

Il ruolo dell'energia nella descrizione dei fenomeni naturali:
ENERGIA COME PRINCIPIO REGOLATORE
una proposta didattica

- 1 - Alcuni esperimenti
- 2 - Il modello di riferimento
- 3 - Rappresentazione grafica
- 4 - L'energia scambiata e l'energia immagazzinata
- 5 - Discussione di alcuni esempi

Michele D'Anna – Alta Scuola Pedagogica e Liceo cantonale di Locarno

1

1 – Alcuni esperimenti

Per iniziare consideriamo alcuni esperimenti in ambiti diversi

Meccanica

Termologia

Elettricità Chimica

Elettricità

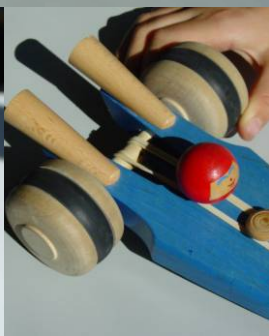
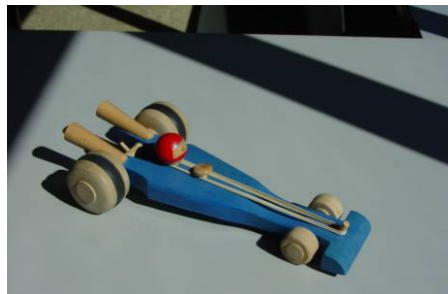
Termologia Elettricità

Meccanica Termologia

Chimica

2

**Cominciamo
con una
macchinina a
molla e ...
una sua amica**



3

**Questo è un mulino per
i piccoli ...**



4

... e questo un mulino per i grandi ...



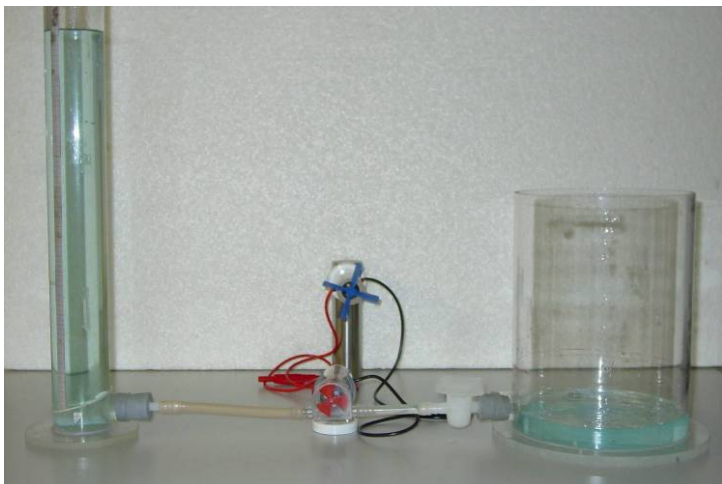
5

mentre questo è un
mulino ...
che non c'è!



6

**Ecco invece qualcosa che funziona:
un mini-mulino che alimenta un motore elettrico**

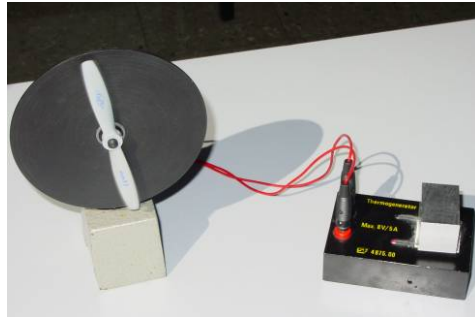


7

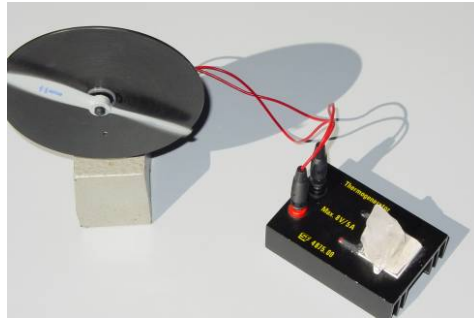
Qui un motore
un po' diverso ...



8



.... e qui una variante moderna



9

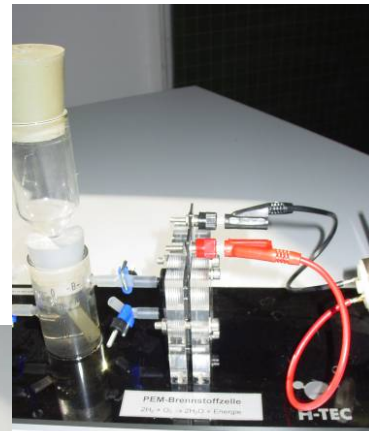
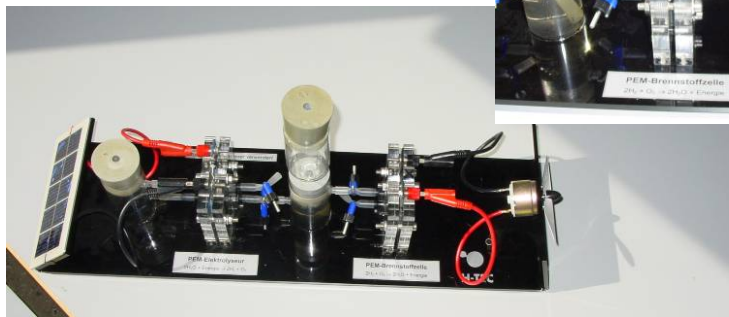
Ecco invece un asciugacapelli



a riposo e ...
in azione

10

Questa è una cella a combustibile (idrogeno / aria)



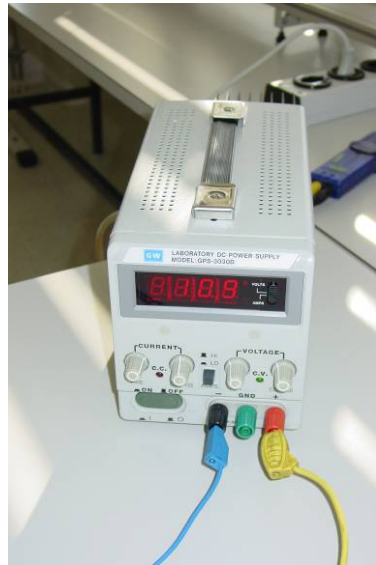
11

E questa una pompa per l'aria, ossia un dispositivo che ...



12

Mentre questo è un alimentatore elettrico, ossia ...



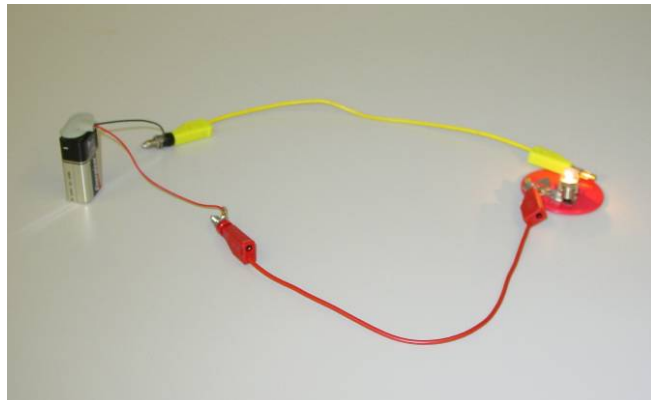
13



Questo è un apparecchio per l'elettrolisi, ossia

14

Qui una batteria alimenta una lampadina; ossia ...



15

Alcune domande:

- *Quali compiti assolvono i dispositivi mostrati?*
- *Che cosa hanno in comune le diverse situazioni viste?*
- *Riscontrate delle affinità anche a livello di linguaggio nella descrizione dei vari dispositivi visti?*
- *Sapreste individuare delle grandezze che nella descrizione delle varie situazioni svolgono una funzione analoga?*

16

2 - Il modello di riferimento

CONOSCENZE

L'energia:

- può essere immagazzinata;
- può fluire da un sistema ad un altro;
- quando fluisce è sempre accompagnata dal flusso di un'altra grandezza;
- può essere trasferita da un portatore ad un altro;
- è soggetta ad una legge di bilancio;
- è una grandezza conservata.

COMPETENZE

L'allievo deve saper:

- individuare a livello qualitativo come e dove l'energia è immagazzinata, i flussi energetici e i processi nei quali l'energia viene dissipata;
- descrivere e prevedere, attraverso bilanci energetici quantitativi, i cambiamenti che avvengono in un sistema;
- riconoscere il legame tra l'irreversibilità dei fenomeni e la dissipazione dell'energia;
- utilizzare, in situazioni complesse, l'energia come chiave di lettura per le trasformazioni che avvengono in sistemi aperti, chiusi o isolati.

18

L'energia come principio regolatore

Nei *processi naturali* solitamente sono implicate più correnti: possiamo dire che esse sono tra di loro *accoppiate*. È quindi di grande interesse capire il principio in base al quale sono "regolati" questi accoppiamenti. Come sappiamo, la *contabilità* in questo ambito è svolta dalla grandezza che noi chiamiamo *energia*. Essa ha quindi il ruolo di *principio regolatore*: in una data situazione, l'energia determina i tassi di accoppiamento tra i vari aspetti (meccanici, termici, elettrici, idraulici, chimici, ecc.) coinvolti nel processo considerato.

19

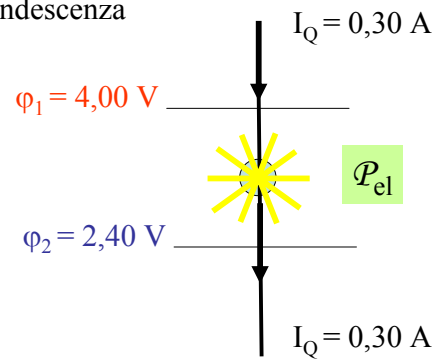
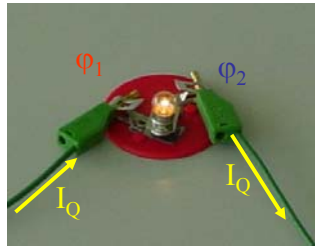
Per i processi dovuti ad una differenza di potenziale (cioè per i processi di *conduzione*) si trova *sperimentalmente* che la *potenza* \mathcal{P} (ossia la quantità di energia che per unità di tempo viene richiesta o messa a disposizione nel processo) può essere espressa dalla relazione:

$$\mathcal{P} = I_x \cdot \Delta\varphi_x$$

20

Flusso di energia associato a un dato flusso di carica elettrica

Esempio: lampadina ad incandescenza



$$I_Q = 0,3 \text{ A} = 0,3 \text{ C/s} = 0,3 \text{ W/V}$$

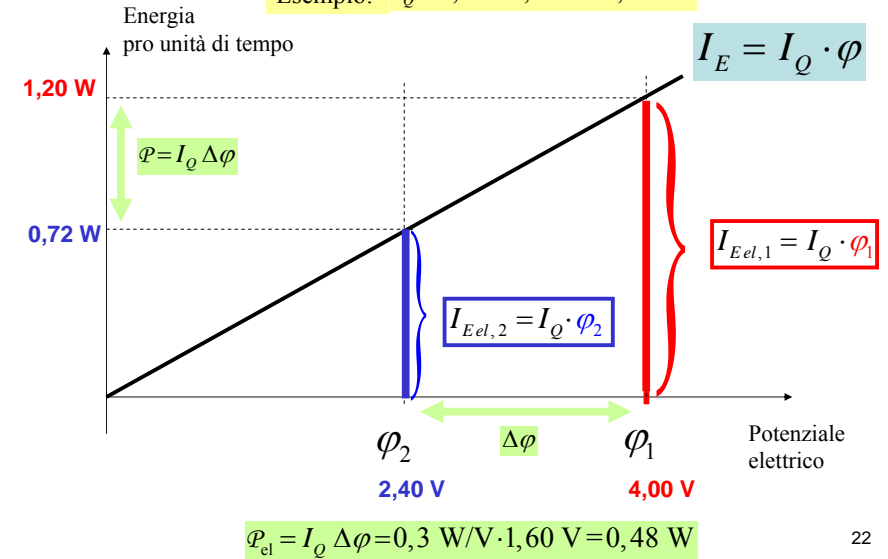
$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 4,00 \text{ V} - 2,40 \text{ V} = 1,60 \text{ V}$$

$$P_{el} = I_Q \Delta\varphi = 0,3 \text{ W/V} \cdot 1,60 \text{ V} = 0,48 \text{ W}$$

21

Flusso di energia associato a un dato flusso di carica elettrica

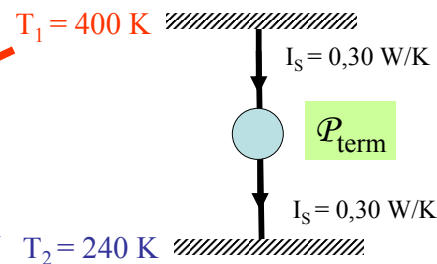
Esempio: $I_Q = 0,3 \text{ A} = 0,3 \text{ C/s} = 0,3 \text{ W/V}$



22

Flusso di energia associato a un dato flusso di entropia

Esempio: macchina termica reversibile



$$I_S = 0,3 \text{ Ct/s} = 0,3 \text{ W/K}$$

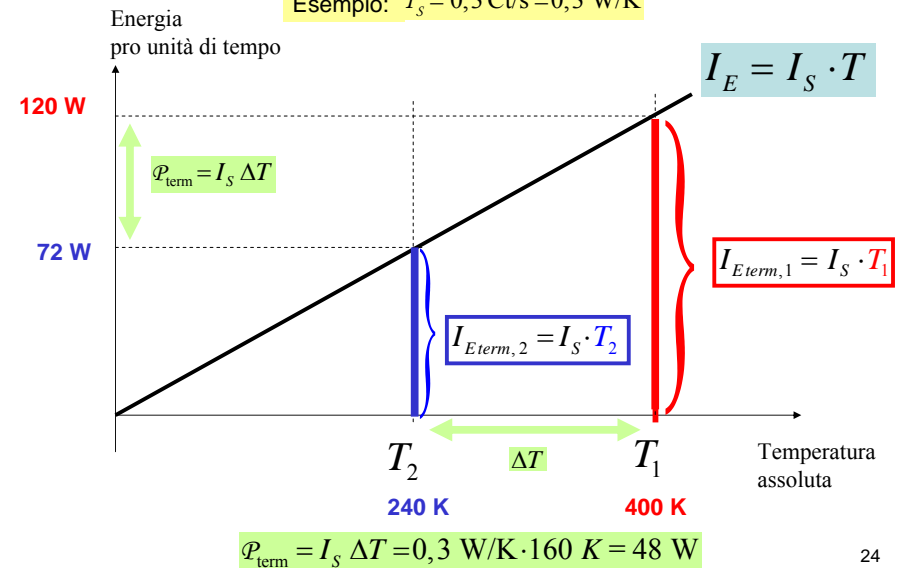
$$\Delta T = T_1 - T_2 = 400 \text{ K} - 240 \text{ K} = 160 \text{ K}$$

$$P_{term} = I_S \Delta T = 0,3 \text{ W/K} \cdot 160 \text{ K} = 48 \text{ W}$$

23

Flusso di energia associato a un dato flusso di entropia

Esempio: $I_S = 0,3 \text{ Ct/s} = 0,3 \text{ W/K}$

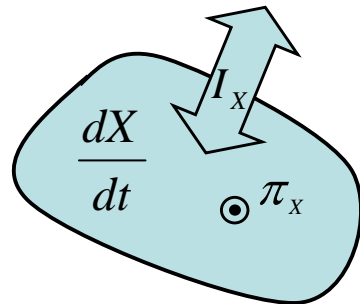


24

Breve riassunto

Per ogni **grandezza estensiva** è possibile scrivere una *relazione di bilancio (istantaneo)*

$$\frac{dX}{dt} = I_X + \pi_X$$



X : misura della grandezza
 I_X : misura dell'intensità di corrente
 π_X : misura del tasso di produzione/distruzione

25

Equazione di bilancio

idraulica $dV / dt = I_V$

elettricità $dQ/dt = I_Q$

meccanica $dp/dt = F$

termologia $dS/dt = I_S + \pi_S$

chimica $dn/dt = I_n + \pi_n$

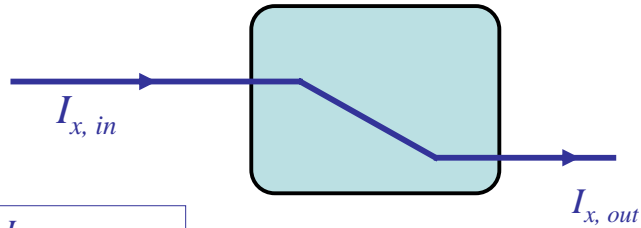
26

Campo di studio	Grandezza estensiva	Conservata / non conservata	Corrente associata	Grandezza intensiva	"Spinta" al trasferimento
Idraulica	Volume d'acqua V	conservata	Corrente d'acqua I_V	Pressione P	ΔP
Elettricità	Carica elettrica Q	conservata	Corrente elettrica I_Q	Potenziale elettrico ϕ	$\Delta \phi$
Meccanica (traslazioni)	Quantità di moto p_x	conservata	Corrente meccanica (traslazioni) I_{px} (o forza F)	Velocità v_x	Δv_x
Meccanica (rotazioni)	Quantità di moto angolare L_x	conservata	Corrente meccanica (rotazioni) I_{Lx} (o momento della forza M_{mecc})	Velocità angolare ω_x	$\Delta \omega_x$
Termologia	Entropia S	non conservata	Corrente d'entropia I_S	Temperatura assoluta T	ΔT
Chimica (trasformazioni della materia)	Quantità di sostanza n	non conservata	Corrente chimica (o di quantità di sostanza) I_n	Potenziale chimico μ	$\Delta \mu$

Campo di studio	Grandezza estensiva	Grandezza intensiva	Corrente associata	Trasporto di energia	Scambi di energia
Idraulica	Volume d'acqua V	Pressione P	Corrente d'acqua I_V	$I_E = I_V \cdot P$	$\Phi = I_V \cdot \Delta P$
Elettricità	Carica elettrica Q	Potenziale elettrico ϕ	Corrente elettrica I_Q	$I_E = I_Q \cdot \phi$	$\Phi = I_Q \cdot \Delta \phi$
Meccanica (traslazioni)	Quantità di moto p_x	Velocità v_x	Corrente meccanica (traslazioni) I_{px} (o forza F)	$I_E = I_{px} \cdot v_x$	$\Phi = I_{px} \cdot \Delta v_x$
Meccanica (rotazioni)	Quantità di moto angolare L_x	Velocità angolare ω_x	Corrente meccanica (rotazioni) I_{Lx} (o momento della forza M_{mecc})	$I_E = I_{Lx} \cdot \omega_x$	$\Phi = I_{Lx} \cdot \Delta \omega_x$
Termologia	Entropia S	Temperatura assoluta T	Corrente d'entropia I_S	$I_E = I_S \cdot T$	$\Phi = I_S \cdot \Delta T$
Chimica	Quantità chimica n	Potenziale chimico μ	Corrente chimica I_n rispettivamente tasso di trasformazione π_n	$I_E = I_n \cdot \mu$	$\Phi = I_n \cdot \Delta \mu$ $\Phi = \pi_{n(R)} \cdot \Delta \mu$

3 - Rappresentazione grafica del modello

Sistema di cui si vuole rappresentare il comportamento (regime stazionario)



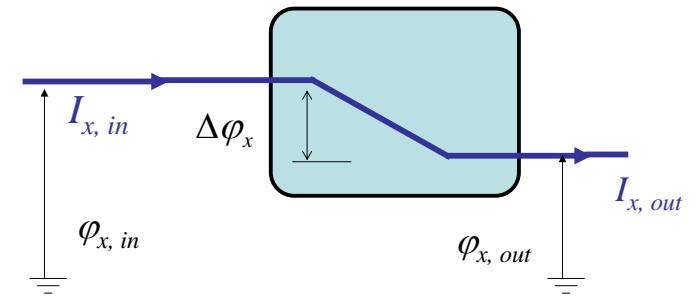
Corrente I_x associata alla grandezza estensiva X che supponiamo essere conservata

$$\frac{dX_{sist}}{dt} = I_{x,tot} = (I_{x,in} - |I_{x,out}|) = 0$$

$$I_{x,in} = |I_{x,out}|$$

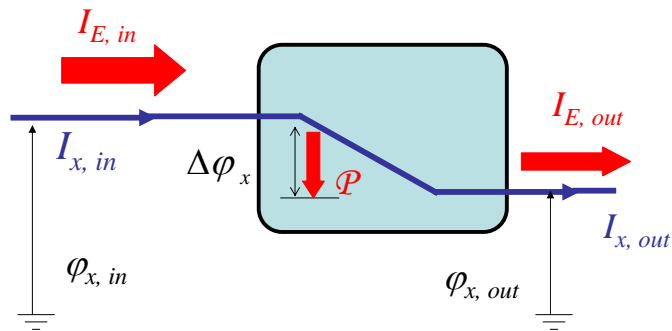
29

Potenziali:



30

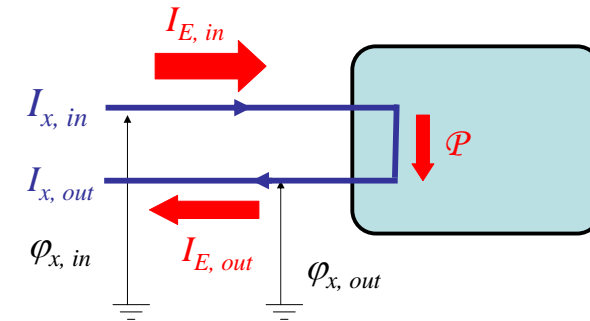
Aspetti energetici (1)



Bilancio per l'energia: $\mathcal{P} = I_{\mathcal{E},in} - |I_{\mathcal{E},out}|$

31

Aspetti energetici (2): *altro modo* di rappresentare

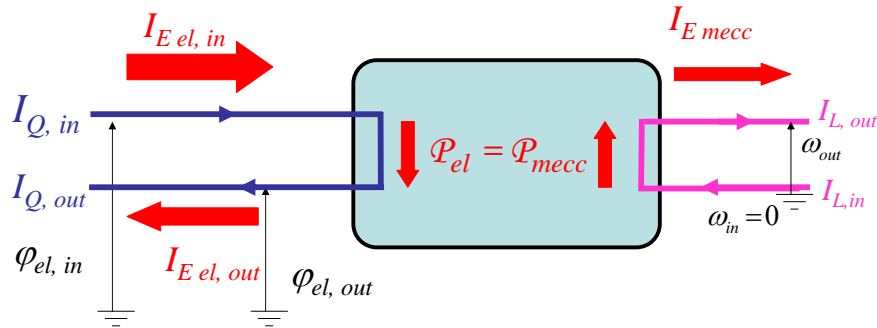


Bilancio per l'energia: $\mathcal{P} = I_{\mathcal{E},in} - |I_{\mathcal{E},out}|$

32

Adesso siamo pronti per rappresentare un “processo”,
ossia una trasformazione in cui l’energia passa da un
portatore ad un altro.

Esempio: motore elettrico (ideale)

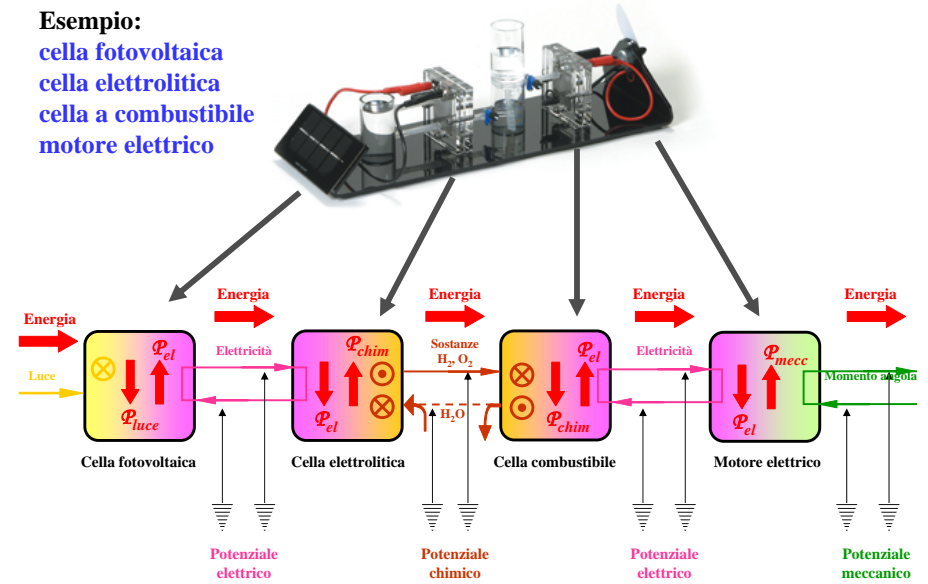


Bilancio per l’energia:

$$|I_{E\ mecc}| = I_{E\ el,\ in} - |I_{E\ el,\ out}|$$

33

Esempio:
cella fotovoltaica
cella elettrolitica
cella a combustibile
motore elettrico



(Ipotesi: rendimento del 100 %, ossia processi reversibili senza produzione di entropia) 34

4 - L’energia scambiata e l’energia immagazzinata

A) Come costruire l’espressione per la potenza?

Attraverso lo studio sperimentale di situazioni in cui un
medesimo effetto viene realizzato in modi diversi.

1) Turbina idraulica: l’apparecchiatura



Effetto scelto: stessa luminosità della lampadina (in pratica:
stessa tensione ai capi della lampadina)

35

Turbina idraulica: risultati sperimentali

differenza di pressione (bar)	tempo di raccolta (s)	quantità di acqua (litri)	intensità corrente (litri/s)	I . ΔP (potenza) (u.a)
0.66	9.6	2.40	0.25	0.17
0.72	7.4	1.60	0.22	0.16
0.82	7.8	1.40	0.18	0.15
0.92	8.0	1.43	0.18	0.17
1.20	10.9	1.73	0.16	0.19
1.22	14.4	2.15	0.15	0.18



36

2) Riscaldatore a immersione: l'apparecchiatura



37

Riscaldatore a immersione: risultati sperimentali

elemento	Intensità corrente I_Q (A)	Differenza potenziale $\Delta\varphi_{AB}$ (V)	$I_Q \cdot \Delta\varphi_{AB}$ (A.V)	Aumento temperatura/min $\Delta T/\Delta t$ (°C/min)
	2,60	2,70	7,02	0,46
	1,83	3,81	6,97	0,46
	3,62	1,94	7,02	0,47

38

B) Come esprimere l'energia immagazzinata?

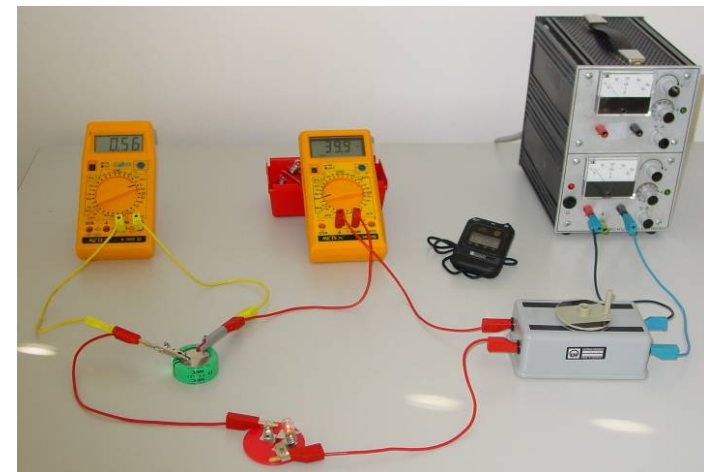
Attraverso lo studio di una situazione sperimentale in cui l'energia viene trasferita a poco a poco al "contenitore".

Esempi:

- 1) carica del condensatore
- 2) energia cinetica

39

B1) Carica del condensatore: l'apparecchiatura

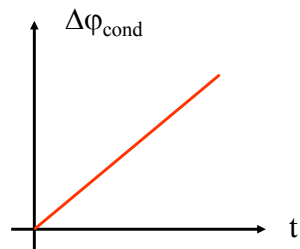


40

Carica del condensatore: risultati sperimentali

Ai capi del condensatore di capacità C viene creata a poco a poco una differenza di potenziale trasportando carica elettrica da un "polo" all'altro. Questa operazione viene effettuata mantenendo costante l'intensità della corrente ($I_Q = 20 \text{ mA}$).

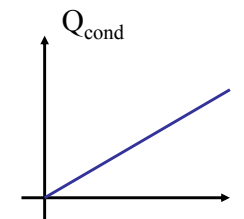
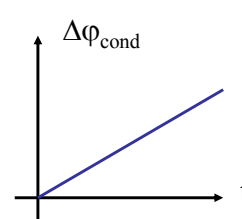
Sperimentalmente si osserva il seguente andamento per la tensione ai capi del condensatore in funzione del tempo:



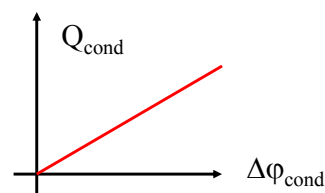
41

Determinazione della capacità

Nelle condizioni sperimentali scelte abbiamo:



ossia

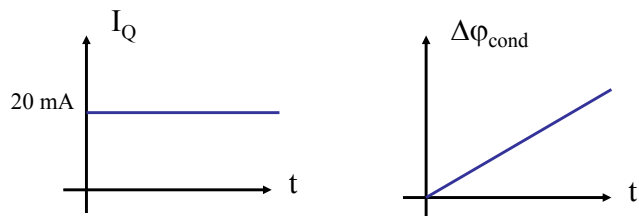


$$\frac{Q_{\text{cond}}}{\Delta\varphi_{\text{cond}}} = \text{costante} = C$$

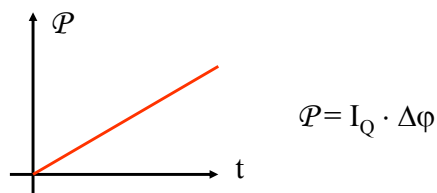
dove C è la capacità del condensatore.

42

A questo punto si può determinare la potenza che la sorgente deve erogare in funzione del tempo:

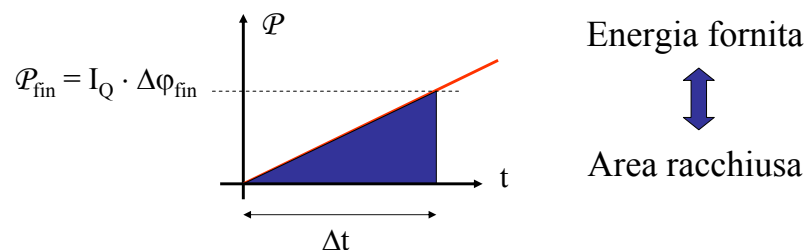


e quindi



43

Per l'energia fornita al condensatore e di conseguenza per l'energia immagazzinata nel condensatore si ottiene:



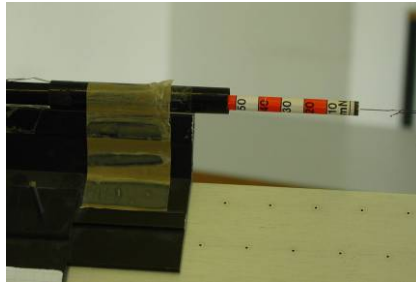
Energia immagazzinata =

$$= \frac{\text{Energia fornita}}{2} = \frac{1}{2} (\Delta\varphi_{\text{fin}} \cdot I_Q) \cdot \Delta t = \frac{1}{2} \Delta\varphi_{\text{fin}} \cdot (I_Q \cdot \Delta t) = \frac{1}{2} \Delta\varphi_{\text{fin}} \cdot Q_{\text{fin}} = \frac{1}{2} C \cdot \Delta\varphi_{\text{fin}}^2$$

44

B2) Energia cinetica: l'apparecchiatura

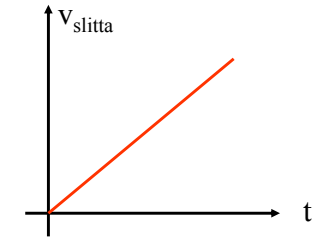
Studio del moto di un corpo sul quale agisce una forza costante (interpretata come un trasferimento di quantità di moto a regime costante)



Energia cinetica: risultati sperimentali

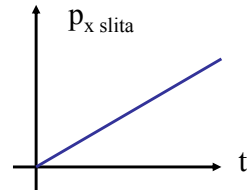
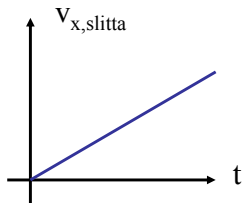
Una slitta viene messa in moto: a poco a poco la sua velocità (relativa al binario a cuscino d'aria) aumenta, grazie al fatto che le viene fornita quantità di moto. Questa operazione viene effettuata a regime stazionario, ossia mantenendo costante l'intensità della forza agente ($F_{est} = I_{px} = 54 \text{ mN}$).

Sperimentalmente si osserva il seguente andamento per la velocità della slitta (rispetto al binario) in funzione del tempo:

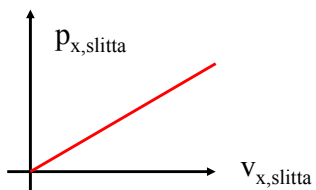


Significato della massa inerziale

Nelle condizioni sperimentali scelte abbiamo:



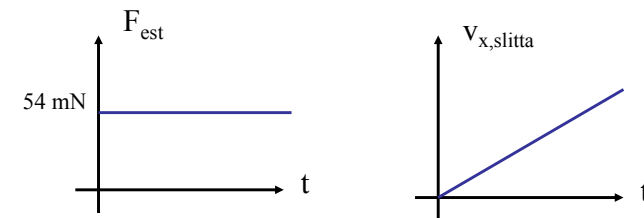
ossia



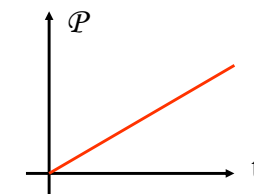
$$\frac{p_{x,slitta}}{v_{x,slitta}} = \text{costante} = M$$

dove M è la massa inerziale, ossia la capacità del corpo ad immagazzinare quantità di moto

A questo punto si può determinare la potenza che deve essere fornita alla slitta in funzione del tempo:

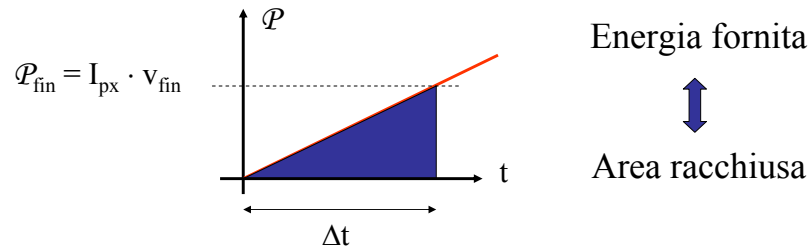


e quindi



$$P = I_{px} \cdot v_x$$

Per l'energia fornita alla slitta (lavoro) e di conseguenza per l'energia immagazzinata nella slitta si ottiene:



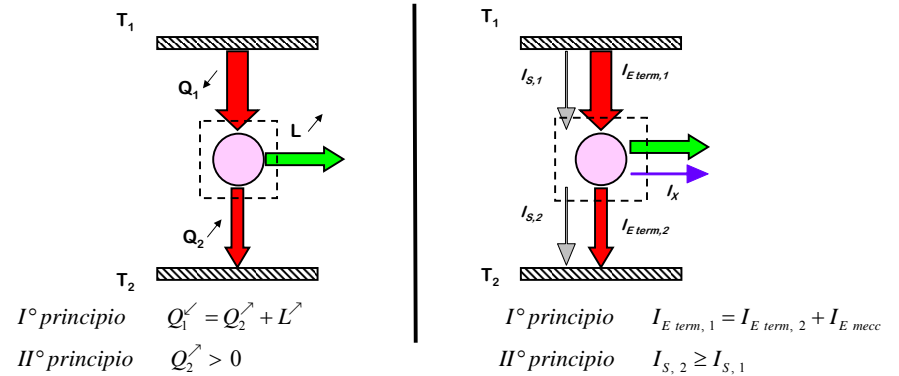
Energia immagazzinata =

$$= \text{Energia fornita} = \frac{1}{2} (v_{\text{fin}} \cdot I_{\text{px}}) \cdot \Delta t = \frac{1}{2} v_{\text{fin}} \cdot (I_{\text{px}} \cdot \Delta t) = \frac{1}{2} v_{\text{fin}} \cdot p_{x_{\text{fin}}} = \frac{1}{2} M \cdot v_{\text{fin}}^2$$

49

5 – Discussione di alcuni esempi

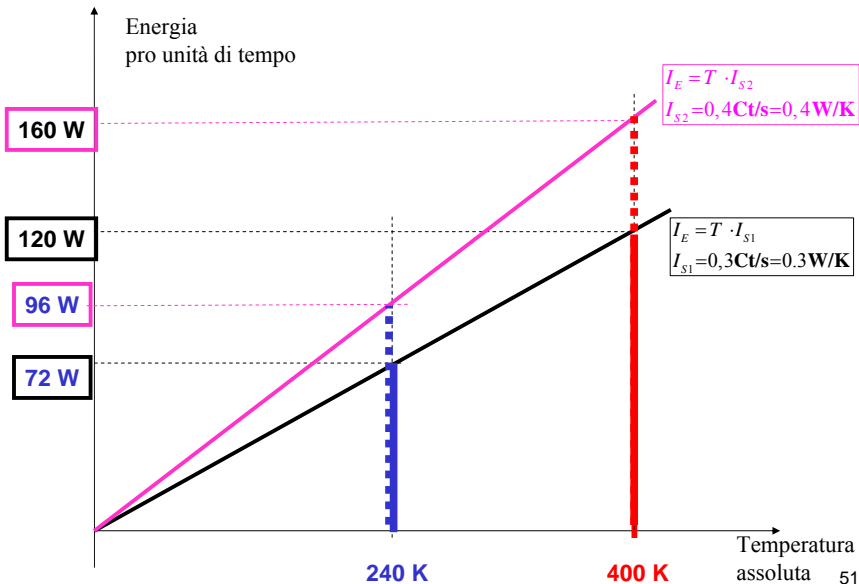
Rendimento di un motore termico



Rappresentazione schematica del funzionamento di una macchina termica: a sinistra sono rappresentati gli scambi energetici con l'esterno (bilancio in forma integrata), a destra sono indicati anche i flussi dei rispettivi portatori (bilancio in forma istantanea).

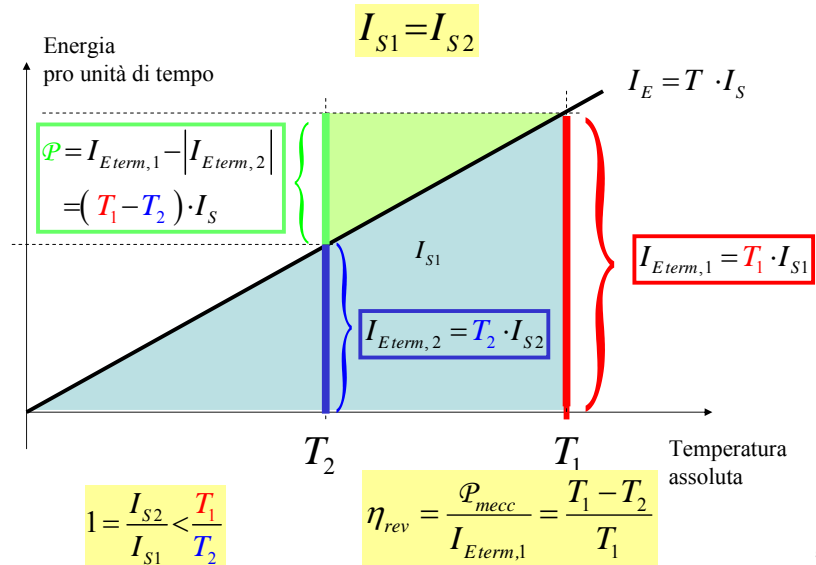
50

Flusso di energia associato a un dato flusso di entropia



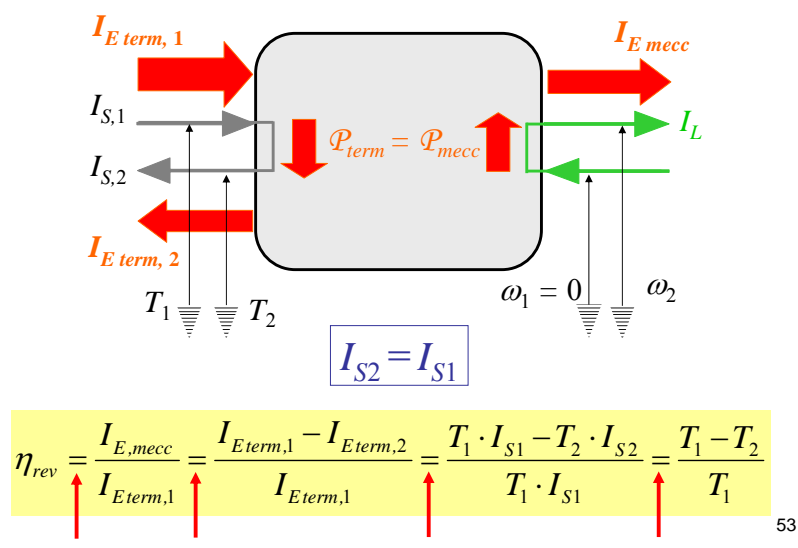
51

Caso particolare: motore termico reversibile

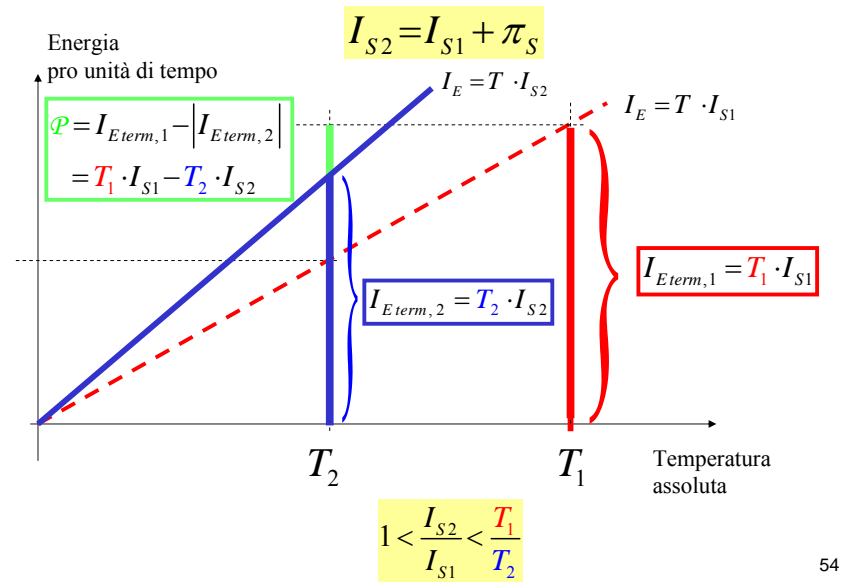


52

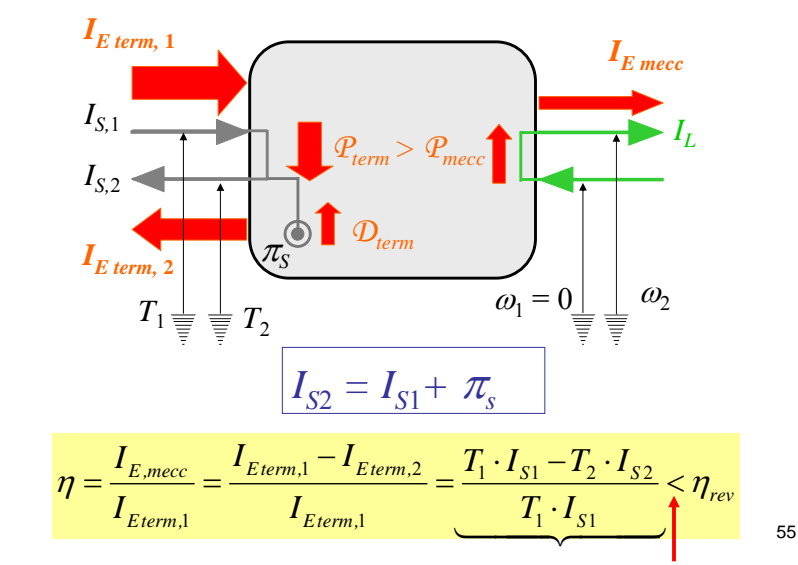
Rendimento di un motore termico *reversibile*



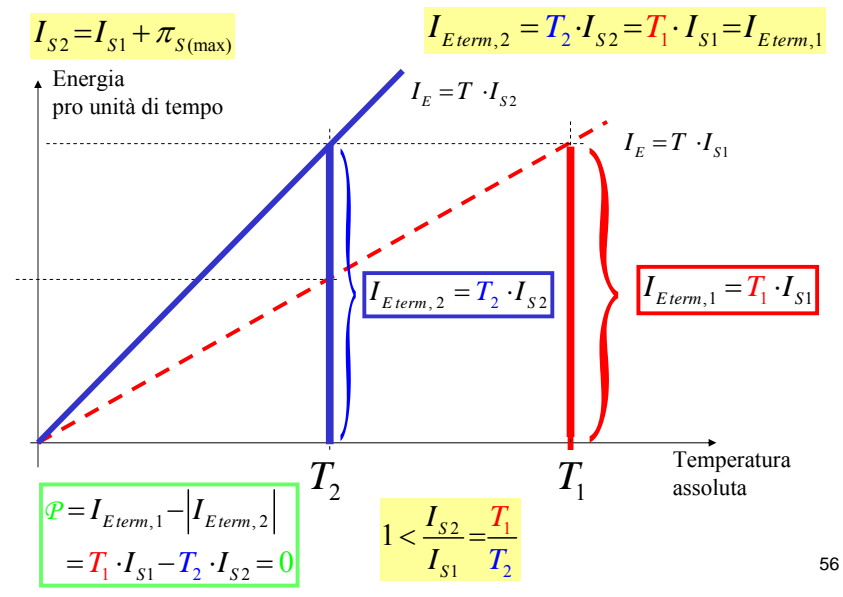
Caso generale: processo irreversibile



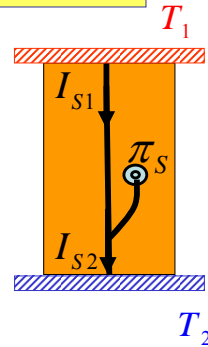
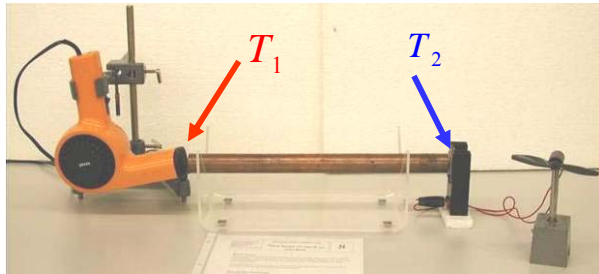
Rendimento di un motore termico *NON reversibile*



Caso limite: SOLO dissipazione (conduzione termica)



Conduzione termica e irreversibilità

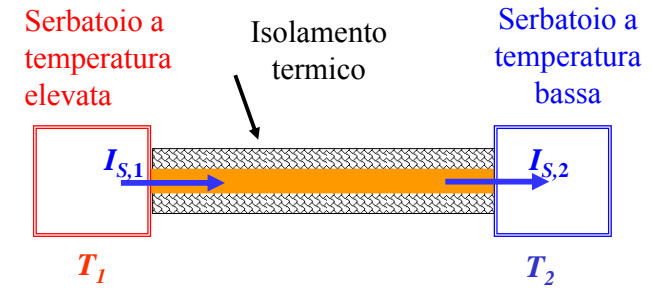


In questo caso *tutta* l'energia che viene "liberata" dall'entropia nel passaggio da T_1 a T_2 viene dissipata: in uscita dal sistema è associata all'entropia prodotta nel processo di conduzione.

$$I_{Eterm,2} = T_2 \cdot I_{S2} = T_2 \cdot (I_{S1} + \pi_S) = T_1 \cdot I_{S1} = I_{Eterm,1}$$

$$\pi_S = I_{Eterm} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

57



Per semplicità assumiamo che gli unici scambi di entropia possano avvenire agli estremi della sbarra, ciascuno dei quali è in *contatto termico* con due serbatoi di temperatura T_1 e T_2 che supponiamo costanti.

58

Lungo la sbarra di rame viene trasportata entropia: la *differenza di temperatura* tra i due estremi costituisce la "*spinta*" a questo trasferimento.



Con il principio della *conservazione dell'energia* e la relazione generale tra le intensità dei flussi di energia e del suo portatore abbiamo (per uno stato stazionario):

$$I_{Eterm,1} = I_{Eterm,2}$$

$$T_1 \cdot I_{S1} = T_2 \cdot I_{S2}$$

59

$$I_{Eterm,1} = I_{Eterm,2}$$

$$T_1 \cdot I_{S1} = T_2 \cdot I_{S2}$$

Dato che per ipotesi T_1 è maggiore di T_2 , possiamo concludere che:

$$I_{S2} > I_{S1}$$

vale a dire: *l'intensità della corrente d'entropia in uscita è maggiore di quella in entrata.*

Ciò viene interpretato dicendo che nel processo di conduzione termica all'interno della sbarra *viene prodotta entropia*:

$$I_{S2} = I_{S1} + \pi_S$$

60