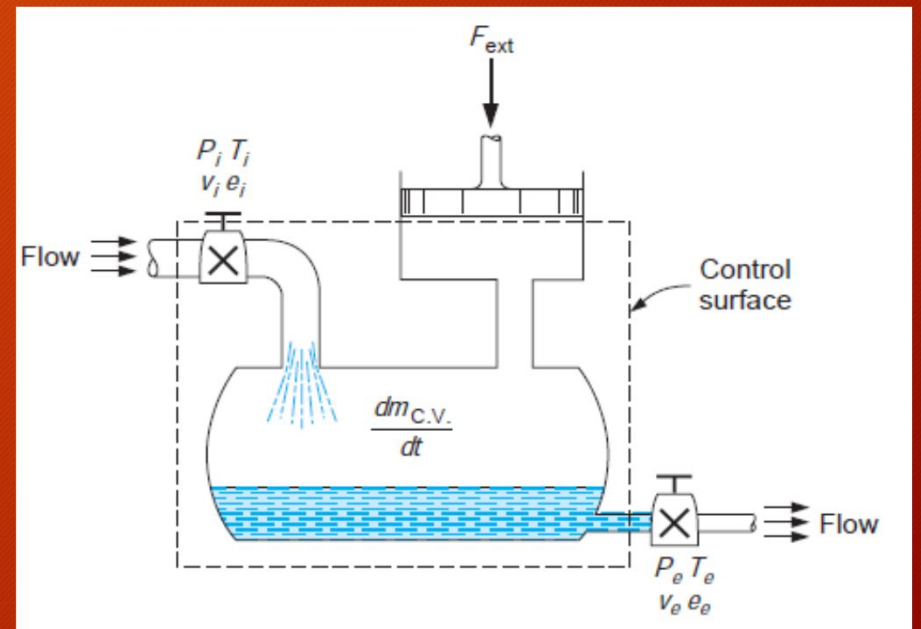
Il lavoro è diverso se seguo un percorso differente tra due stati termodinamici: un ciclo chiuso tra tali 2 stati avrà un'area racchiusa all'interno equivalente al lavoro prodotto dal ciclo.

Ma per il 1° principio,  $Q-W=0$ , poiché ritornando al punto iniziale  $\Delta U=0$ . Quindi in un ciclo chiuso, la somma dei calori scambiati equivale al lavoro prodotto.



## PRIMO PRINCIPIO PER I SISTEMI APERTI

Nelle applicazioni tecnologiche si ricorre a sistemi aperti. Un sistema aperto vede più scambi di energia sul suo contorno. Attraverso il contorno scorrono portate, massiche/volumiche, ed un fluido in generale ha una potenza meccanica che dipende anche dalla sua pressione. Possono esservi accumuli di massa, di energia.





## PRIMO PRINCIPIO PER I SISTEMI APERTI

Portate

$$\dot{V} = A * v = \text{portata volumetrica}$$

$$\dot{m} = \rho * A * v = \text{portata massica}$$

Potenza di pompaggio

$$W_f = p * \dot{V} = \dot{m} * \frac{p}{\rho} = \text{potenza meccanica del flusso}$$

Come tener conto dell'energia associata alla pressione del fluido?

Con l'entalpia:  $h = u + pv$

L'entalpia tiene conto dell'energia totale di un fluido, interna e di pompaggio, quindi molto utilizzata nello studio delle macchine

## PRIMO PRINCIPIO PER I SISTEMI APERTI

Nell'ipotesi che il sistema si trovi in condizioni stazionarie, senza accumulo di masse ( $\dot{m} = 0$ ) o di energia al suo interno ( $\dot{E} = 0$ ) e definita l'entalpia totale come:

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2}v^2 + gZ \quad [7]$$

l'equazione di conservazione della massa e di conservazione dell'energia si scrivono come segue:

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e$$

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_i h_{tot,i} = \dot{W} + \sum \dot{m}_e h_{tot,e} \quad [8]$$

Conclusioni: in base al 1° principio, abbiamo una perfetta simmetria tra la forma di energia “calore” e la forma “lavoro”.

Entrambi possono essere integralmente trasformati uno nell'altro.

Tale simmetria tuttavia non si verifica in natura: tutto il lavoro può dissiparsi in calore, ma non si verifica il contrario.

Non tutte le trasformazioni che soddisfano il 1° principio possono avvenire.

Se poniamo due corpi a T diverse a contatto, in un contenitore perfettamente adiabatico ( $Q=0$ ) e il sistema non scambia lavoro,  $\Delta U=0$ .

L'energia interna rimane costante. Ma se ripetiamo l'esperimento concettuale partendo dai due corpi alla stessa T, in base al 1° principio possiamo aspettarci dopo un certo tempo di trovarne uno a T superiore all'altro. Anche in questo caso  $\Delta U = 0$  !

Eppure l'esperienza ci dice che questa trasformazione elementare non avviene spontaneamente.

**Per descrivere in modo completo i sistemi termodinamici, il 1° principio non è sufficiente.**

## Trasformazioni reversibili

Definiamo trasformazione reversibile ogni trasformazione costituita da un insieme di stati che differiscono per quantità infinitesime da uno stato d'equilibrio.

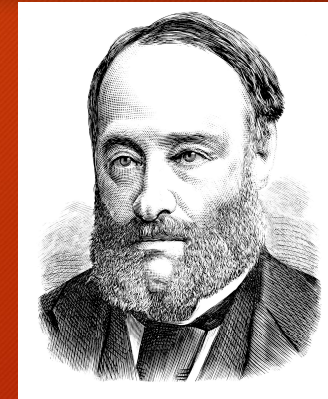
Si noti che per realizzare praticamente delle trasformazioni reversibili bisogna modificare molto lentamente le condizioni esterne. Per ogni trasformazione reversibile  $T$  esiste la trasformazione inversa  $-T$ .

- Cosa rende una trasformazione non reversibile?
- Attriti
- Espansioni libere
- Scambi termici sotto differenze finite di temperatura
- Miscelazione (di gas o liquidi)
- Reazioni chimiche, isteresi magnetica, etc.
  
- Esistono due enunciati storici ed equivalenti del 2° principio: quello di Clausius
- *“è impossibile realizzare una trasformazione termodinamica che come unico risultato ha il passaggio di calore da un corpo a  $T$  inferiore ad uno a  $T$  superiore”*
- quello di Kelvin-Planck:
- *“è impossibile realizzare una trasformazione termodinamica il cui unico risultato è quello di assorbire calore da una sola sorgente e di trasformarlo integralmente in lavoro”*

# 1° UNITA'

30

1848	R. Clausius	prime elaborazioni sull'evoluzione dell'universo: si può invertire il processo spontaneo di degradazione invecchiamento? Se si, newton aveva ragione, l'universo è una macchina perpetua.	Gli viene conferito il dottorato in campo scientifico.
	James Joule	Scienziato dilettante, inglese, impressionato dalle coperte sull'elettricità di Faraday, scopre che l'elettricità scalda i fili in cui scorre e perde parte della propria forza.	Attrito? Comincia a scricchiolare la teoria del calorico: è proprio indistruttibile? Scontro con Mayer, che rivendica di aver messo in discussione il calorico prima di lui.
1850	R. Clausius	Pubblica un saggio sulla forza motrice del calore, in cui unifica le teorie di Mayer e le osservazioni di Joule. <b>5° teoria del calore:</b> l'energia è l'entità indistruttibile, non il calore. Il principio di Carnot non è annullato ma va reinterpretato. Non c'è un fluido invisibile che continua a circolare nella macchina a vapore: invece c'è calore che è convertito in parte in lavoro e in parte è scaricato, sprecato. La somma delle energie è zero.	Il calore ed il lavoro sono due aspetti dello stesso fenomeno, che poi sarà definito energia ( suggerito da Thomson). L'energia si esprime in molte forme, ma non cambia l'energia totale dell'universo. PRINCIPIO DI CONSERVAZIONE DELL'ENERGIA. $\Delta E_{universo} = 0$ . Studi sull'energia solare.



James Joule

# 1° UNITA'

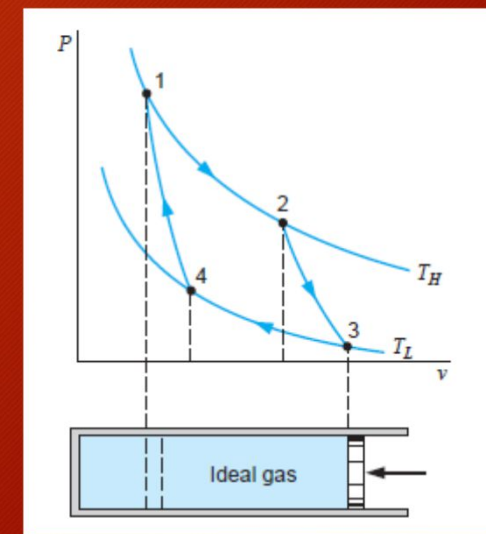
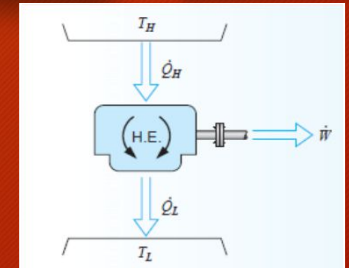
31

1851	L. Kelvin	Sostiene la teoria cinetica del calore, confuta la concezione del calorico.	"On the dynamical theory of heat"
1854	R. Clausius	Cattedra alla scuola politecnica di Zurigo. Introduce una nuova formulazione: le variazioni di energia e di temperatura sono due aspetti dello stesso fenomeno: variazioni di una nuova grandezza, che chiama ENTROPIA. Si conserva come l'energia? Compie varie analisi e verifica che $DS > 0$ sempre; con ciò spiega il comportamento irreversibile del calore. Esprime tra gli altri l'enunciato: $TdS - dQ \geq 0$ che è considerato un altro enunciato del 2° P. TD per trasf. reversibili e irreversibili.	Introduce una contabilità: $S > 0$ se le variazioni di energia e T sono associate a trasformazioni spontanee; $S < 0$ se associate a trasformazioni innaturali. Comincia con le macchine ideali: scopre che le DS positive equilibrano quelle negative. S sembra conservarsi. Esamina le macchine reali: $S > 0$ (Q che esce dalla caldaia) eccede sempre le $S < 0$ (Q convertito in L). S totale aumenta sempre. Verifica che accade per tutti i sistemi, corpo umano, mulini a vento, etc. Una nuova vita corrisponde ad una variazione entropica negativa, in una creatura altamente organizzata. Ma le variazioni positive di entropia derivanti dalla creazione superano quelle negative. Le forze della distruzione sovrastano sempre quelle della creazione.
1877	L. Boltzmann, Konig, Maxwell	studio dell'entropia dal punto di vista dell'ordine/disordine. E' sviluppata una teoria cinetica che permette di dedurre le leggi dello stato gassoso.	
1905	Einstein	formulazione della relatività ristretta	Nello studio di una massa (gas, etc) contenuta in un sistema, valutiamo gli scambi di energia ipotizzando la massa costante. Dalla legge di Einstein, $E=mc^2$ , sappiamo che massa ed energia sono la stessa cosa. Quindi ci aspettiamo che la massa cambi. Se analizziamo una combustione in laboratorio, possiamo ricavare l'energia prodotta dalla stessa, e da tale valore, possiamo ricavare la variazione di massa occorsa. La variazione c'è, ma su 1 kg di combustibile, corrisponde a $10^{-11}$ kg. Un valore inosservabile dalla maggior parte degli strumenti tecnici; pertanto l'uso distinto delle equazioni di conservazione di massa ed energia, non introduce errori significativi nei problemi tecnici.

# 1° UNITA'

32

- Una macchina che ripete periodicamente una trasformazione è un ciclo; in figura è rappresentato lo schema di una macchina : essa scarica quota del calore in entrata nell'ambiente.
- In un ciclo chiuso, essendo  $\Delta U = 0$ ,  $\Sigma Q = L$ . Il lavoro prodotto da una macchina uguaglia la somma algebrica dei calori scambiati.
- La macchina più semplice è stata studiata da S. Carnot (1824) e ne richiamiamo graficamente la rappresentazione nel piano P-V.





Con il 1° principio della termodinamica è negata la possibilità di un moto perpetuo di 1° specie: ossia la creazione o distruzione di energia dal nulla. Col 2° principio è negata la possibilità di un moto perpetuo di 2° specie: ossia la possibilità di creare lavoro meccanico da una unica sorgente di calore.

Il punto di partenza è il 2° principio della termodinamica: ogni macchina per generare lavoro deve avere due scambi di calore, uno di questi avviene con l'ambiente di riferimento. Qualsiasi ciclo reversibile può immaginarsi come approssimato da infiniti cicli di Carnot: pertanto nel percorso storico della termodinamica si è fatto riferimento ad esso.

E' noto che in tale ciclo

$$\oint \delta Q = Q_H - Q_L > 0$$

E se al limite, le due temperature tendono a coincidere, il valore tende a zero. Dalla definizione di rendimento termodinamico di una macchina reversibile

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

# 1° UNITA'

34

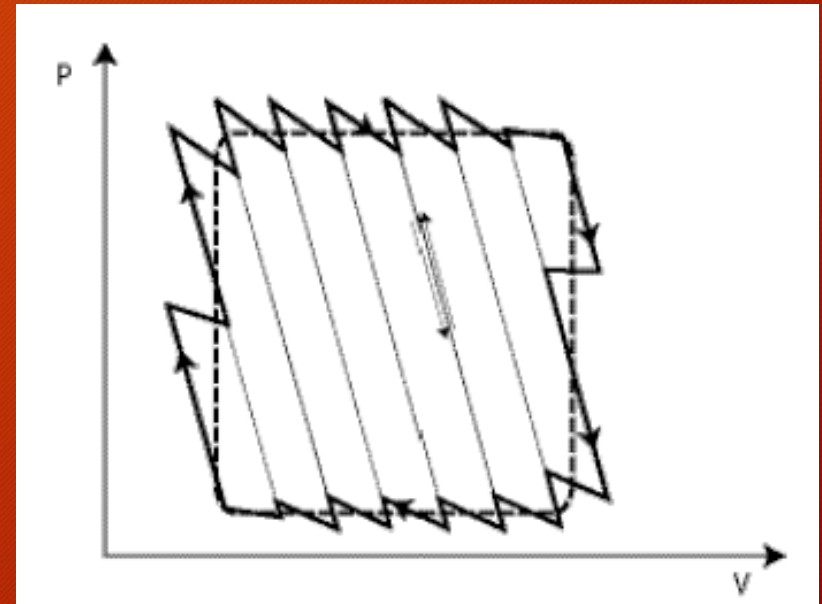
e di scala assoluta delle temperature, possiamo scrivere:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_L}{T_L} = 0$$

Quindi per tutte le macchine reversibili valgono le:

$$\oint \delta Q \geq 0$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0$$



## 1° UNITA'

35

Ora consideriamo un ciclo irreversibile: dal secondo principio è noto che il lavoro ottenibile è:

$$W_{irr} < W_{rev}$$

Ne consegue che:

$$Q_H - Q_{L-irr} < Q_H - Q_{L-rev}$$

Ossia:

$$Q_{L-irr} > Q_{L-rev}$$

In parole: il calore scartato dalla macchina irreversibile è superiore a quello della macchina ideale.

La macchina irreversibile pertanto risponde alle seguenti disequazioni:

## 1° UNITA'

36

$$\oint \delta Q = Q_H - Q_{L-irr} > 0$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_{L-irr}}{T_L} < 0$$

E' facile comprendere come al limite, se le T tendessero allo stesso valore, la somma dei calori scambiati tenderebbe a zero. Quindi per le macchine irreversibili possiamo scrivere le due equazioni come segue:

$$\oint \delta Q \geq 0$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} < 0$$

## 1° UNITA'

37

Queste relazioni è semplice mostrare come siano valide anche per i cicli inversi. E' dimostrato che per tutti i cicli, reversibili e irreversibili, vale la seguente relazione:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

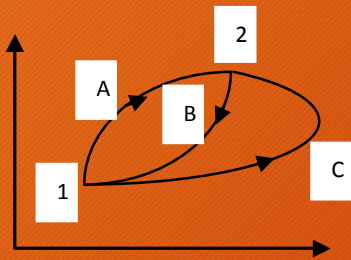
Detta *diseguaglianza di Clausius*

*Se le macchine rispettano questa equazione, non violano il 2° principio della termodinamica.*

# 1° UNITA'

38

Analizziamo un ciclo reversibile, e percorriamolo sulle trasformazioni A→B e poi secondo il percorso C→B:



$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0 = \int_{1-su A}^2 \frac{\delta Q}{T} + \int_{2-su B}^1 \frac{\delta Q}{T}$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0 = \int_{1-su C}^2 \frac{\delta Q}{T} + \int_{2-su B}^1 \frac{\delta Q}{T}$$

Sottraiamo la 2° dalla prima: otteniamo

$$\int_{1-su A}^2 \frac{\delta Q}{T} = \int_{1-su C}^2 \frac{\delta Q}{T}$$

Mentre il calore è una grandezza la cui variazione dipende dal percorso compiuto durante la trasformazione, la nuova grandezza è indipendente da esso, mentre dipende solo dai punti iniziali e finali. Pertanto è una funzione di stato, come l'energia interna, e Clausius l'ha denominata

## *Entropia*

con riferimento diretto all'energia.

N.B. è una grandezza definita solo per trasformazioni reversibili

## 1° UNITA'

40

ENERGIA (dal greco) = capacità di agire, forza in azione

ENTROPIA (dal greco ) = trasformazione interna, cambiamento interno



# 1° UNITA'

41

Ne diamo pertanto la definizione in termini differenziali:

$$dS = \frac{\delta Q}{T}$$

In una generica trasformazione potrà calcolarsi, conoscendo la relazione tra Q e T, come segue:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

Questa relazione vale su una trasformazione reversibile, ma essendo S una funzione di stato, la calcolo su una reversibile e varrà per tutte le trasformazioni che collegano quei due stati! Dell'entropia si calcolano le variazioni, per conoscerne il valore assoluto è necessario fare riferimento al 3° Principio della termodinamica: a  $T = 0 \text{ K} \rightarrow S=0$ .

# 1° UNITA'

42

S

Esempio: ciclo di Carnot ( lo analizziamo nel piano TS)

$$\Delta S_{12} = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} = \frac{1}{T_H} \int_1^2 \delta Q = \frac{Q_{12}}{T_H}$$

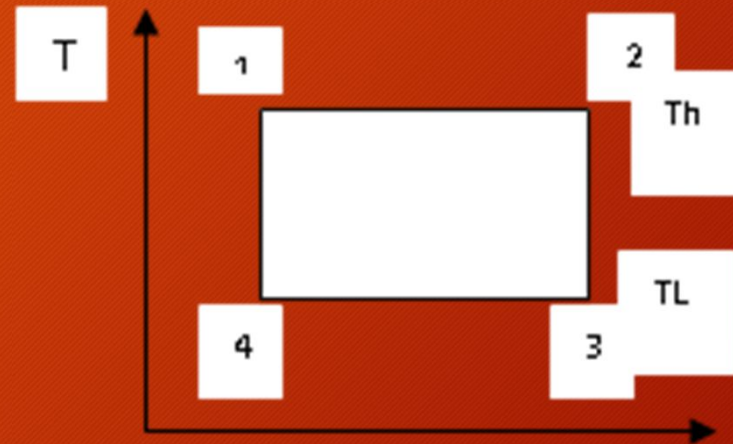
Q è positivo, quindi S aumenta. Sulle trasformazioni verticali Q = 0 quindi S = costante (sono adiabatiche reversibili).

Resta la isoterma inferiore:

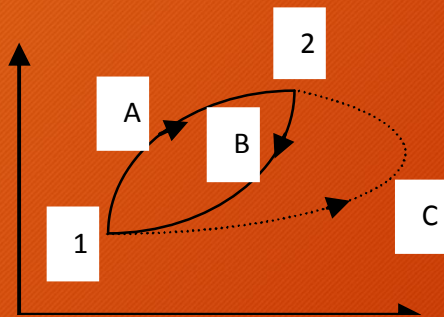
$$\Delta S_{43} = \frac{Q_{34}}{T_L}$$

Q esce, è negativo, quindi l'entropia del fluido diminuisce. In un ciclo ideale le due variazioni si uguagliano.

L'area sottesa alle trasformazioni reversibili, rappresenta il calore scambiato.



Ripetiamo il ragionamento fatto per cicli reversibili, supponendo che il percorso C sia irreversibile. Compriamo prima il ciclo A→B, poi C→B.



$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \int_{1-su A}^2 \frac{\delta Q}{T} + \int_{2-su B}^1 \frac{\delta Q}{T} = 0$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \int_{1-su C}^2 \frac{\delta Q}{T} + \int_{2-su B}^1 \frac{\delta Q}{T} < 0$$

Il segno della seconda dipende dalla disuguaglianza di Clausius; ora sottraggo la 2° dalla 1°:

$$\int_{1-su A}^2 \frac{\delta Q}{T} > \int_{1-su C}^2 \frac{\delta Q}{T}$$

Il calcolo sul percorso reversibile ci dà “dS”, ossia (S<sub>2</sub>-S<sub>1</sub>). Avendo scelto percorsi arbitrari, la relazione ha validità generale:

$$S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

**Equazione fondamentale della termodinamica:** se la trasformazione è reversibile, vale l'uguale; se è irreversibile vale il segno maggiore.

In base alle note regole dei segni, se Q entra nel sistema, è positivo, quindi S aumenta; se Q esce dal sistema è negativo, e l'entropia diminuisce.

In parole: *quando una trasformazione reale comporta uno scambio di calore, la variazione di entropia è superiore a quella che si avrebbe in una trasformazione reversibile.*

# 1° UNITA'

45

In base a quanto sopra, possiamo scrivere la relazione generale:

$$dS = \frac{\delta Q}{T} + \delta S_{gen} \quad \text{con} \quad \delta S_{gen} \geq 0$$

Il termine aggiuntivo sempre positivo nel caso delle trasformazioni reali irreversibili, è dovuto alle irreversibilità interne al sistema:

attriti;  
scambi di energia sotto DT finiti;  
espansioni istantanee  
miscelazione di fluidi

La conclusione è che S aumenta sempre, o per effetto degli scambi termici, o delle irreversibilità interne, e ciò accade anche nelle trasformazioni reversibili.

# 1° UNITA'

46

Integrando:

$$S_2 - S_1 = \int \frac{\delta Q}{T} + S_{12 \text{ gen}}$$

Detta **EQUAZIONE DI BILANCIO DELL'ENTROPIA** per un sistema chiuso ( massa di controllo)

L'entropia può essere unicamente generata; per ridurre l'entropia di un fluido bisogna estrarre calore.

# 1° UNITA'

47

Il lavoro producibile da una trasformazione reale è sempre inferiore a quello estraibile da una trasformazione ideale.

Infatti dall'ultima relazione:

$$\begin{cases} \delta Q_{irr} = TdS - T\delta S_{gen} \\ \delta Q_{irr} = dU + \delta W_{irr} \end{cases}$$

In cui la seconda relazione è la formulazione del primo principio. Pertanto:

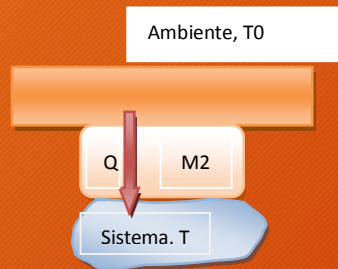
$$\delta W_{irr} = TdS - dU - T\delta S_{gen} = pdV - T\delta S_{gen}$$

Il lavoro ottenibile in una trasformazione reale è pari a quello ideale meno il lavoro perso.

# 1° UNITA'

48

Come influisce sull'ambiente esterno lo scambio di calore generato dal sistema termodinamico?



Il sistema ha una variazione

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T}$$

Per l'ambiente invece  $\delta Q < 0$ ; quindi

$$dS_{amb} = -\frac{\delta Q}{T_0}$$

La variazione complessiva di entropia vale:

$$dS_{tot} = dS_M + dS_{amb} \geq \frac{\delta Q}{T} - \frac{\delta Q}{T_0} \geq \delta Q \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) > 0$$



## 1° UNITA'

49

Infatti il termine in parentesi è sicuramente positivo. Se anche fosse  $T > T_0$ , il risultato non cambierebbe.

Anche analizzando la massa intermedia tra ambiente e sistema, ricaveremmo in essa una generazione di entropia, proporzionale al  $DT$ , che confermerebbe quanto detto.

$$dS_{tot} = dS_M + dS_{amb} \geq 0$$

Gli unici processi che possono aver luogo sono quelli che non contraddicono la legge su esposta, nota anche come *principio dell'aumento di entropia*.

Esso è la *formulazione quantitativa generale del 2° principio della termodinamica*.

# 1° UNITA'

50

Ora immaginiamo di prendere un sistema isolato U: esso impedisca scambi di energia verso l'esterno. Il sistema "S" può scambiare energia con l'ambiente che lo circonda.



Nonostante ciò in esso l'entropia aumenta, per effetto del termine  $S_{gen}$ . Anche se S fosse un ciclo termico, nel quale  $\Delta S=0$ , avremmo comunque il termine  $S_{gen}$  per irreversibilità, per cui

$$\Delta S_{isol} = \Delta S_{gen} > 0$$

Estendendo tale equazione al sistema universo, possiamo affermare che in esso l'entropia è in continuo aumento, ossia che esso evolve verso la morte termica.

## 1° UNITA'

51

Qualsiasi realizzazione umana, inclusa la generazione di un essere vivente, comporta una diminuzione di entropia nel sistema, a fronte di un aumento di quella dell'ambiente che lo circonda, ben superiore ad essa, per cui nel complesso  $S$  aumenta.

La legge dell'entropia è la formulazione fisico matematica della direzione verso cui evolvono i sistemi fisici, che mancava nelle leggi della meccanica Newtoniana.

Nei sistemi reali, la variazione dell'entropia è sempre  $> 0$ . Essa è prodotta dagli scambi di calore e dalle irreversibilità interne al sistema.

Se un sistema è isolato, non scambia energia né massa con l'esterno. Per la presenza del 2° termine (le irreversibilità interne) la sua entropia aumenta sempre.

$$\Delta S_{universo} > 0$$

L'entropia è una grandezza non conservativa. La sua variazione ci dice la direzione che prendono i fenomeni fisici.

Essendo correlata alle irreversibilità delle trasformazioni termodinamiche, permette di individuare quali di esse in un ciclo determinano lo scadimento delle prestazioni.

L'energia si conserva, l'entropia aumenta.

## 2° UNITA' *entropia ed exergia*

53

### SECONDO PRINCIPIO PER UN SISTEMA CHIUSO

Per un sistema chiuso il bilancio entropico può essere espresso nei seguenti modi:

$$ds = \frac{\delta Q}{T} + ds_{gen} \text{ in forma differenziale [18]}$$

$$\dot{S} = \sum \frac{\dot{Q}}{T} + S_{gen} \text{ flusso entropico [19]}$$

$$m(s_2 - s_1) = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_{12-gen} \text{ con } S_{12-gen} \geq 0 \quad [20]$$

$$\Delta S = \Delta S_{sist} + \Delta S_{amb} \geq 0 \quad [21]$$

## SECONDO PRINCIPIO PER UN SISTEMA APERTO

Per un sistema aperto, il fluido in entrata ed in uscita dal sistema possiede un contenuto entropico. L'analisi di secondo principio può essere espressa come segue:

$$\dot{S}_{cv} = \sum \dot{m}_i s_i - \sum \dot{m}_e s_e + \sum \frac{\dot{Q}_{cv}}{T} + \dot{S}_{gen} \quad [22]$$

Per un singolo flusso di fluido in condizioni stazionarie:

$$s_e = s_i + \int_i^e \frac{\delta Q}{T} + s_{gen} \quad [23]$$

## 2° UNITA'

55

### Esempio: l'ingranaggio

Analisi di 1° principio: bilancio dell'energia. E' nota la potenza meccanica in entrata e lo scambio termico sull'involucro, di tipo convettivo:

$$\dot{Q} = hA(T_b - T_f)$$

E' noto il coefficiente convettivo  $h$  e la superficie esterna dell'involucro. Ricaviamo subito la potenza termica ceduta:  $-1,2$  kW.

Analizziamo il sistema: usiamo il confine tratteggiato per l'analisi. Esprimiamo il 1° principio in forma di bilancio di potenze:

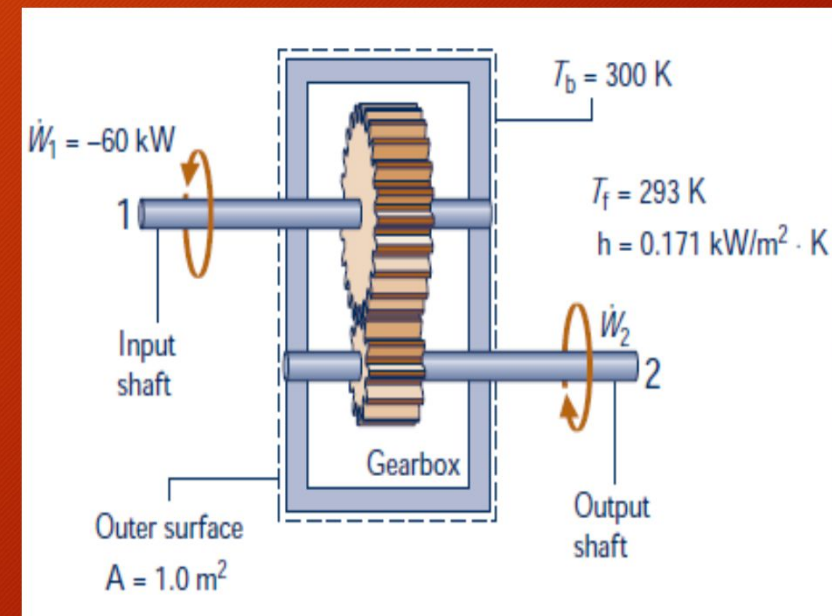
$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$$

Il primo termine è nullo, in condizioni stazionarie; quindi le due potenze sono uguali. Ricaviamo la potenza meccanica complessivamente scambiata dal sistema:

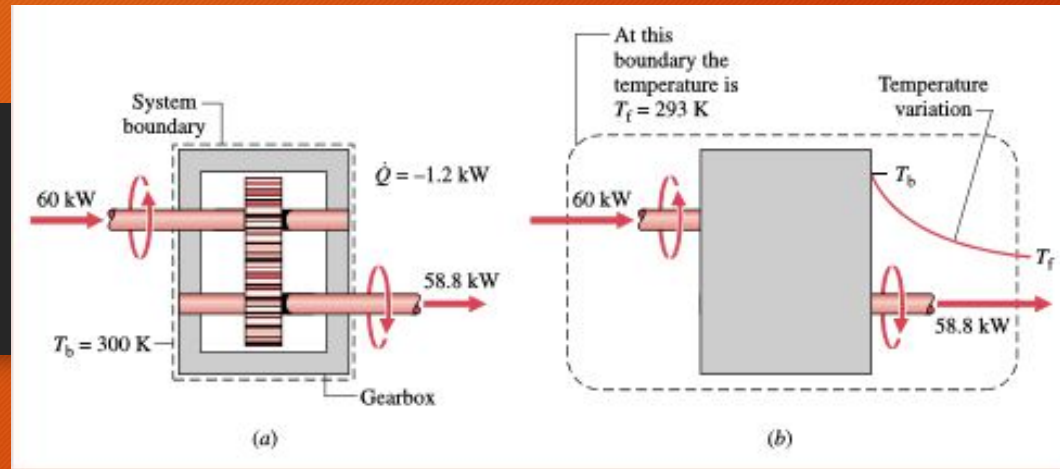
$$\dot{W} = \dot{W}_1 + \dot{W}_2$$

Risolviamo, determinando la potenza in uscita, tenendo conto della convenzione dei segni ( $q$  positivo entrante,  $W$  positivo uscente):

$$\dot{W}_2 = \dot{Q} - \dot{W}_1 = -1,2 - (-60) = +58,8 \text{ kW}$$



## 2° UNITA'



56

### Esempio: l'ingranaggio

Analisi di 2° principio: Disponendo di dati in termini di potenze, usiamo il bilancio di entropia nella forma di flusso.

$$\dot{S}_{cv} = \sum \dot{m}_i s_i - \sum \dot{m}_e s_e + \sum \frac{\dot{Q}_{cv}}{T} + \dot{S}_{gen}$$

Il primo termine esprime la variazione del flusso entropico nel tempo nell'involucro: trattandosi di sistema in condizioni stazionarie la sua variazione è nulla. Non entra e non esce massa da questo sistema: quindi anche le sommatorie si annullano:

$$0 = \sum \frac{\dot{Q}_{cv}}{T} + \dot{S}_{gen}$$

Infine, abbiamo solo un termine di scambio termico, quindi possiamo togliere il simbolo di sommatoria:

$$\dot{S}_{gen} = -\frac{\dot{Q}}{T_b}$$

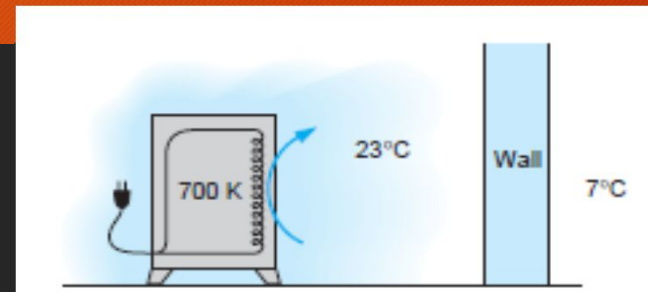
$T_b$  è la temperatura superficiale della scatola dell'ingranaggio. Esprimendo in kW il numeratore ed in K il denominatore, otteniamo un valore pari a  $4 \cdot 10^{-3}$  kW/K. Attenzione: il calore esce, quindi è negativo, il risultato diventa positivo. Abbiamo un incremento di entropia.

Determiniamo la produzione sul confine dell'ambiente esterno, ossia a  $T_f$ . Prendiamo un volume di controllo superiore al precedente (vedi immagine b). Ripetendo i passaggi precedenti, stavolta otteniamo  $4,1 \cdot 10^{-3}$  kW/K. L'entropia è aumentata di 0,1 kW/K. Notiamo che la maggior parte della produzione di entropia (98%) è associata alla scatola, ossia agli attriti interni e allo scambio termico tramite la superficie esterna.

Una piccola quota invece (0,1) è associata al passaggio del calore sotto un  $\Delta T$ , piuttosto limitato (7K). Se voglio migliorare il dispositivo, devo lavorare sul meccanismo per ridurre le irreversibilità, non sicuramente sul  $\Delta T$  tra scatola e esterno.



## 2° UNITA'



57

### Esempio: l'edificio

Valutare in un sistema di riscaldamento diretto a resistenza la produzione di entropia tenuto conto delle temperature della resistenza elettrica, dell'aria nel locale, dell'aria esterna. La potenza erogata dal dispositivo sia

$$\dot{Q} = 2 \text{ kW}$$

Si tratta di un sistema che può essere descritto utilizzando la massa di controllo. Infine, lo si consideri in condizioni stazionarie. Inizialmente prendiamo come massa di controllo la resistenza del generatore. Impostiamo il bilancio di energia e di entropia.

$$\frac{dS}{dT} = \frac{\dot{Q}}{T_s} + \dot{S}_{gen}$$

$$\frac{dE}{dT} = \frac{dU}{dT} = \dot{W} - \dot{Q}$$

Nella seconda In condizioni stazionarie il primo termine è nullo. Tutta la potenza elettrica si converte in calore. Dalla prima ricavo la produzione di entropia:

$$\dot{S}_{gen} = \frac{\dot{Q}}{T_s} = 2,857 \frac{W}{K}$$

Ora prendo come massa di controllo l'ambiente interno, inclusa la stufa, e riscrivo il bilancio entropico:

$$\dot{S}_{gen} = \frac{\dot{Q}}{T_a} = 6,757 \text{ W/K}$$

Infine, valuto la produzione di entropia prendendo come sistema di riferimento l'edificio intero, sul confine con l'ambiente esterno a 7°C:

$$\dot{S}_{gen} = \frac{\dot{Q}}{T_s} = 7,143 \frac{W}{K}$$

Osservazioni: l'analisi entropica ci dice che la maggior produzione di entropia è associata alla differenza di temperatura tra stufa e locale. La resistenza non è un dispositivo idoneo a riscaldare un ambiente a bassa temperatura.



## Esercizio assegnato: dispositivo di miscelazione

Un tecnico attrezza un dispositivo miscelatore in condizioni stazionarie e registra i seguenti valori: nella sezione 1 entra acqua liquida satura, nella 2 entra vapore, nella 3 esce una miscela liquido vapore. Il dispositivo è adiabatico e non vi sono scambi di energia meccanica. Sono noti:

$$P_2=200 \text{ kPa};$$

$$T_2=150^\circ\text{C};$$

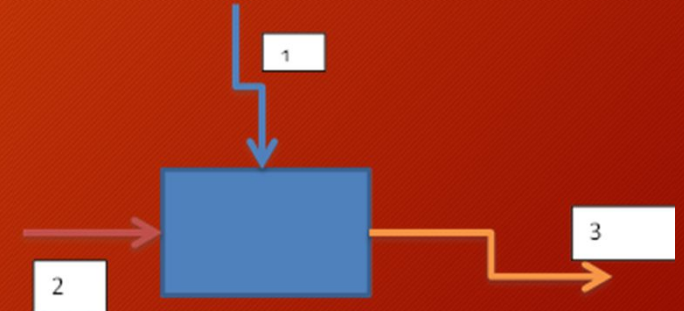
$$\dot{m}_2 = 1,5 \text{ kg/s}$$

$$T_1=15^\circ\text{C};$$

$$\dot{m}_1 = 0,8 \text{ kg/s}$$

$$P_3=400 \text{ kPa}$$

Verificare la correttezza dei dati forniti



Riscrivendo l'espressione dell'entropia otteniamo:

$$Tds = \delta Q + Tds_{gen} \quad [24]$$

Il calore scambiato nella trasformazione è somma di due termini, il secondo dei quali si ha se la trasformazione è reale ossia irreversibile: è il calore perso per attriti, ad esempio. Se una parte del calore è associato alle irreversibilità, esso esprime anche la quantità di lavoro che perdiamo a causa delle stesse.

Il lavoro effettivo scambiato da una trasformazione reale sarà, integrando tra gli stati iniziale e finale 1 e 2 :

$$W_{12} = \int pdV - \int Tds_{gen} \quad [25]$$

Il secondo termine esprime il lavoro non più disponibile. IRREVERSIBILITA' = differenza tra lavoro reversibile massimo ottenibile da una trasformazione termodinamica, e il lavoro effettivo ricavabile.

**Il massimo lavoro utile che può essere prodotto da un sistema che si porta in equilibrio con l'ambiente esterno di riferimento, è detto EXERGIA (in inglese "availability", ossia "energia disponibile").**

## 2° UNITA'

60

*Formulazione analitica dell'EXERGIA:*

$$W_{t,u} = \psi = (h - h_0) + \frac{1}{2}v^2 + g(z - z_0) - T_0(s - s_0)$$

## 2° UNITA'

61

L'exergia dipende dallo stato del sistema TD e dallo stato dell'ambiente.

Perché « energia disponibile »?

Come noto dal 1° principio, la sommatoria dei Q scambiati uguaglia il W prodotto; l'area del ciclo rappresenta Q scambiato che equivale a W.

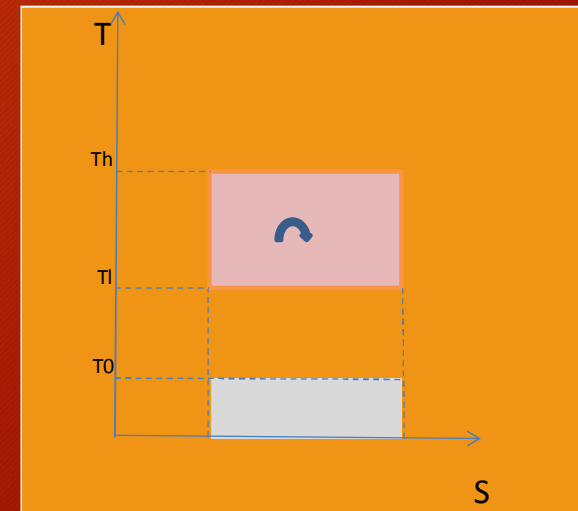
Se diminuisco  $T_l$  aumento il lavoro prodotto dal ciclo, ma ho un limite in  $T_0$ , la temperatura dell'ambiente circostante.

Quindi l'energia disponibile è  $(T_h - T_0) \Delta S$ . L'energia non disponibile è  $T_0 \Delta S$ .

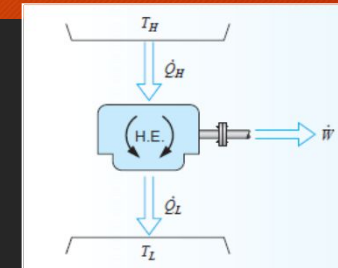
L'oceano è un serbatoio enorme di energia, ma l'energia disponibile in esso contenuta è molto limitata: pensare di convertirla in lavoro utile è piuttosto difficile avendo una  $T \approx T_0$

N.B. nell'analisi delle irreversibilità (e quindi anche dell'exergia) contano le condizioni dell'ambiente di riferimento!

L'irreversibilità per la definizione precedente vale l'area compresa tra  $T_l$  e  $T_0$ , ossia  $(T_l - T_0) \Delta S$ .



## 2° UNITA'



62

Definizione generale di exergia per un sistema chiuso:

$Ex = E - T_0 \cdot S$  energia totale del sistema, meno energia persa per irreversibilità. Trascurando energia cinetica e potenziale, si esplicita come:

$Ex = U + p_0 \cdot V - T_0 \cdot S$  come si vede contiene termini legati alle condizioni dell'ambiente di riferimento  
Il massimo lavoro utile ottenibile da una trasformazione compiuta su un sistema uguaglia la variazione di exergia tra lo stato iniziale e finale in equilibrio con l'ambiente di riferimento:

$$\text{EXERGIA del sistema chiuso} = (U_1 + p_0 V_1 - T_0 S_1) - (U_0 + p_0 V_0 - T_0 S_0)$$

N.B. Per un sistema isolato la variazione dell'exergia può scriversi anche come:  
 $\Delta Ex = e_2 - e_1 - T_0 (s_2 - s_1)$  il primo termine è nullo (l'energia si conserva), il secondo è  $> 0$ , quindi la variazione

$\Delta Ex < 0$  l'exergia non è conservativa (decrese sempre)

### L'exergia del calore

Il primo termine nell'equazione è l'exergia del calore. A questa espressione potevamo facilmente giungere dal teorema di Carnot [10]:

$$\eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Ma vale anche la seguente:

$$\eta = \frac{W}{Q_H}$$

Pertanto il massimo lavoro idealmente conseguibile dallo scambio termico  $Q_H$  vale:

$$W_{rev} = Q_H \left( 1 - \frac{T_L}{T_H} \right) = E_x$$

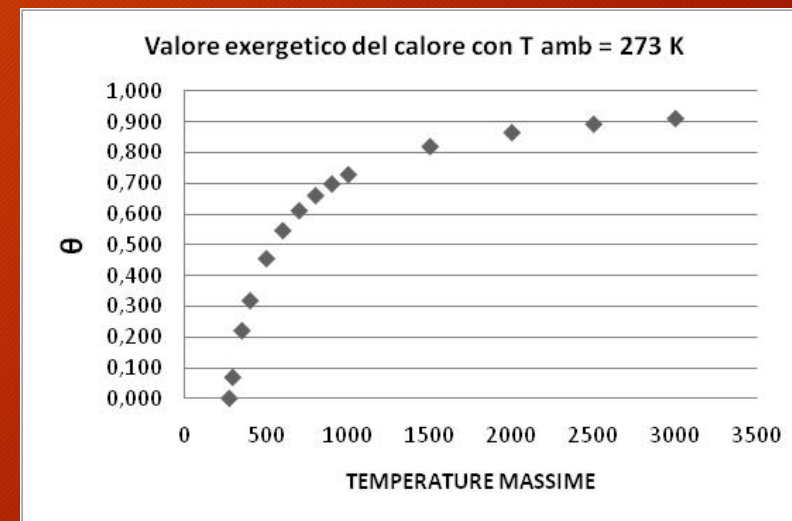
Il termine tra parentesi è anche detto “fattore di Carnot”. L'espressione rappresenta l'exergia di uno scambio termico.

## L'exergia del calore

Una unità di calore ha un valore exergetico differente in funzione della sua temperatura; nel grafico è riassunto per un insieme discreto di valori, l'andamento del termine tra parentesi detto "fattore di Carnot".

Servono temperature della sorgente calda superiori a 1500 K per avere la possibilità di estrarre lavoro meccanico in quantità significativa. Il calore ordinariamente richiesto negli utilizzi civili, a 20°C richiede circuiti di riscaldamento a 40-80°C, con calore che ha invece un contenuto exergetico molto modesto.

*Pertanto alle combustioni (alte temperature), deve essere riservato il compito di produrre energia termica convertibile in meccanica ed elettrica, qualora non vi fossero alternative di conversione diretta di energia solare in grado di rispondere ai bisogni. Ove il contenuto exergetico richiesto fosse molto modesto, andranno trovate altre sorgenti, di coerente contenuto exergetico.*



$$\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) = \text{fattore di Carnot}$$



### Exergia dell'energia meccanica

L'energia cinetica e potenziale sono direttamente convertibili in lavoro: pertanto equivalgono alla loro exergia:

$$e_x(\text{energia cinetica}) = \frac{v^2}{2} \text{ (ex specifica, J/kg)}$$

$$e_x(\text{energia potenziale}) = gz$$

Il lavoro derivante da un'espansione di un gas non è integralmente sfruttabile: una quota è richiesta per spostare l'aria dell'ambiente di riferimento. Pertanto:

$$E_x = W - W_{amb} = W - p_0(V_2 - V_1)$$

Se il lavoro è trasferito come lavoro d'albero, o elettrico, il 2° termine è nullo e il lavoro in tali casi è integralmente exergia.

Un fluido che transita attraverso un dispositivo, contiene energia e quindi exergia; è una exergia associata alla massa del fluido. Come già visto sopra, essa vale:

$$E_x = me_x = m \left[ (h - h_0) + \frac{v^2}{2} + gz - T_0(s - s_0) \right]$$

### Exergia dei combustibili e reazioni chimiche

Un combustibile portandosi in equilibrio con l'ambiente di riferimento dispone di un'exergia fisica (aria e comb. Si portano in equilibrio a  $T_a$  e  $p_a$ , ma questa quota è trascurabile) ed una exergia chimica (variazione di entalpia tra reagenti e prodotti di reazione) per la presenza di reazioni di combustione.

In una reazione chimica reversibile, il massimo lavoro ottenibile è la variazione del potenziale di Gibbs ( $g = h - Ts$ ). Con una accettabile approssimazione, l'exergia si può ritenere coincidente con il POTERE CALORIFICO INFERIORE del combustibile.

Mentre per il 1° principio la combustione ha un rendimento prossimo al 100%, dal punto di vista entropico è penalizzata, quanto meno i fumi sono caldi. Mediamente, si ha una distruzione di exergia del 30% rispetto al combustibile introdotto.

I cicli combinati hanno una potenzialità elevata rispetto ai cicli a vapore proprio per questo motivo: scaricando gas a alta  $T$  ( $500-600^\circ$ ) si può estrarne il contenuto exergetico utilizzandoli in un generatore di vapore, che muove una turbina a vapore.

## 2° UNITA'

### Entropia ed exergia

67

Exergia della radiazione solare

$$X_{rad} = e_m \sigma \left[ (T_S^4 - T_0^4) - \frac{4}{3} T_0 (T_S^3 - T_0^3) \right]$$

Em= emissività superficiale

## 2° UNITA'

### Entropia ed exergia

68

#### Efficienza exergetica

A fronte delle definizioni sopra viste, è necessario formulare il concetto di rendimento, che quindi tenga conto del primo e secondo principio. Infatti il 1° principio valuta tutte le forme di energia come uguali tra loro, indipendentemente dalla loro capacità di convertirsi in lavoro.

L'efficienza exergetica è data come segue:

$$\eta_{ex} = \frac{E_{x-out}}{E_{x-in}}$$

## 2° UNITA'

### Entropia ed exergia: conclusione

69

L'analisi exergetica (entropica) include a differenza di quella energetica:  
legge di conservazione della massa;  
legge di conservazione dell'energia;  
secondo principio della termodinamica ( o non conservazione dell'entropia)

$$\frac{dE_x}{dt} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + P_0 \frac{dV}{dt} + \sum \dot{m}_i \psi_i - \sum \dot{m}_e \psi_e - T_0 \dot{S}_{gen}$$

(EQUAZIONE DELL'EXERGIA PER UN SISTEMA APERTO)

N.B.  $\Psi = u + p_0 v - T_0 s$

Il flusso di exergia immagazzinato uguaglia la somma dei termini:

- exergia da scambi termici ( potenza termica scambiata sul contorno del sistema);
- exergia da lavoro meccanico (potenza erogata ad un albero e da spostamento di contorno del sistema);
- exergia del flusso di fluido transitante nel volume di controllo ( exergia del fluido entrante meno quella del fluido uscente ) ;
- exergia distrutta.

# 3° UNITA'

## Efficienza di macchine e sistemi energetici

70

### IL PHON

Un asciugacapelli portatile è oggetto di alcune misure di temperatura e velocità dell'aria all'ingresso e uscita. Si ipotizzi: condizioni stazionarie, scambi di calore attraverso l'involucro nulli. Si trascuri l'energia potenziale del fluido. L'aria si tratti come gas perfetto. Temperatura ambiente  $T_i = 295\text{K}$  ( $22^\circ\text{C}$ )

Determinare:

La potenza elettrica in ingresso;

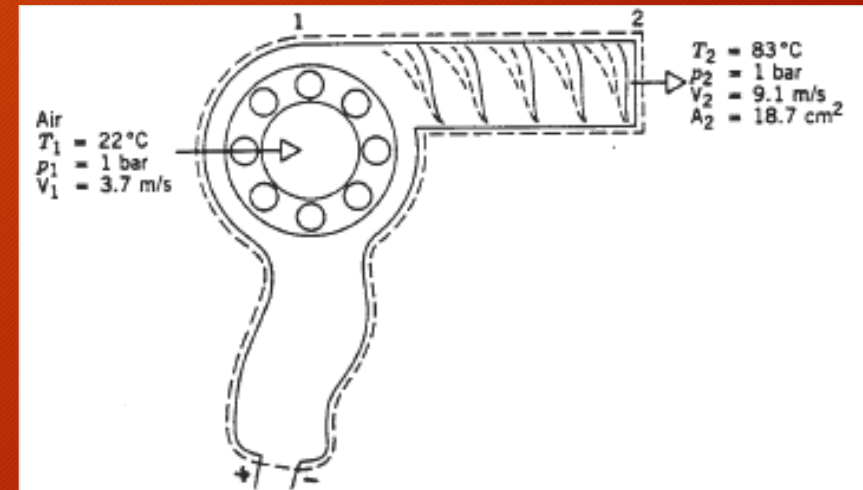
Analizzare l'efficienza energetica ed exergetica del dispositivo

1) Il dispositivo è una macchina a fluido comprendente un ventilatore e resistenze. Abbiamo una sezione di ingresso ed una di uscita. Pertanto applichiamo al volume di controllo il bilancio energetico. Individuiamo come volume di controllo il contorno esterno dell'apparecchio, indicato con tratteggio nel disegno.

Bilancio energetico in condizioni stazionarie:

$$0 = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \dot{m} * [(h_i - h_o) + \frac{v_i^2 - v_o^2}{2} + g * (z_i - z_o)]$$

A primo membro la derivata dell'energia interna, nulla essendovi condizioni stazionarie; a secondo membro potenza termica scambiata, potenza meccanica elettrica, infine la differenza tra entalpia, energia cinetica e potenziale del fluido tra ingresso "i" e uscita "o". Il calore scambiato è considerato nullo, la variazione di energia potenziale anche.



Il phon

Si ricava:

$$\dot{W}_{cv} = \dot{m} * \left[ c * (T_i - T_o) + \frac{v_i^2 - v_o^2}{2} \right] = -1,22 \text{ kW}$$

2) Il rendimento di primo principio è pari a 1; tutta l'energia entrante è convertita in calore ed energia cinetica. Calcoliamo il rendimento exergetico:

$$\eta_{ex} = \frac{ex_{out}}{ex_{in}}$$

Scriviamo l'espressione del bilancio di exergia per un sistema aperto (E= exergia, e= exergia specifica, Edis= exergia distrutta):

$$\frac{dE_x}{dt} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + P_0 \frac{dV}{dt} + \sum \dot{m}_i \psi_i - \sum \dot{m}_e \psi_e - T_0 \dot{S}_{gen}$$

Il primo termine è nullo essendo in condizioni stazionarie, mentre l'exergia in entrata è nulla visto che il fluido in ingresso si trova nelle condizioni di pressione e temperatura dell'ambiente di riferimento.

Si ricava:

$$0 = -\dot{W}_{cv} - \sum \dot{m}_e \psi_e - T_0 \dot{S}_{gen}$$

$$\sum \dot{m}_e \psi_e = 1,22 - T_0 * \dot{m}_e * \ln\left(\frac{T_0}{T_i}\right) = 0,111 = 9\% \text{ di } 1,22 \text{ (potenza elettrica in ingresso)}$$

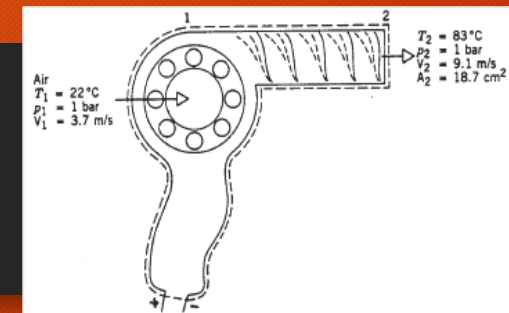
Per ogni trasformazione termodinamica si può ricavare una relazione per il calcolo della variazione dell'entropia:  
se p=K

$$s_2 - s_1 = c_{p0} * \ln\frac{T_2}{T_1} - R * \ln\frac{p_2}{p_1}$$

$$\eta_{ex} = \frac{0,111}{1,22} = 0,09 = 9\%$$



## 3° UNITA'



73

### Note

Il dispositivo ha un'efficienza molto modesta. Se consideriamo tutta la filiera dal combustibile (energia primaria) all'utilizzatore, dobbiamo tener conto del rendimento di generazione e trasmissione (circa 0,4) e ricaviamo un'efficienza exergetica intorno a 3,5 %.

Constatiamo che il primo principio non ci è di nessun aiuto per valutare la bontà del dispositivo dal punto di vista termodinamico: solo il bilancio exergetico, nel quale si integrano primo e secondo principio, ci può dire se l'energia è utilizzata in modo efficiente.

Evidentemente, il calore a bassa temperatura richiesto dovrebbe sfruttare una fonte di energia a bassa temperatura, di contenuto exergetico modesto.

L'elettricità invece ha il massimo potenziale exergetico, potendosi convertire direttamente in lavoro.

## IL GENERATORE DI CALORE SEMPLICE

Accettando l'approssimazione che l'exergia del combustibile corrisponda al suo HHV (potere calorifico superiore), il rendimento exergetico corrisponde al rapporto tra exergia uscente ed exergia entrante:

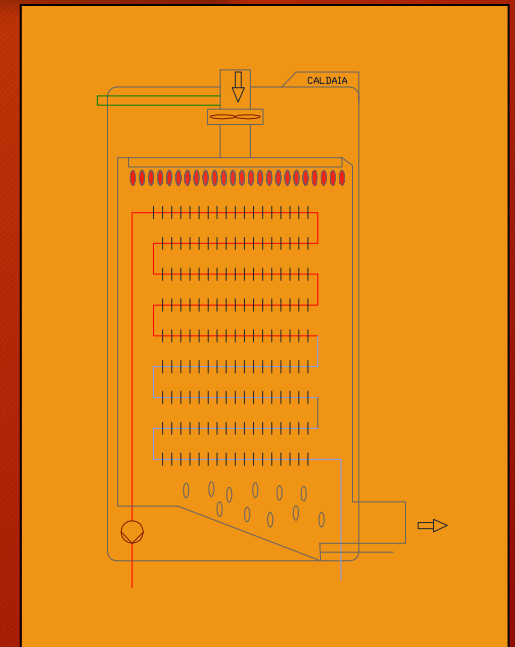
$$\eta_{ex} = \frac{\dot{Q} * (1 - \frac{T_a}{T})}{\dot{m}_{comb} * ex_{comb}}$$

L'exergia uscente è quella del calore fornito all'acqua, quella entrante è quella contenuta nel combustibile, pari al suo HHV. Nell'ipotesi di utilizzare una caldaia da 30 kW che cede calore alla rete utenza ad una temperatura media  $T = 50^\circ\text{C}$ , si ricava un  $\eta_{ex} = 0,12-0,13$ .

Nel caso di utilizzo di calore a temperatura più elevata, come accade nei radiatori tradizionali, esso può tendere al massimo a 0,2.

In sintesi:

La combustione nelle moderne caldaie a condensazione ad alta efficienza ha ridotto il consumo di combustibile e le sue emissioni, al punto di diventare competitivo con le caldaie industriali, ma si conferma exergeticamente scadente. La combustione ad alta temperatura non deve essere prioritariamente utilizzata per produrre calore da utilizzarsi a bassa temperatura.



Rendimento di primo principio (rispetto a HHV)	0,90 - 1,05
Rendimento exergetico	0,13-0,20

## 3° UNITA'

75

### La pompa di calore

La pompa di calore, preleva calore dall'ambiente esterno freddo e lo cede a temperatura superiore all'ambiente da riscaldare o ad un fluido di processo. Ciò accade utilizzando un ciclo termodinamico inverso, in cui si utilizza un fluido basso bollente (es. R147a), mediante un compressore.

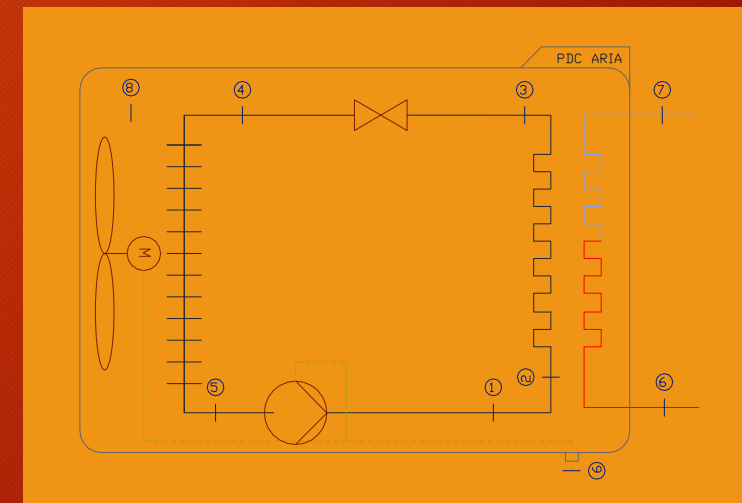
La macchina assorbe quindi energia (elettrica, di solito) dall'esterno, di elevato contenuto exergetico, e calore gratuito (di contenuto exergetico nullo) dall'ambiente in cui è installata, che in base alle norme UE può essere considerato una fonte rinnovabile.

L'efficienza di 1° principio come noto vale:

$$\text{COP} = Q_h/W$$

Generalmente compreso tra 3 e 4 nei climi del Nord Italia

Il rendimento si ricava dal COP ricordando che l'EE in ingresso è ricavata con un rendimento elettrico del SEN pari a 0,40 incluse le perdite di trasmissione sulla rete nazionale.  $\eta_{PC} = \text{COP} * \eta_{SEN} = 3,5 * 0,40 = 1,40$



pompa di calore elettrica ad aria/acqua.  
Schema funzionale

## La pompa di calore: analisi exergetica

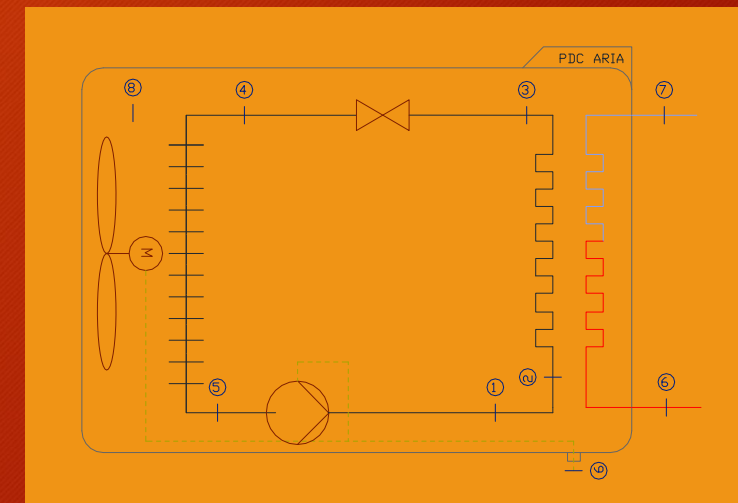
Il rendimento exergetico è il rapporto tra exergia uscente (del calore ceduto al liquido utilizzato nel circuito di riscaldamento, ad esempio a 50°) e quella entrante (se prelevo calore dall'ambiente, esso non possiede exergia, quindi l'unico input è l'exergia dell'elettricità che alimenta il compressore).

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{Q}_H \left(1 - \frac{T_H}{T_0}\right)}{\dot{W}} = 0,41$$

Si è ipotizzato un valore di temperatura media ambiente di 5° C; inserendo i valori di resa forniti dai costruttori, si ottiene il rendimento sopra riportato.

La relazione evidenzia che:

$$\eta_{ex} = \text{COP} \cdot \theta$$



pompa di calore elettrica ad aria/acqua.  
Schema funzionale

## 3° UNITA'

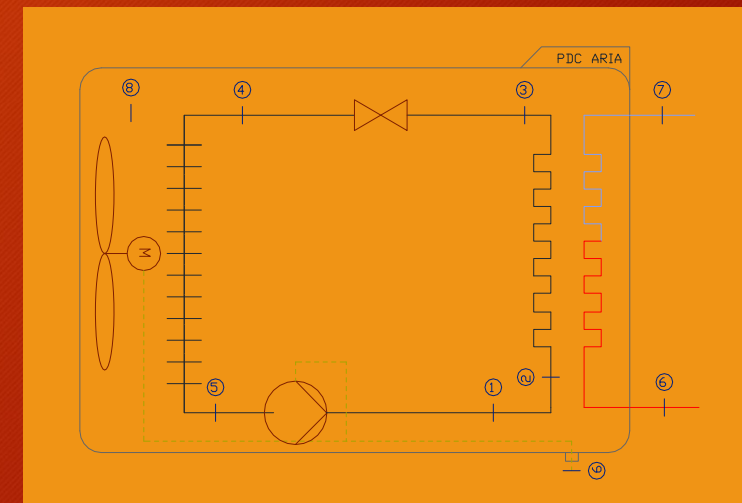
77

Se il ciclo opera con temperature ambiente superiori, o utilizza un serbatoio preriscaldato con energia solare, o utilizza fluidi geotermici, il suo COP può essere superiore, quindi anche il suo rendimento exergetico.

La prestazione delle pompe di calore più efficienti nel produrre calore non è raggiungibile dalle caldaie, e compete con quella dei cogeneratori.

La pompa di calore ha un rendimento exergetico anche triplo della caldaia più efficiente: si conferma la macchina migliore, per sfruttare il calore naturale contenuto nell'ambiente locale.

In effetti la macchina preleva la maggior UNITA' dell'energia da serbatoi naturali a bassa temperatura (aria, acqua di falda, calore del terreno), molto prossima a quella richiesta dall'utente.

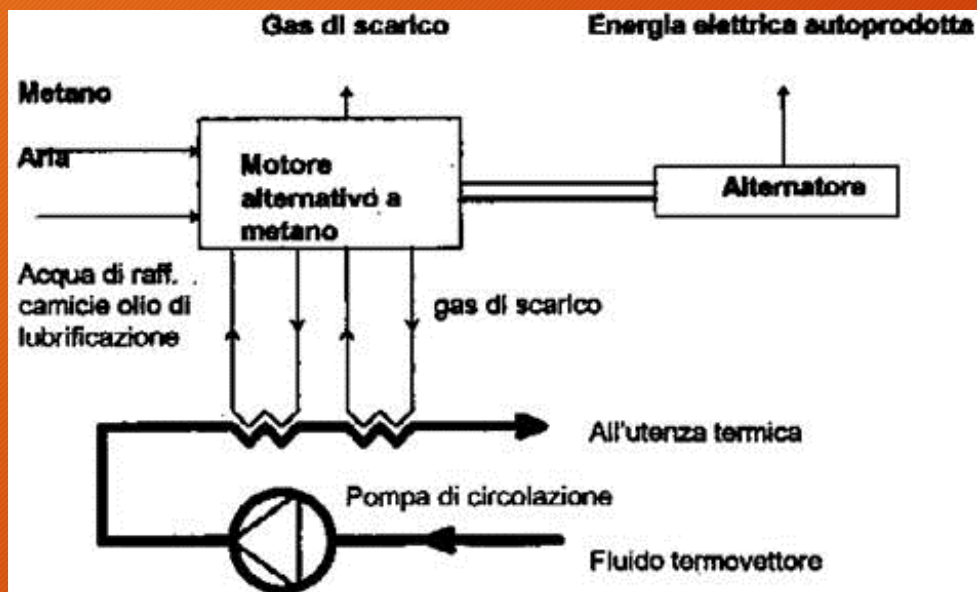


pompa di calore elettrica ad aria/acqua.  
Schema funzionale

# 3° UNITA'

78

## Il cogeneratore

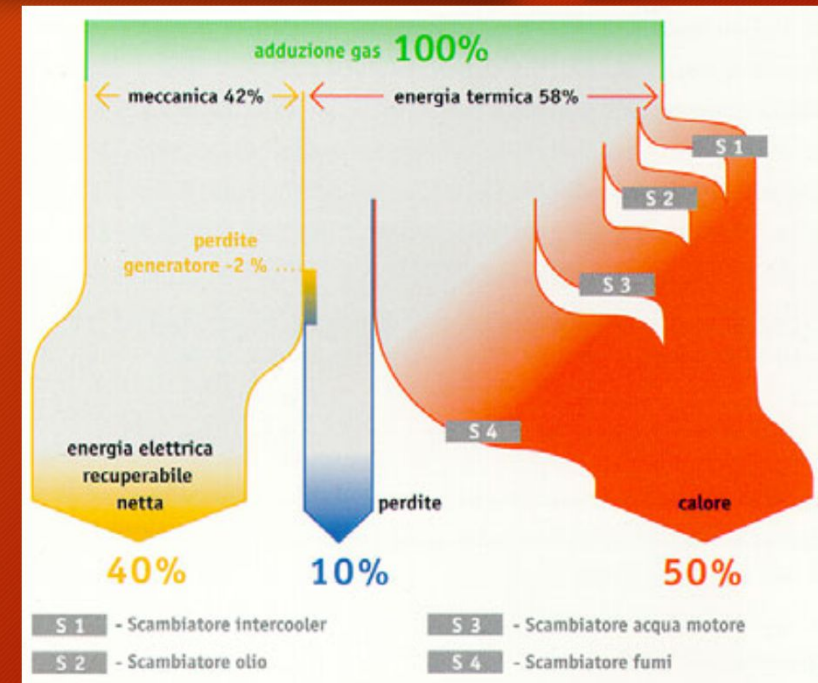


## Il cogeneratore

E' dato un Motore a combustione interna che utilizza un combustibile di LHV ( potere calorifico inferiore) pari a 35.000 kJ/kg. Il rendimento termico (L/Qh) o di 1° principio è pari a 30%. Si assuma una temperatura media di combustione di 1500 K. La potenza meccanica erogata è di 100 kW.

E' noto che il 40% dell'energia entrante è dissipata nei gas di scarico a 900 K, il 30% attraverso uno scambiatore ad acqua. Le pareti del motore raggiungono una temperatura media di 450 K, il fluido di raffreddamento 353K, l'ambiente esterno è a 20° C.

Nell'ipotesi che il liquido di raffreddamento (per semplicità acqua) esca dal motore a 363 K e sia portato dal radiatore a 343 K all'ingresso dello stesso, si determini la portata di refrigerante richiesta.



Rendimento energetico di un moderno motore a combustione interna per cogenerazione a gas metano [Jenbacher-GE]

# 3° UNITA'

80

## Analisi energetica

Ricaviamo il consumo di combustibile e determiniamo i flussi energetici ed exergetici completi. La potenza termica in ingresso al motore, derivante dalla combustione del carburante, è pari a:

$$\dot{Q}_H = \frac{\dot{W}}{\eta_{th}} = 333kW$$

E da questo valore, per il primo principio, possiamo ricavare la potenza termica dissipata:

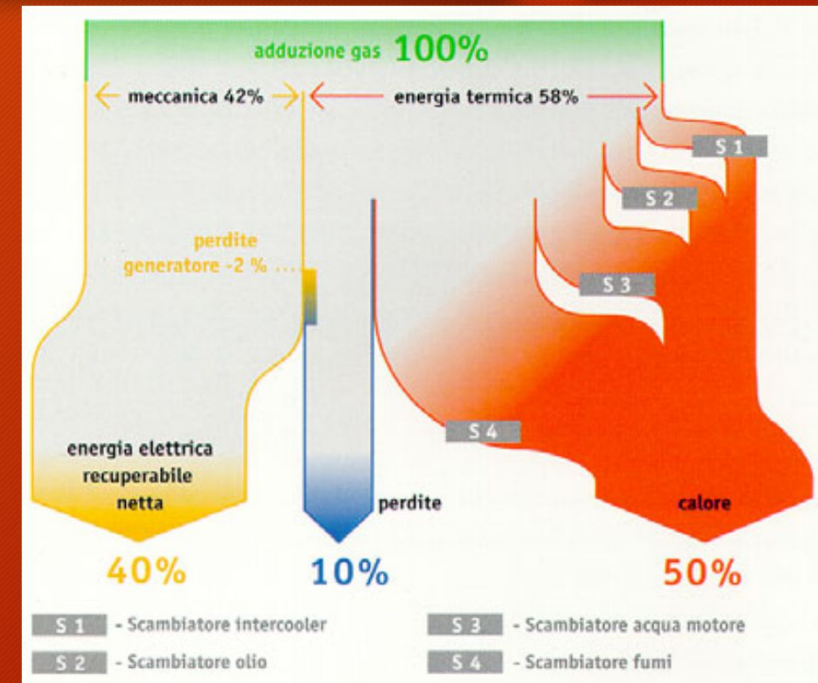
$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_H - \dot{W} = \dot{Q}_H - \eta_{th} * \dot{Q}_H = \dot{Q}_H(1 - \eta_{th}) = 233 kW$$

La potenza termica ottenuta dal combustibile equivale al prodotto della portata dello stesso per il suo LHV:

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_{comb} * LHV$$

Da cui ricaviamo la portata di combustibile, pari a:

$$\dot{m}_{comb} = \frac{333 * 10^3}{35000 * 10^3} = 0,0095 \frac{kg}{s}$$



Rendimento energetico di un moderno motore a combustione interna per cogenerazione a gas metano [Jenbacher-GE]



La potenza termica dissipata nei fumi è:

$$\dot{Q}_f = 0,4 * \dot{Q}_H = 133 \text{ kW};$$
$$\dot{Q}_{pareti} = 0,3 * \dot{Q}_H = 100 \text{ kW}$$

Questo ultimo termine attraversa il blocco del motore ed è scambiato con il liquido di raffreddamento.  
Analisi exergetica interna

L'exergia (potenza exergetica) da flusso di calore si determina con la relazione seguente:

$$\dot{\Phi}_H = \dot{Q}_H \left( 1 - \frac{T_0}{T_H} \right)$$

Ossia è il calore moltiplicato per il fattore di Carnot. Applicata alla potenza termica erogata a 1500 K (333kW) dà:

$$\dot{\Phi}_H = 268 \text{ kW}$$

La potenza termica ceduta alle pareti ( 100 kW) determina una potenza exergetica:

$$\dot{\Phi}_{450K} = 35 \text{ kW}$$

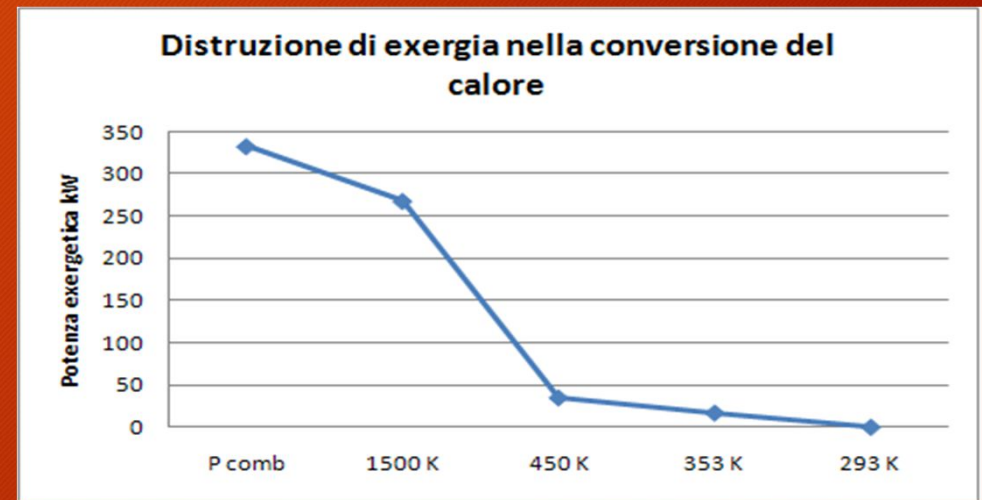
La stessa potenza, nel refrigerante determina una potenza exergetica:

$$\dot{\Phi}_{353K} = 17 \text{ kW}$$

## OSSERVAZIONI

oltre alla potenza meccanica (100 kW) ricavata dal motore, equivalente ad un flusso exergetico netto, il calore recuperabile (100 kW) raddoppia il rendimento di primo principio, ma comporta una distruzione di exergia prima nella combustione, ma soprattutto a causa dell'elevato salto termico tra cilindro e carcassa del motore.

Le combustioni (con le loro elevatissime temperature) hanno un senso dal punto di vista termodinamico unicamente per la produzione di energia meccanica-elettrica, ma devono essere evitate se lo scopo è la produzione di calore, a favore di sistemi più efficienti.



## Indici della cogenerazione

$$\eta_I = \frac{\dot{W} + \dot{Q}_u}{\dot{Q}_{comb}}$$

Rendimento di 1° principio: elettricità e calore hanno lo stesso «valore» termodinamico. Privilegia gli impianti che producono calore utile (è più facile produrre Q che EE). Non evidenzia le irreversibilità di processo, termodinamicamente è un indice incompleto;

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W} + \dot{Q} * (1 - \frac{T_a}{T_{mu}})}{\dot{Q}_{comb}}$$

Rendimento di 2° principio: pesa il calore rispetto al massimo lavoro ottenibile, quindi privilegia i sistemi più efficienti, che sono quelli che hanno indici elettrici più elevati; (include la T ambiente, e la T media dell'utenza all'uscita dello scambiatore)

## PES - PRIMARY ENERGY SAVING

La cogenerazione è sostenuta con incentivi sulla produzione elettrica se soddisfa determinati requisiti. Il primo parametro è il PES = RISPARMIO DI ENERGIA PRIMARIA. E' calcolato rispetto alla produzione semplice separata di elettricità e calore, con riferimento alle migliori tecnologie commercialmente disponibili. (rendimento elettrico da generazione semplice = 0,55, rendimento termico da generazione semplice=0,95).

$$PES = \frac{E_s - E_c}{E_s} = 1 - \frac{E_c}{\frac{E_e}{\eta_{es}} + \frac{E_t}{\eta_{ts}}} = \frac{\text{Risparmio di energia primaria da cogenerazione}}{\text{energia primaria richiesta dalla generazione separata}}$$

$E_c$  = energia primaria richiesta dal cogeneratore, ricavata come segue:

$$E_c = \frac{E_e + E_t}{\eta_{cog}}$$

Riprendendo l'esempio precedente, ipotizzando di recuperare tutta l'energia meccanica come EE, e il 50% del calore ceduto ai fumi, ( $T_{mu} = 400 \text{ K}$ ) ricaviamo i seguenti valori:

$$\eta-l = 0,8 = 80\%$$

$$\eta-ex = 0,20 = 20\%$$

$$PES = 0,067 = 6,7\%$$

L'utilizzo del combustibile è quantitativamente elevato; l'efficienza di utilizzo è piuttosto bassa, segno che si dovrebbe ricercare un'alternativa senza passare per la combustione. Bisognerebbe chiedersi se si ha proprio necessità di autoprodursi EE. Il PES ci dice che il vantaggio rispetto alla generazione separata di Q e EE è modesta.

Cosa cambierebbe con una rete di teleriscaldamento di medie dimensioni? Modifichiamo il confine del sistema, ponendolo sui terminali interni dell'utenza (ambiente a  $20^\circ\text{C}$  circa) e teniamo conto delle perdite di rete (90% + 80% dentro gli edifici). Il rendimento di 1° p. scende significativamente, mentre il valore exergetico del Q cala in modo rilevante.

Potrebbero avere risultati migliori altre soluzioni tecnologiche: piccoli cogeneratori di quartiere, pompe di calore, con integrazione solare

## 3° UNITA'

86

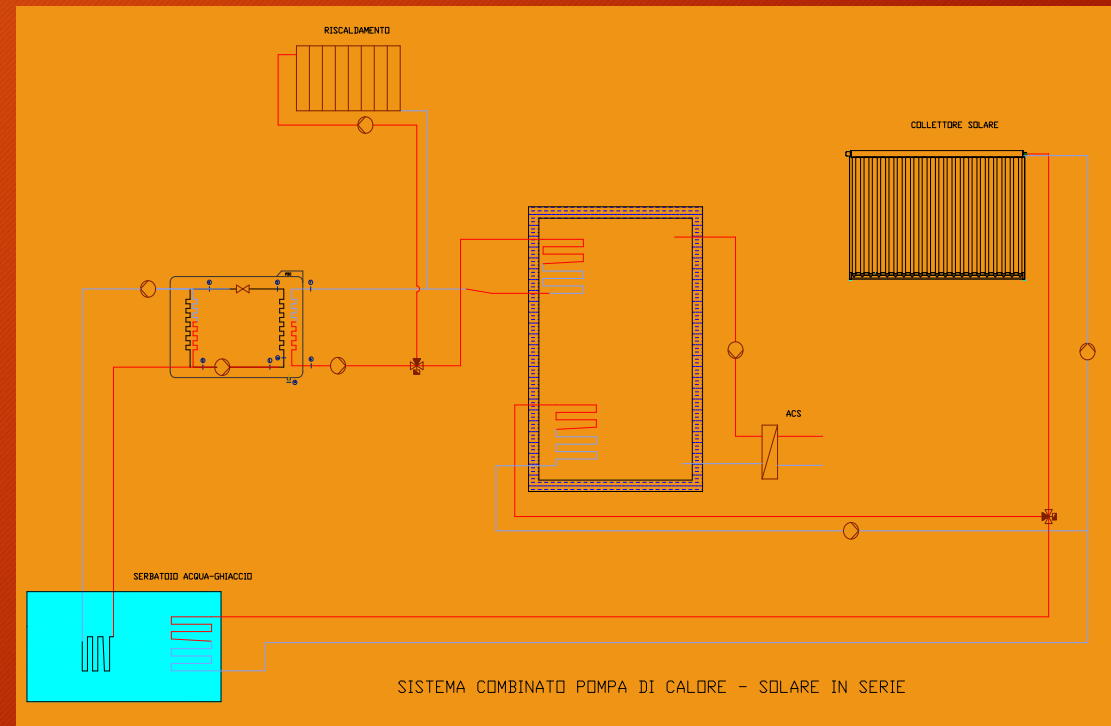
Gli impianti di recente tendono a schemi ibridi: Utilizzo integrato di energie rinnovabili e di fonti fossili, o di differenti fonti rinnovabili (biomassa + solare termico).

Lo schema descrive una possibilità di utilizzo dell'energia solare, per preriscaldare un accumulo a bassa temperatura (20-30°C). La pompa di calore innalza la T a 60°C circa, per servire un utenza per riscaldamento a bassa T.

Inserendo dati medi per tali impianti, si può ottenere un'efficienza exergetica superiore al 30%

Il calore solare potrebbe entrare direttamente nell'impianto, oppure essere utilizzato indirettamente grazie alla pompa di calore.

Le T delle sorgenti e dell'utenza sono prossime, ciò permette di avere rendimenti elevati





**Solar District Heating will play a big role in the future**



Solar district heating, Marstal, Denmark  
17,000 m<sup>2</sup> collector area

© Arcon



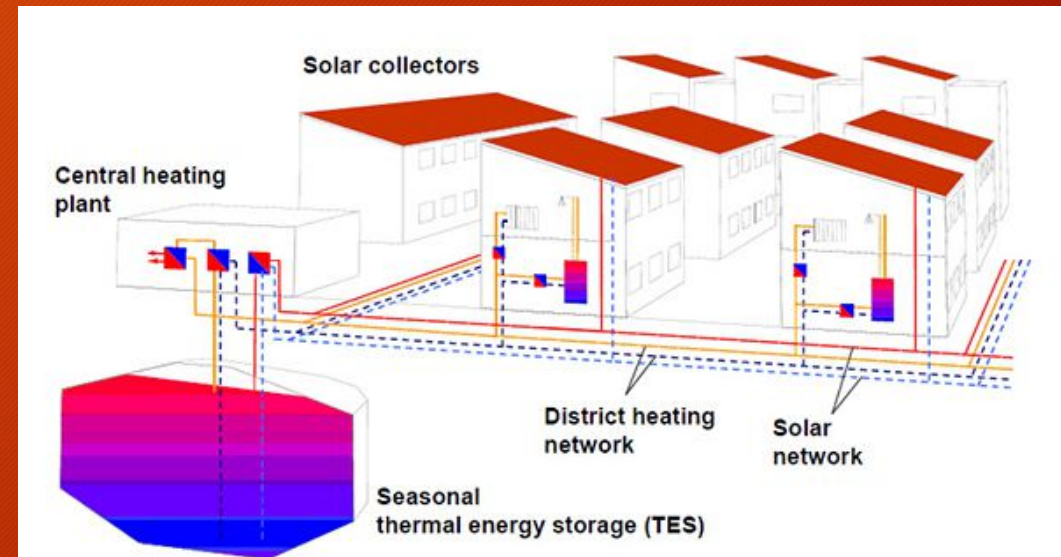
Semi-detached houses in Neckarsulm, Germany

© Solites



12,000 m<sup>3</sup> seasonal storage, Friedrichshafen, Germany

© Solites



Preparare le comunità alla transizione dalle fonti fossili

## 4° UNITA'

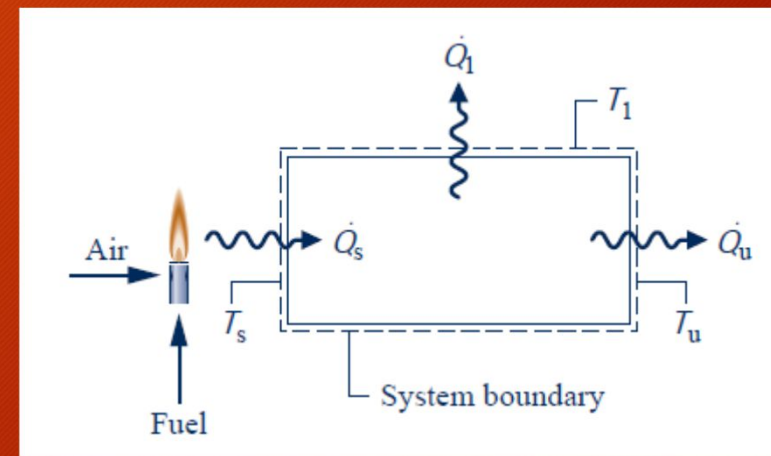
### Secondo principio e interazione delle macchine con l'ambiente

88

Riprendiamo l'analisi dei sistemi termodinamici e indaghiamo l'efficienza dei dispositivi che producono calore: partiamo da un combustore, che potrebbe rappresentare una caldaia ad alta efficienza.

In ingresso abbiamo combustibile e comburente, quindi entra una potenza termica, che in parte va persa con i fumi e in parte è calore utile.

Consideriamo come volume di controllo il confine del dispositivo, e ragioniamo in condizioni stazionarie.





## 4° UNITA'

# Secondo principio e interazione delle macchine con l'ambiente

89

L'efficienza di 1° principio vale:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{Q}_s}$$

Il rendimento exergetico:

$$\eta_{ex} = \frac{E_{x-out}}{E_{x-in}} = \frac{\left(1 - \frac{T_0}{T_u}\right) \dot{Q}_u}{\left(1 - \frac{T_0}{T_s}\right) \dot{Q}_s} = \text{introducendo il rendimento di 1° principio} = \eta \frac{\left(1 - \frac{T_0}{T_u}\right)}{\left(1 - \frac{T_0}{T_s}\right)}$$

$$\eta_{ex} = \eta \frac{\left(1 - \frac{T_0}{T_u}\right)}{\left(1 - \frac{T_0}{T_s}\right)}$$

## 4° UNITA'

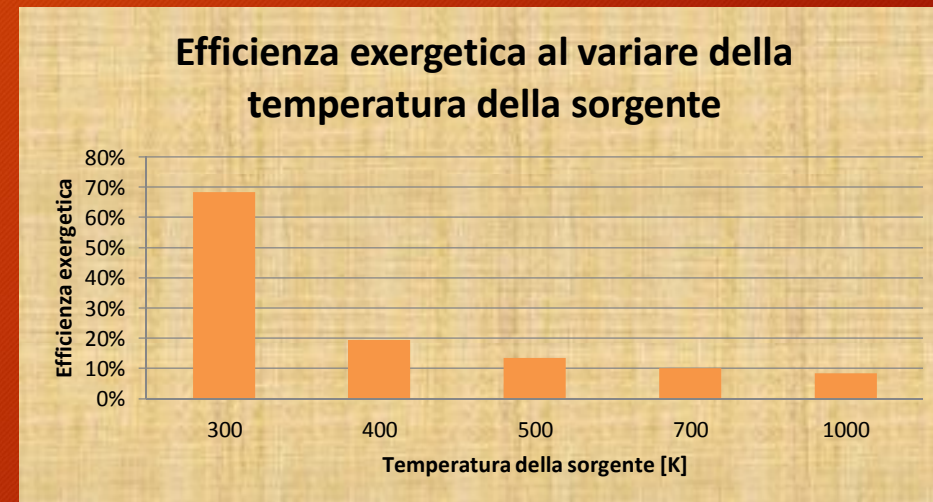
# Secondo principio e interazione delle macchine con l'ambiente

90

In questa espressione di efficienza, entrano sia il 1° principio sia il secondo (le T del calore alla sorgente e all'utilizzatore).

Non conta solo che sia efficiente la macchina, ma soprattutto che siano bilanciate le temperature dell'utente finale e del produttore di energia.

Se l'utente (settore civile) chiede calore negli ambienti a 293 K, immaginiamo di produrlo con la massima efficienza di 1° principio: 90%. Le efficienze complessive sono rappresentate di seguito:



## 4° UNITA'

# Secondo principio e interazione delle macchine con l'ambiente

91

Se si utilizzano caldaie ad alta efficienza, le temperature di produzione sono prossime ai 1500 K. Quindi le efficienze di 2° principio stanno intorno al 10%.

*Questa relazione ci dice che serve a poco investire risorse sull'efficienza di generazione, se non si bilanciano le exergie di utente e produttore!*

Con un cogeneratore industriale ho il vantaggio che prima genera elettricità: 35% di rendimento elettrico, e un altro 10% di rendimento termico, giungo al 45% totale. C'è però un grande problema: il cogeneratore deve stare vicino al centro abitato servito, con inevitabili ricadute delle emissioni sull'utenza.

Un impianto solare cittadino, interconnesso con una rete di distribuzione, dal grafico precedente si vede che può ambire a efficienze uguali o superiori a quelle dei cogeneratori o quanto meno li integra.

Analisi exergetica/entropica



utilizzo di fonti locali rinnovabili

## 4° UNITA'

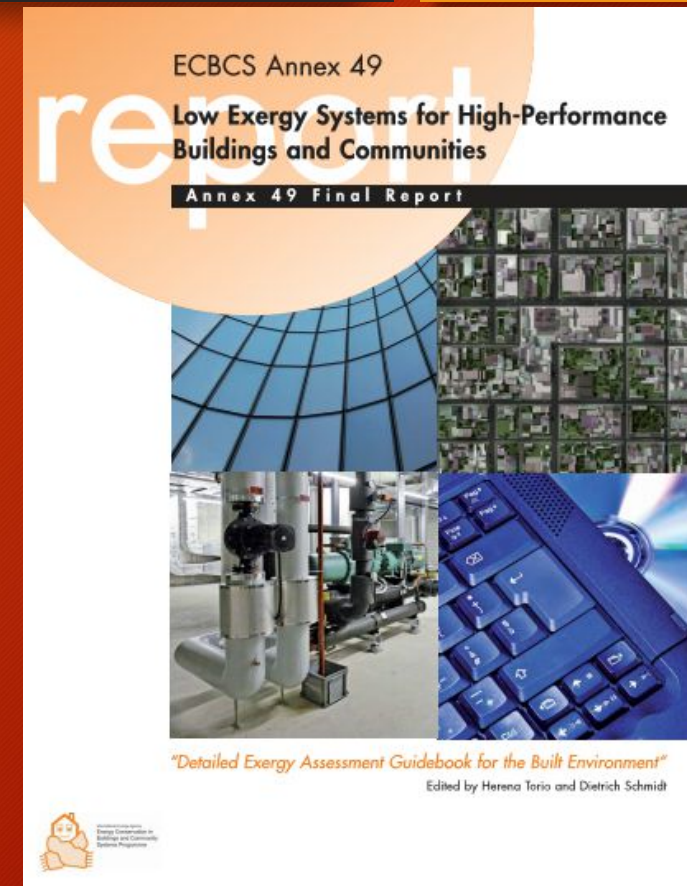
# Secondo principio e interazione delle macchine con l'ambiente

92

Il più ampio studio scientifico-tecnico [2011] a sostegno di un nuovo modo di progettare impianti energetici, tenendo conto dell'exergia e non solo dell'energia

- 1. E' più efficace ridurre i carichi exergetici installando componenti che riducono le perdite di calore e che sfruttano al massimo i guadagni solari degli edifici piuttosto che incrementare il rendimento delle caldaie in cui bruciare combustibili. (M. Shukuya, A. Hammache, 2004);*
- 1. Una analisi incrociata sulla base di energia ed exergia consente una chiara comprensione dell'importanza di allontanarsi dalle combustioni, per rispondere alla domanda di energia negli edifici, e pone le basi per nuove tecniche di progettazione energetica basate sull'uso di fonti rinnovabili e di fonti di calore a bassa temperatura*

«Low exergy systems for high performance buildings and communities»  
Rapporto scientifico elaborato dal Task 49 dell'IEA, pubblicato nel 2011 da Fraunhofer  
Institute for building Physics ([www.ibp.fraunhofer.de](http://www.ibp.fraunhofer.de))



## 4° UNITA'

# Secondo principio e interazione delle macchine con l'ambiente

93

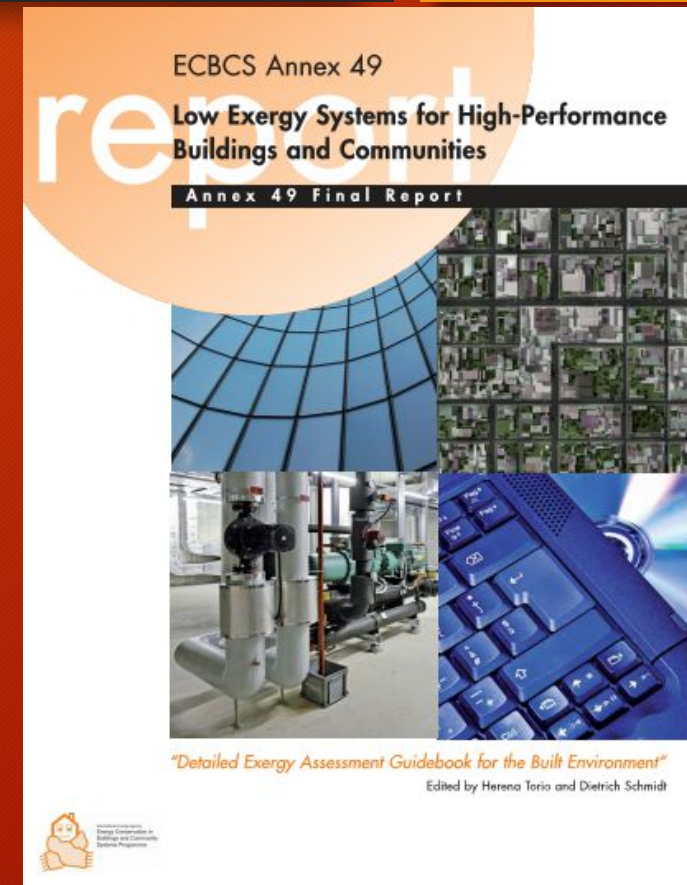
### Strategie per gli edifici

- Non utilizzare combustioni per produrre calore a bassa temperatura;
- Sfruttare il calore di recupero, e i flussi locali di calore a bassa temperatura;
- Ristrutturare gli impianti utilizzando sistemi radianti a bassa temperatura, che consentono l'integrazione con le fonti locali a bassa exergia (solare, etc);

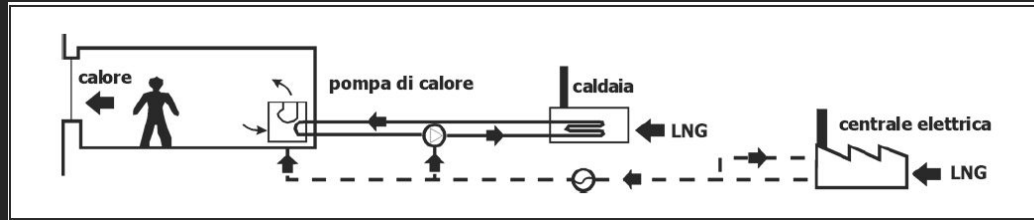
### Strategie per le comunità

- Nei nuovi edifici e nelle ristrutturazioni, realizzare edifici autosufficienti energeticamente;
- Fare incontrare domanda e offerta di energia di pari contenuto exergetico, promuovendo l'integrazione delle rinnovabili a bassa temperatura;
- Connettere in rete sistemi solari, e basati su altre rinnovabili locali, per ottenere elevati tassi di utilizzo, e ridurre i consumi invernali delle pompe di calore;
- Sostituire nei centri abitati le caldaie con pompe di calore;
- Promuovere la cogenerazione decentrata, se vi è una richiesta elettrica (non è il caso dell'Italia);
- Promuovere serbatoi di stoccaggio del calore su scala di quartiere,

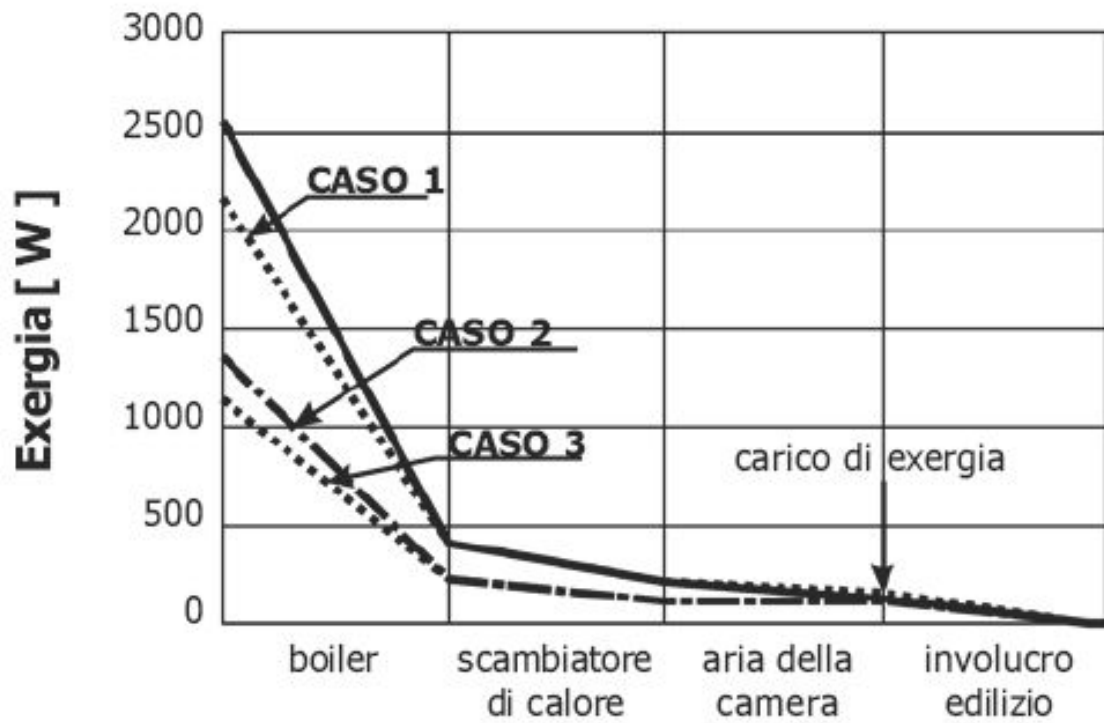
«Low exergy systems for high performance buildings and communities»  
Rapporto scientifico elaborato dal Task 49 dell'IEA, pubblicato nel 2011 da Fraunhofer  
Institute for building Physics ([www.ibp.fraunhofer.de](http://www.ibp.fraunhofer.de))



# 4° UNITA'



94



Case	Heat loss coefficient of building envelope		Thermal efficiency of boiler
1	108.7 W/K	(3.0 W/m <sup>2</sup> K)	80 %
2	57.1	(1.59)	80
3	57.1	(1.59)	95

Tra il caso 1 ed il caso 2 la differenza la fa l'isolamento termico, mentre in entrambi i casi la linea tratteggiata indica l'opzione 3, ossia il miglioramento dell'efficienza del generatore.

L'effetto sul bilancio exergetico è poco rilevante: Molto più rilevante la riduzione dei consumi energetici dell'edificio con la coibentazione!

Shukuya, Hammache. Exergy and space heating systems, 1994

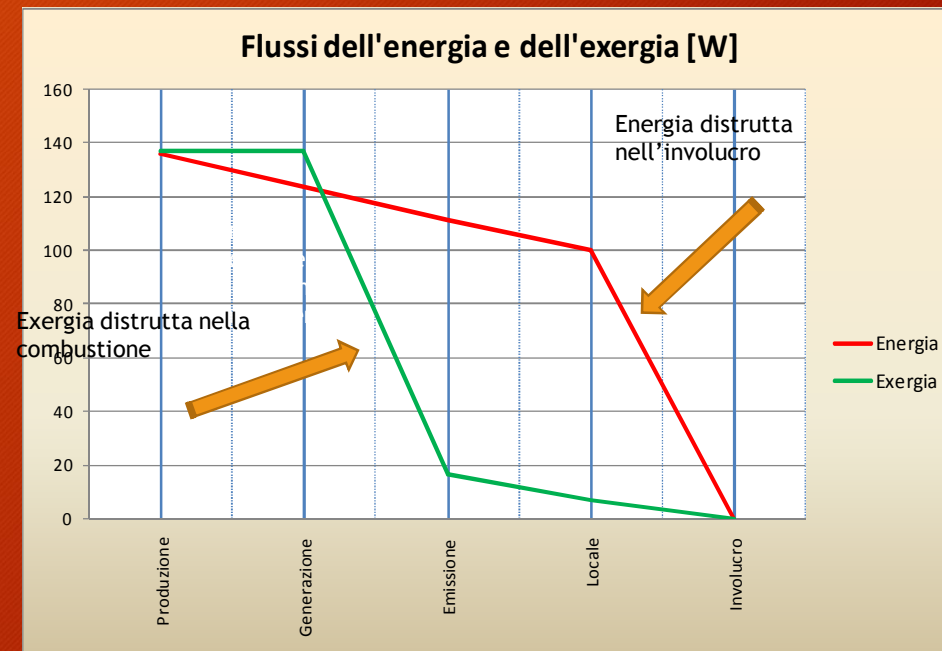
Flusso dell'energia ed exergia dal generatore al confine dell'edificio

**ENERGIA:** è quasi tutta sprecata nelle dispersioni all'involucro dell'edificio; a ben poco serve migliorare il rendimento di generazione (la cosiddetta efficienza);

**EXERGIA:** è distrutta quasi interamente nello scambio termico post combustione

**Quindi:**

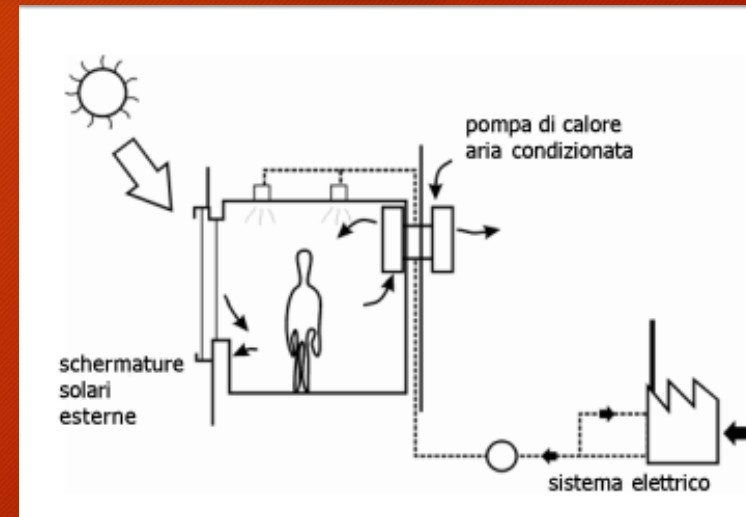
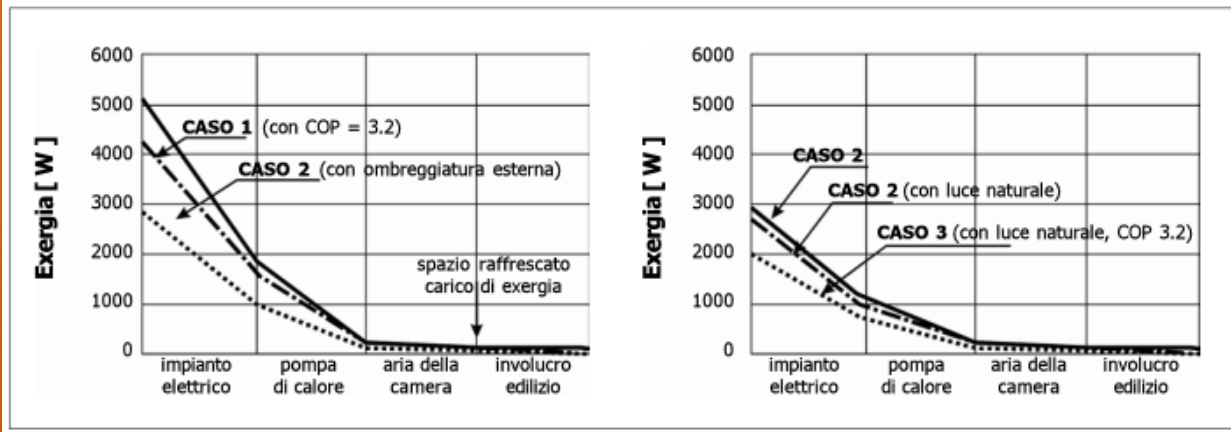
1. per risparmiare energia si deve intervenire a valle, sull'involucro edilizio e non sul generatore
2. Per utilizzare in modo appropriato l'energia si deve individuare una sorgente di contenuto exergetico basso



# 4° UNITA'

## Il caso della climatizzazione estiva

caso	coefficiente di perdita di calore dell'involucro edilizio (numeri cambi d'aria)	coefficiente di acquisizione di calore solare	COP della pompa di calore	temperatura dell'aria allo sbocco esterno dell'unità interna della pompa di calore	tasso di generazione di calore dovuto all'illuminazione elettrica
1	108.7 W/K (0.8 h-1)	0.7	2.7	16°C	480 W
1'	108.7 W/K (0.8 h-1)	0.7	3.2	16°C	480 W
2	57.1 W/K (0.4 h-1)	0.35	2.7	16°C	480 W
2'	57.1 W/K (0.4 h-1)	0.35	2.7	16°C	160 W
3'	57.1 W/K (0.4 h-1)	0.35	3.7	20°C	160 W









Il caso 1 è quello in cui l'isolamento termico dell'involucro edilizio è moderato e il controllo solare è realizzato mediante dispositivi interni per l'ombreggiatura; il caso 1' è quello in cui solo il coefficiente di performance (COP) ha subito un incremento; nel caso 2 l'isolamento termico è stato incrementato e un dispositivo esterno per l'ombreggiatura sostituisce quello interno; nel caso 2' l'illuminazione diurna riduce il tasso di generazione di calore dovuto all'illuminazione elettrica; nel caso 3' la temperatura dell'aria allo sbocco esterno e il COP sono stati aumentati.



# 4° UNITA'

## Secondo principio e interazione delle macchine con l'ambiente

FONTI DI ENERGIA	QUALITA' (EXERGIA)	UTILIZZI
 <ul style="list-style-type: none"> <li>Petrolio</li> <li>Carbone</li> <li>Gas naturale</li> <li>Biomasse</li> <li>Fotovoltaico</li> <li>Solare termodinamico</li> <li>Eolico/idroelettrico</li> </ul>	ELEVATA	<ul style="list-style-type: none"> <li>E.E. in Motori elettrici</li> <li>E.E. Illuminazione</li> <li>E.E. App. elettroniche</li> <li>E.E. Pompe di calore</li> <li>Energia meccanica</li> </ul> 
 <ul style="list-style-type: none"> <li>Scarti calore alta T° da processi da industria da produzione EE</li> </ul>	MEDIA	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cottura</li> <li>Essiccazione</li> <li>Lavaggio</li> <li>Sterilizzazione</li> <li>etc</li> </ul> 
 <ul style="list-style-type: none"> <li>Scarti calore bassa T° da cogenerazione*</li> <li>Geotermico</li> <li>Solare termico</li> <li>Serbatoi naturali</li> </ul>	BASSA	<ul style="list-style-type: none"> <li>Acqua calda sanitaria</li> <li>Riscaldamento edifici</li> <li>Essiccazione</li> <li>Lavaggio</li> </ul> 

\* ( in presenza di fabbisogno di produzione di energia elettrica)

Fonti energetiche ed utilizzi classificati in base alla qualità dell'energia (exergia). La qualità/exergia della fonte utilizzata deve essere di livello pari a quello dell'utilizzo richiesto

La scala dell'energia/exergia

Un caso studio dall'Annex 49: Oberzwehren, frazione di Kassel (D)

Progetto di nuovo quartiere, su aree in passato occupate dalla Università locale, con edifici di elevato standard Energetico ambientale.

Utilizzo di riscaldamento radiante a bassa temperatura negli edifici.

Utilizzo di rete di teleriscaldamento pubblica alimentata da centrale di cogenerazione, ma con scambiatore centralizzato di disaccoppiamento, che rende indipendenti le due reti; alimentazione a bassa temperatura, per minimizzare la perdita di exergia (50°C-30°C);

Utilizzo di impianti solari termici e di pompe di calore geotermiche;

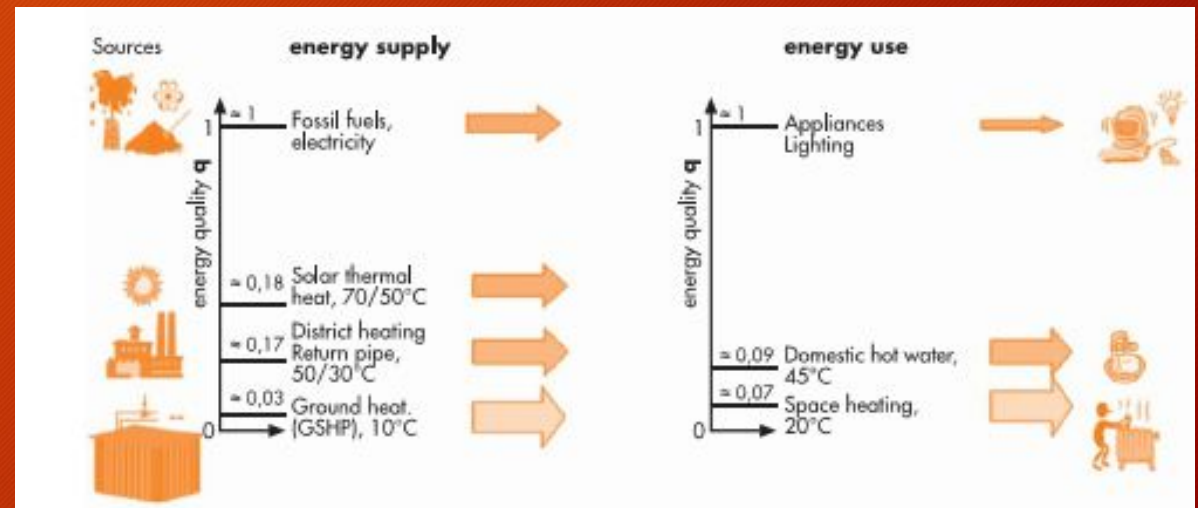
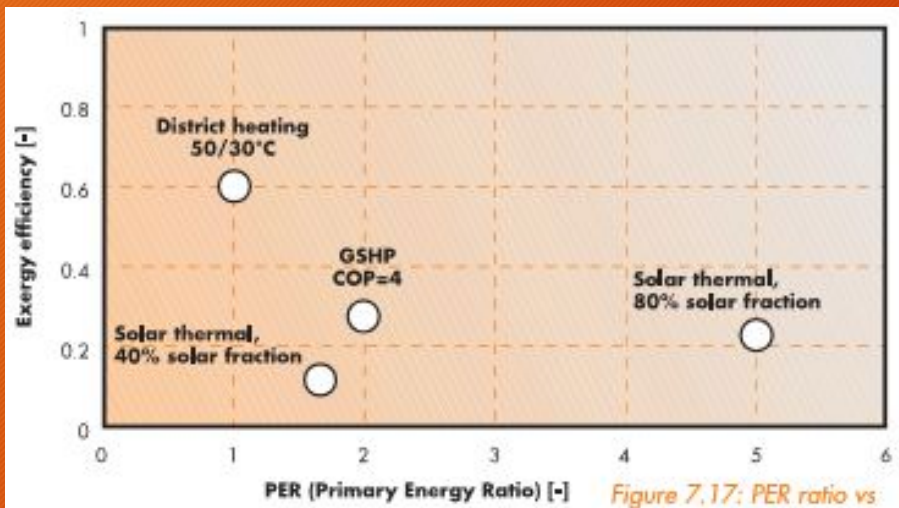


# 4° UNITA'

## Secondo principio e interazione delle macchine con l'ambiente

Un caso studio dall'Annex 49: Oberzwehren (D)

Diagramma dell'efficienza e del PER: il PER è proporzionale all'utilizzo di rinnovabili nel mix energetico.



### EXERGIA E SOSTENIBILITA'

L'analisi basata sul 2° principio deve integrare quella basata sul bilancio dell'energia

L'analisi exergetica è prioritaria nella fondazione di scelte politiche sostenibili per almeno i seguenti motivi:

- permette di comprendere come debbano essere scelte le fonti di energia in base al minimo squilibrio possibile tra contenuto exergetico della fonte e dell'utenza; da ciò deriva ad esempio la necessità, già descritta, di utilizzo della radiazione solare in tutte le sue forme dirette ed indirette, o calore ricavato dall'ambiente localmente, per rispondere alle enormi richieste di calore a bassa temperatura per riscaldamento di ambienti;
- ogni sostanza, combustibile, vettore utilizzato come fonte di energia si trasforma, portandosi in condizioni di squilibrio rispetto all'ambiente, quindi distruggendo exergia; l'exergia è correlata a questo squilibrio rispetto alle condizioni ambientali.

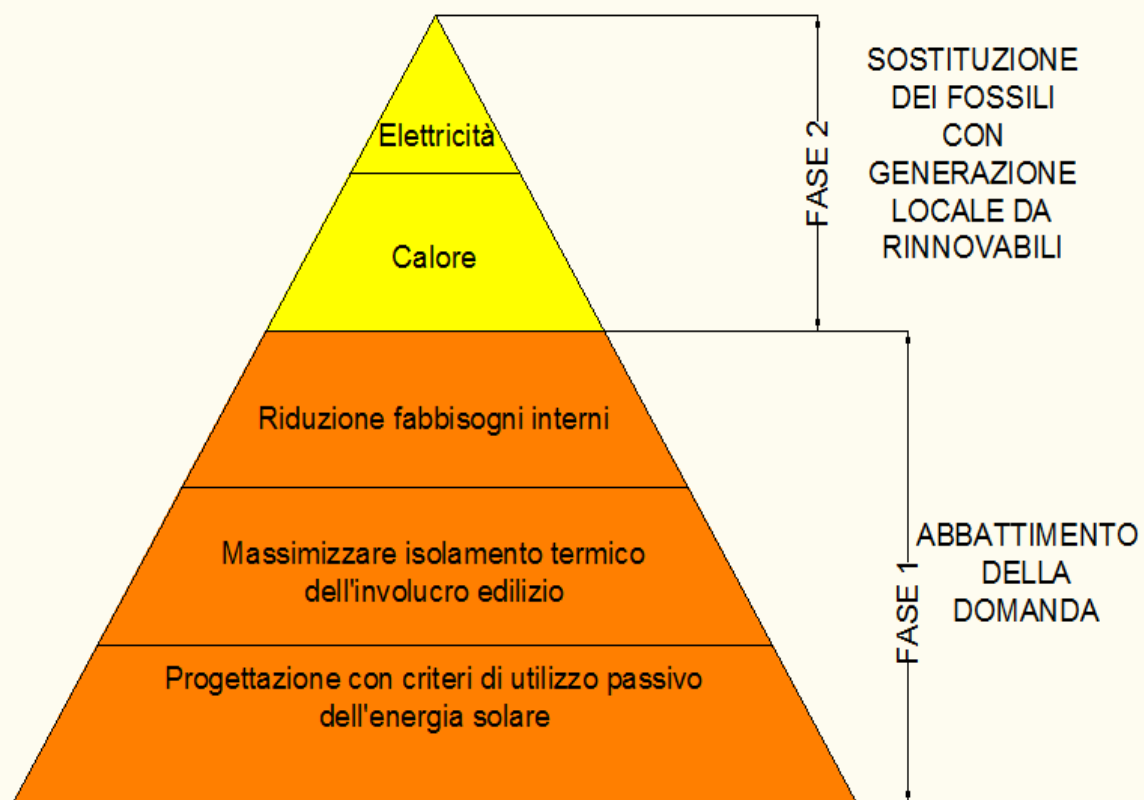
## 4° UNITA'

# Secondo principio e interazione delle macchine con l'ambiente

101

### EXERGIA E SOSTENIBILITA': le strategie

- ❑ Sul versante dell'uso del calore a bassa temperatura, è necessario puntare sulla energy conservation con interventi di riqualificazione energetica degli edifici e degli impianti, non essendo prioritario investire sull'efficienza degli impianti;
- ❑ Questa politica permetterà alle fonti rinnovabili di coprire finalmente quote rilevanti dei consumi, sia domestiche che industriali;
- ❑ Si richiede una revisione dell'approccio alle risorse, che si dovrà orientare sempre più all'uso di fonti rinnovabili, decentrate, facilmente disponibili, di flusso exergetico coerente con gli utilizzi;
- ❑ Si dovrà ridurre l'uso delle combustioni, per limitare l'effetto serra e lo spreco di energia disponibile, allo stretto necessario per utilizzi industriali di processo, ove non sia idonea la fonte solare; (vedasi la vision austriaca al 2050)



## 4° UNITA'

### implicazioni per l'economia?

103

Il 2° principio comporta delle implicazioni rispetto alle scienze economiche?

Il contributo di Nicolas G. Roegen (1906, Romania - 1994, USA)

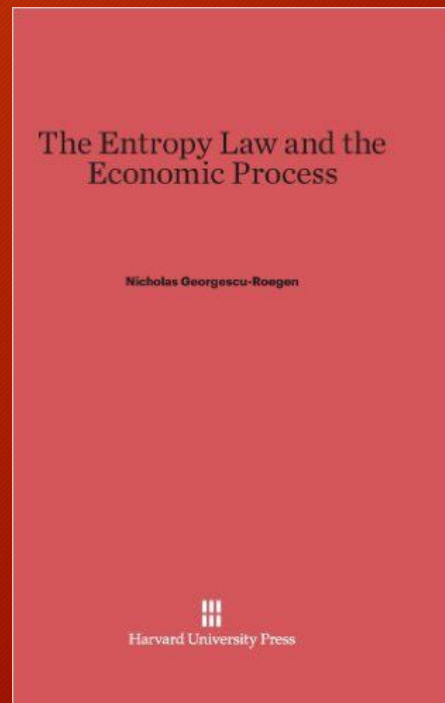
Laurea in matematica, dottorato in statistica alla Sorbona, studi economici nelle università USA

Critica dell'economia standard degli economisti tradizionali, come anche quella marxista sulla teoria della crescita;

Essi prendono a prestito l'approccio meccanico, per cui il processo economico è un sistema chiuso circolare e autosufficiente, tra produzione e consumo all'infinito; non è necessario inserire l'ambiente nella descrizione analitica dei processi;

L'essere umano riuscirà sempre a trovare nuove tecnologie più produttive e nuove fonti di energia per la crescita

In realtà l'economia provoca cambiamenti cumulativi sull'ambiente;

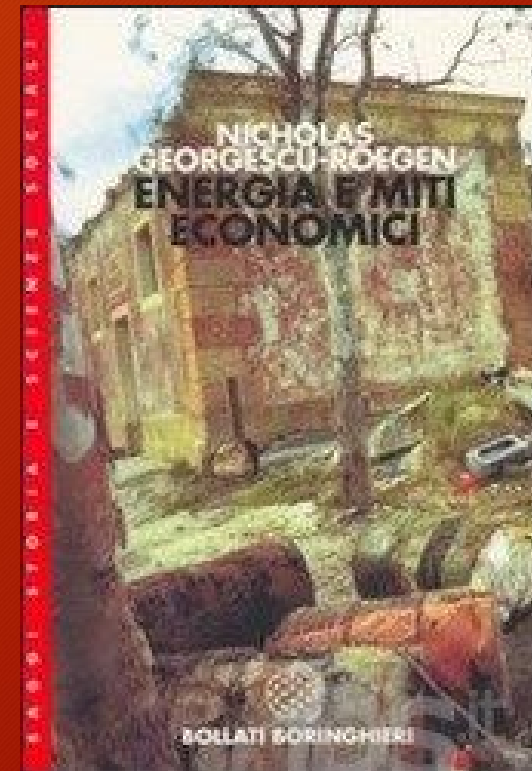


## 1° UNITA'

104

- Scriveva N. Georgescu Roegen:

*“gli economisti amano dire che non possiamo ottenere nulla gratis. La legge dell'entropia ci insegna che la regola della vita biologica e - nel caso dell'uomo - della sua continuazione economica, è molto più severa. In termini di entropia, il costo di qualunque intrapresa biologica o economica è sempre maggiore del prodotto. In termini di entropia, qualunque attività del genere umano ha inevitabilmente per risultato un deficit”.*



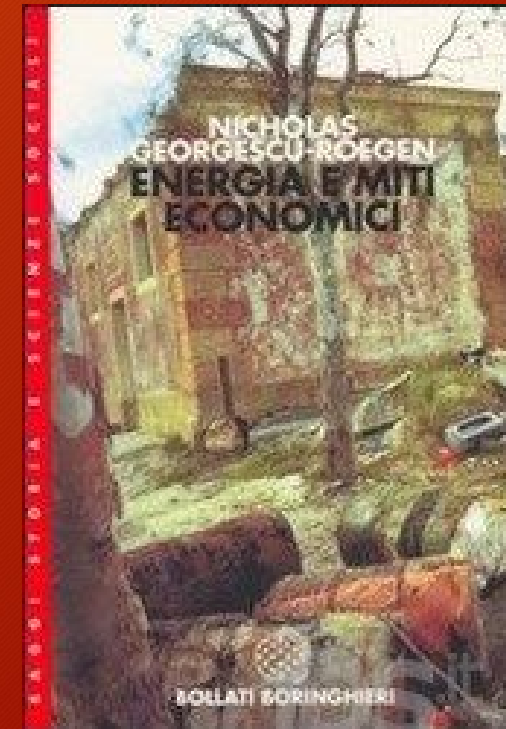


## 4° UNITA'

### implicazioni per l'economia?

105

- La legge dell'entropia è la sola legge naturale che riconosce che anche l'universo materiale è soggetto ad un cambiamento qualitativo irreversibile, a un processo evolutivo;
- I processi economici e produttivi non possono non tener conto dell'entropia, ossia della degradazione dell'energia disponibile in energia non disponibile;
- L'agricoltura industriale è una sperperatrice di energia e rimpiazza l'uso dell'energia solare con i fossili, che sono scarsi; questo deficit si riscontra in particolare nelle varietà a resa elevata;
- L'economia deve diventare parte dell'ecologia, perché il dominio dei fenomeni considerati da quest'ultima è più ampio di quello dell'economia;
- L'economia è in grado di amministrare risorse scarse della generazione attuale, mentre l'ecologia si preoccupa della distribuzione del patrimonio naturale tra tutte le generazioni;



## 4° UNITA'

### implicazioni per l'economia?

106

Il 2° principio comporta delle implicazioni rispetto alle scienze economiche?

Invece di continuare a essere opportunisti al massimo grado e in luogo di concentrare le nostre ricerche su nuovi modi economicamente efficienti per attingere alle fonti minerali di energia, dovremmo dirigere tutti i nostri sforzi a migliorare i modi di utilizzazione diretta dell'energia solare, la sola fonte pulita e praticamente illimitata.

Le tecniche già conosciute dovrebbero venire diffuse senza indugio fra tutti i popoli, così che tutti possano imparare dalla pratica a sviluppare le professioni necessarie.

Propone una 4° legge della termodinamica: quella che riguarda la materia disponibile, e che analogamente all'energia disponibile, diminuisce sempre. La materia totale si conserva, ma non la sua disponibilità. Il riciclaggio totale è impossibile, così come lo sfruttamento completo di qualsiasi minerale.



## 4° UNITA'

### implicazioni per l'economia?

107

Il 4° principio della termodinamica secondo Roegen:

Energia	Materia
<i>1. Senza consumo di energia non si ha lavoro meccanico</i>	<i>1 a. Senza consumo di materia non si ha lavoro meccanico</i>
<i>2. E' impossibile ottenere da una data quantità di energia disponibile più della quantità equivalente di lavoro meccanico</i>	<i>2 a. Da un dato sistema materiale si può ottenere solo una limitata quantità di lavoro meccanico</i>
<i>3. Non c'è modo di eliminare completamente da un sistema l'energia non disponibile</i>	<i>3 a. Non c'è modo di eliminare completamente da un miscuglio materiale una sostanza contaminante</i>

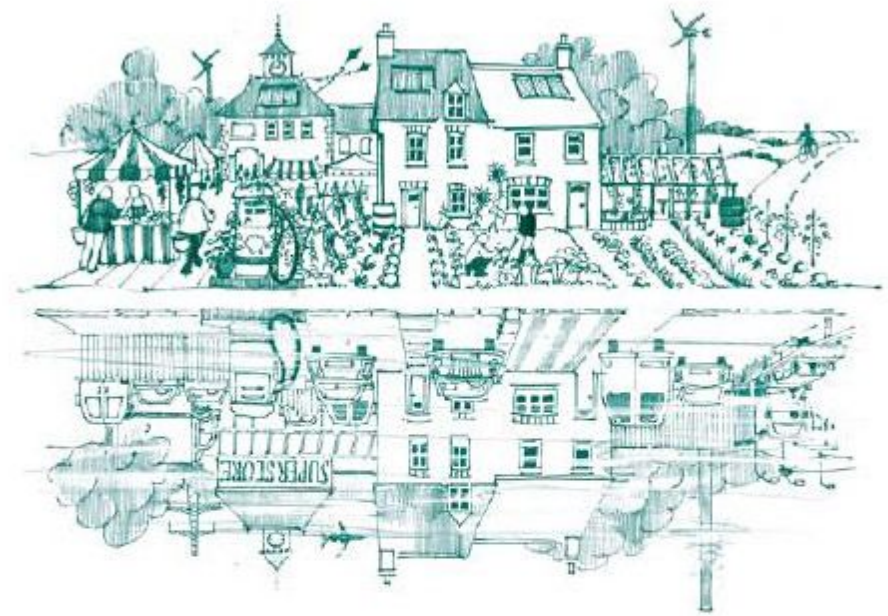


### Verso la bio economia

Associazioni, movimenti, ricercatori, enti pubblici, che lavorano nella stessa direzione:

### LA TRANSIZIONE dall'economia fossile

- Auto sostentamento locale ( local self reliance)
- Energy conservation ed energie rinnovabili decentrate
- Gruppi di acquisto di prodotti anche locali, energia, mobilità; reti energia decentrate e partecipate dai consumatori;
- finanza etica;
- Forme di cooperazione internazionale ed applicazione di forme di difesa non armata



**IN TRANSITION**  
From oil dependence to local resilience

*“Da dove provengono le nebbie sopra le vostre città?”  
chiese uno dei Marziani.*

*“Principalmente dalla combustione del carbone”  
replicò Grunthe.*

*“Perché non prelevate l’energia direttamente dalla  
radiazione solare? Col vostro sistema, state  
utilizzando per vivere il capitale invece degli  
interessi.”*

Kurd Lasswitz. Su due pianeti, 1897.

