

Il ruolo dell'energia nei fenomeni naturali

Michele D'Anna - Alta Scuola Pedagogica, Locarno (Svizzera)

Angelo Merletti - Liceo Scientifico Maria Curie di Pinerolo

Introduzione

Questo seminario vuole essere un'occasione per approfondire gli aspetti didattici legati all'introduzione del concetto di energia nell'approccio del *Karlsruher Physikkurs* (KPK)¹. Una prima parte sarà dedicata alla presentazione di diverse situazioni sperimentali nei vari campi di studio; in seguito, dopo aver richiamato il quadro concettuale di riferimento² ed introdotto uno strumento di rappresentazione grafica, verranno presentate, discusse e formalizzate le relazioni che permettono di descrivere gli scambi di energia in alcuni processi, nonché di esprimere l'energia immagazzinata in alcune situazioni tipiche. Nell'ultima parte del seminario, gli strumenti elaborati verranno applicati nella discussione del rendimento (e dell'efficienza) di alcune macchine (termiche ed elettriche).

1 - Alcuni esperimenti

La serie di esperimenti che intendiamo proporre spazia sui vari campi di studio solitamente affrontati in un corso introduttivo di fisica: desideriamo infatti connotare sin dall'inizio l'energia come una grandezza che abbraccia tutti i fenomeni. Anche se in ogni singolo fenomeno che coinvolge aspetti energetici sono presenti tutte le proprietà dell'energia, dal punto di vista didattico non tutte le situazioni si prestano in ugual misura alla loro illustrazione. Rimane comunque una grande libertà di scelta: la sequenza di esperimenti utilizzata durante il seminario è quindi da considerare unicamente come una possibile traccia. Attraverso questa sequenza, partendo dalla manipolazione di oggetti concreti, si è cercato di far emergere gradualmente le varie proprietà dell'energia, nonché le relazioni di quest'ultima con le altre grandezze fisiche necessarie per una completa descrizione dei vari fenomeni. Qui di seguito riportiamo alcune delle stazioni più significative del percorso:

- la *macchinina a molla*: si tratta di un giocattolo ben conosciuto, che permette di evidenziare, attraverso l'esecuzione di movimenti operativi "rituali", alcuni aspetti fondamentali dell'*energia*, come il trasferimento e l'immagazzinamento di energia, aprendo tuttavia la discussione su altri aspetti, quali: "Come" viene trasferita l'energia? Che cosa significa l'espressione "ho caricato la molla?" Che cosa succede all'energia immagazzinata quando la macchinina inizia a muoversi? Qual è il legame con la quantità di moto? Da dove proviene la quantità di moto posseduta dalla macchinina quando essa ha acquistato una certa velocità? Dalla discussione di queste domande emerge l'importanza di introdurre la *quantità di moto*

¹ Per i partecipanti era stato allestito un CD che conteneva, oltre alle slides presentate durante il seminario, alcuni testi storici di riferimento, alcuni filmati relativi a esperienze presentate, nonché la traduzione italiana di alcuni contributi legati all'energia della serie *Altlasten der Physik (Concezioni inadatte all'insegnamento della fisica)* a cura di F. Hermann e G. Job [1]. Eventuali interessati possono trovare questo materiale sul sito dell'AIF oppure richiederlo direttamente per e-mail ad uno degli autori (danna@liceolocarno.ch). Il KPK è tradotto anche in italiano [2];

² Per una introduzione più organica si veda il contributo presentato al Congresso AIF 2005 di Rimini dal titolo *Il Karlsruher Physikkurs: nuove correnti nell'insegnamento della fisica* [3] e le referenze lì citate.

nella descrizione dei fenomeni meccanici di traslazione: anch'essa, infatti, è una grandezza che può essere immagazzinata, che può essere trasferita, che è soggetta ad una legge di bilancio e che è conservata (ossia può solo essere scambiata tra sistemi o parti di un sistema, ma non può mai essere prodotta o distrutta).



Figura 1 - La macchinina a molla a) attraverso la discussione di diversi casi viene chiarita la questione della provenienza della quantità di moto: le ruote motrici “pompano” quantità di moto dalla superficie d'appoggio. Il tavolo non rincula dato che esso è solidale con la Terra: di modo che l'inerzia del sistema è “infinita”; b) per mettere in risalto questo aspetto è utile eseguire la messa in moto della macchinina su di una lastra di plexiglas opportunamente” isolata meccanicamente” (rulli) dal tavolo: in questo caso il movimento di rinculo della superficie d'appoggio è ben visibile.

- il mulino ad acqua: un altro giocattolo ben conosciuto, di facile manipolazione e che consente una lettura dei vari fenomeni in analogia con quelli precedenti: anche in questo caso abbiamo un trasferimento di energia dall'acqua alle pale del mulino.

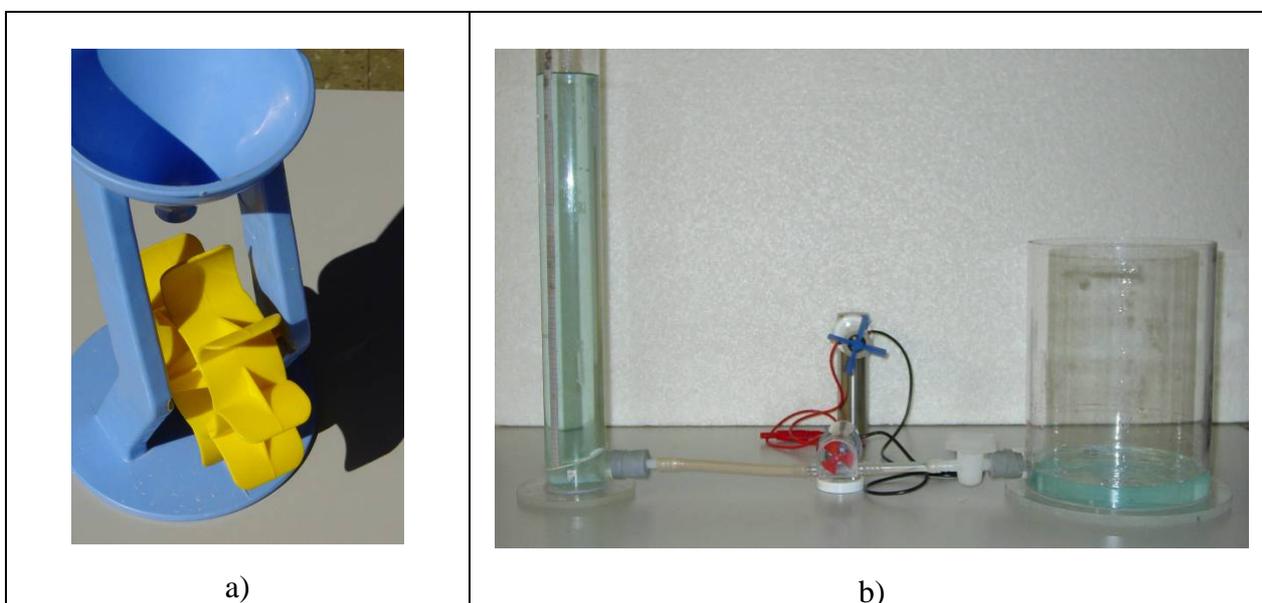


Figura 2 – Nel caso idraulico, l'utilizzo di dispositivi che ci mettono a disposizione “lavoro” grazie ad un flusso di acqua è molto familiare: a) il mulino ad acqua ha probabilmente accompagnato gran parte delle nostre prime giornate in spiaggia, mentre b) un riferimento al funzionamento di una centrale idroelettrica costituisce un esempio classico in quasi tutti i libri di testo. Con le apparecchiature di laboratorio moderne risulta anche possibile pensare ad esperimenti quantitativi. Può essere interessante approfondire anche il legame tra questi dispositivi idraulici e le macchine termiche (nel solco che da Lazare Carnot porta a Sadi Carnot).

Un passo avanti sta nel considerare un modello per una piccola *centrale idroelettrica* (v. figura 2b): due recipienti cilindrici (di sezione diversa) sono collegati tra loro da un conduttore provvisto di un rubinetto (inizialmente chiuso) e di una mini-turbina. Inizialmente l'acqua raggiunge nei due recipienti livelli diversi: all'apertura del rubinetto, a seguito della differenza di pressione ai capi del collegamento, l'acqua inizia a fluire da un recipiente all'altro. Questo flusso mette in rotazione le pale della mini-turbina fissata al tavolo e che è accoppiata ad un generatore che a sua volta alimenta un motore elettrico. Il risultato complessivo è quindi che, fino al raggiungimento dell'equilibrio idraulico, ossia finché vi è un flusso di acqua, il motore è in funzione. Quest'ultimo infatti cessa di ruotare non appena la differenza di pressione ai capi del collegamento si annulla. Lo stato finale di equilibrio permette una serie di osservazioni: nei due recipienti l'acqua raggiunge il medesimo livello, ma la quantità di acqua contenuta nei due recipienti è diversa. Il valore (assoluto) della variazione del volume d'acqua nei due recipienti è invece il medesimo, mentre il rapporto tra le variazioni della pressione alla base dei recipienti è inversamente proporzionale al rapporto tra le loro sezioni. Anche in questa situazione idraulica si ritrova quindi il concetto di capacità. Dall'insieme di queste osservazioni iniziano a profilarsi le caratteristiche di base sia delle grandezze estensive che di quelle intensive (le cui differenze hanno il ruolo di *spinta* al trasferimento).

- il *termogeneratore* (elemento Peltier, v. figura 3): quando tra i due lati della piastrina vi è una differenza di temperatura, si osserva la comparsa di una differenza di potenziale elettrico (che viene messa in evidenza dalla rotazione di un'elica imperniata sull'albero di un motore elettrico collegato all'elemento Peltier). Generalmente la prima interpretazione che emerge dalla discussione è basata sul "calore"; tuttavia, se si vuole mantenere un'analogia interpretativa con gli esperimenti visti in precedenza, occorre andare oltre e rispondere alla domanda: quale altra grandezza fluisce, assieme all'energia, in questi fenomeni termici? La risposta formale (e scontata) permette una rilettura dei fenomeni considerati, facendo emergere a poco a poco, oltre al ruolo delle differenze di temperatura come "spinta" per i trasferimenti conduttivi nei fenomeni termici, le proprietà dell'entropia come grandezza estensiva non conservata. A quest'ultimo aspetto va posta un'attenzione particolare: l'entropia può infatti essere prodotta ma non può mai essere distrutta. Semplici situazioni sperimentali (con osservazioni di tipo percettivo che coinvolgono le mani) possono utilmente essere impiegate

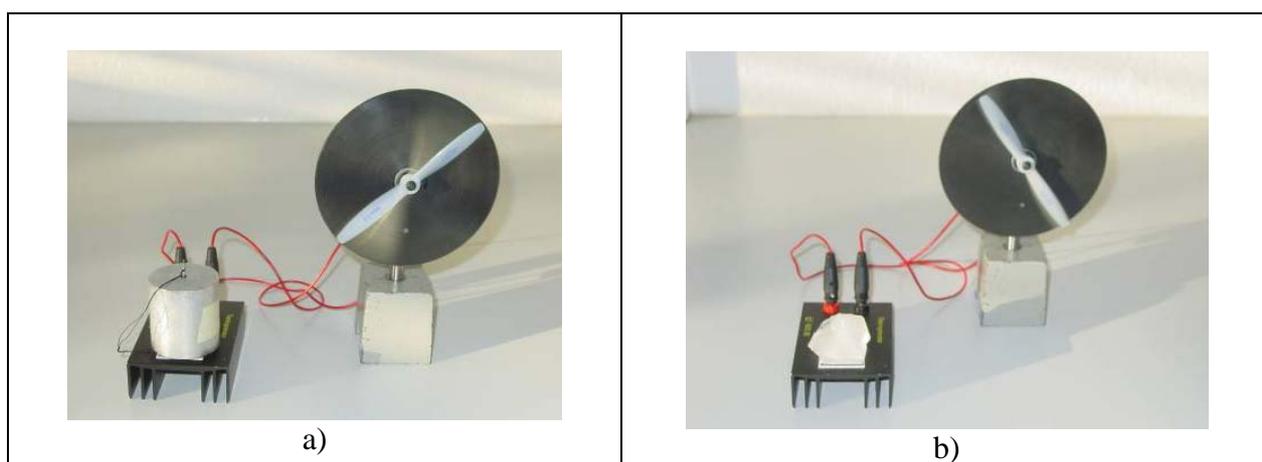
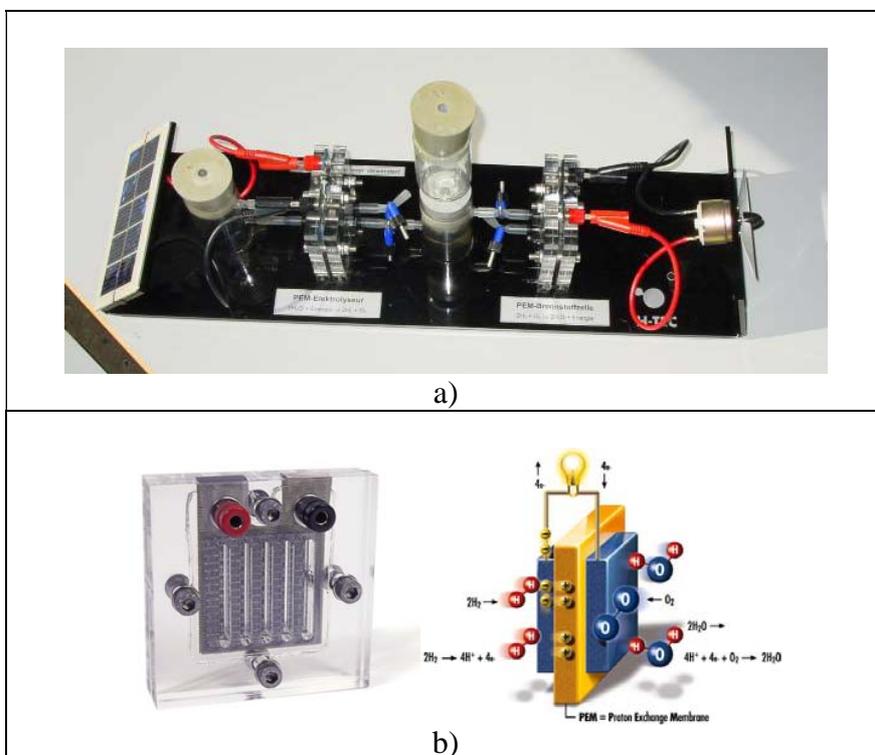


Figura 3 – Il termogeneratore a) quando tra le due facce dell'elemento vi è una differenza di temperatura, ai capi dell'elemento si manifesta una differenza di potenziale elettrico. Questa viene messa in evidenza dalla rotazione dell'elica montata sul motore elettrico alimentato dal termogeneratore; b) quando sulla faccia superiore dell'elemento Peltier viene posto un pezzo di ghiaccio, si osserva che l'elica inverte il senso di rotazione.

per chiarire questo importantissimo punto. Dalla descrizione emerge che la grandezza entropia ha nei fenomeni termici il medesimo ruolo che hanno rispettivamente il volume d'acqua in idraulica e la quantità di moto in meccanica.

- a questo punto è utile riflettere sul fatto che in natura non ci sono solo processi in cui viene raggiunta una situazione di equilibrio, ossia processi in cui vi è il trasferimento di una grandezza estensiva pilotato da una differenza della relativa grandezza intensiva coniugata fino al suo annullamento (altrimenti, per esempio, non potremmo avere una temperatura diversa da quella ambiente, oppure non potremmo metterci a camminare, oppure ...) Esistono anche processi naturali e dispositivi che riescono a far avvenire processi il cui risultato è la *comparsa* di una differenza di potenziale. Questi dispositivi possono essere chiamati “pompe”: essi sono in grado di trasferire determinate quantità da punti a potenziale basso a punti a potenziale più elevato. Qualche esempio: una pompa per bicicletta (che crea una differenza di pressione, e che trasporta aria da punti a pressione bassa a punti a pressione più elevata), oppure una “pompa elettrica”, usualmente indicata con il termine di *generatore* (di differenze di potenziale elettrico). E' importante notare che questi dispositivi *non* creano, *non* producono la grandezza estensiva, ma generano differenze di potenziale. Ad esempio un termogeneratore utilizza una differenza di temperatura per generare una differenza di potenziale elettrico, oppure, nel'ambito dei fenomeni chimici (ossia della trasformazione delle sostanze) un apparecchio per elettrolisi consente di creare una differenza di potenziale chimico sfruttando una differenza di potenziale elettrico. Da questo punto di vista, i vari dispositivi possono essere interpretati come tessere di un domino, dove la differenza “desiderata” viene creata sfruttando il fatto di avere a disposizione un'altra differenza. Queste catene sono molto importanti e diffuse in natura (sia nei processi fisici che in quelli chimici e biologici): come illustrazione viene considerata una catena didattica consistente in un pannello fotovoltaico, un idrolizzatore³, una cella combustibile e per finire un motore elettrico (v. figura 4).

Figura 4 – a) dispositivo didattico per illustrare una catena di trasformazioni: attraverso un pannello fotovoltaico è possibile alimentare un idrolizzatore; solo l'idrogeno prodotto viene raccolto in un deposito ed utilizzato quando desiderato per alimentare una cella a combustibile aria – idrogeno. La differenza di potenziale elettrico generata da quest'ultima viene utilizzata per alimentare un piccolo motore elettrico; b) la cella a combustibile aria – idrogeno: il cuore del dispositivo è costituito da una membrana semipermeabile agli ioni H^+ (protoni). L'ossigeno viene preso dall'aria.



³ Per saperne di più sullo stato attuale delle celle a combustibile si veda la relazione *Le celle a combustibile: stato dell'arte e prospettive nella generazione stazionaria e nel trasporto* tenuta dal prof. J. Spagnoletti a questo congresso.

- completiamo questa carrellata con alcune esperienze nel campo elettrico: con un generatore (a manovella) prima si alimenta un piccolo circuito con una lampadina, per poi passare alla “carica” di un condensatore, ossia ad un processo in cui la carica elettrica viene trasferita da un polo all’altro del condensatore, creando in questo modo una differenza di potenziale elettrico. Utilizzando condensatori diversi, è possibile mettere in evidenza anche in questo ambito il concetto di capacità. Come per i casi precedenti, è utile descrivere questi processi sia sulla base delle grandezze relative allo specifico campo di studio (qui: elettricità) sia sul piano dell’energia.

Un ultimo aspetto può essere messo in evidenza con dispositivi come un asciugacapelli o un riscaldatore ad immersione. L’analisi del processo porta in entrambi i casi alla conclusione che vi è una produzione di entropia: nel primo caso essa viene caricata sull’aria in uscita (che ha una temperatura più elevata rispetto a quella che entra), nel secondo viene prodotta nel resistore (effetto Joule) e ceduta per conduzione termica all’acqua circostante. La situazione dell’asciugacapelli è particolarmente interessante poiché si presta anche per alcune considerazioni riguardo alla pertinenza e all’efficacia del linguaggio utilizzato in relazione agli aspetti energetici: l’affermazione più spontanea, ossia che l’aria in uscita è stata caricata di energia, di per sé corretta, non ci permette tuttavia di distinguere tra l’energia legata all’aumento di temperatura e l’energia associata al fatto che l’aria in uscita è in movimento.

2 – Il quadro concettuale di riferimento e una rappresentazione grafica

La discussione delle diverse situazioni sperimentali consente l’illustrazione del quadro concettuale di riferimento adottato: per prima cosa vengono richiamate le diverse coppie di grandezze estensive / intensive coniugate, introdotte come grandezze primarie⁴ nella descrizione dei fenomeni osservati; si tratta in particolare di *quantità di moto / velocità* per gli aspetti meccanici (traslazioni), *volume d’acqua / pressione* per gli aspetti idraulici, *carica elettrica / potenziale elettrico* per gli aspetti elettrici; *entropia / temperatura* per gli aspetti termici; *quantità di sostanza / potenziale chimico* per gli

	Equazione di bilancio
Idraulica	$dV/dt = I_V$
Elettricità	$dQ/dt = I_Q$
Meccanica	$dp/dt = F$
Termodinamica	$dS/dt = I_S + \pi_S$
Chimica	$dn/dt = I_n + \pi_n$

Tabella 1 – L’equazione di bilancio nei vari campi di studio.

⁴ Per grandezza primaria intendiamo una grandezza che non viene introdotta attraverso delle definizioni formali, ma attraverso l’esplicitazione delle sue proprietà e del ruolo che ha nella descrizione della fenomenologia osservata. Ciò non significa tuttavia che la sua quantificazione risulta imprecisa o non definita: anche per queste grandezze possono essere date le usuali procedure operative di misura. Un aspetto didattico su cui riflettere potrebbe inoltre essere quello delle unità di misura: ci si può effettivamente chiedere per coerenza se, per le grandezze considerate primarie, non sia il caso di prevedere una unità di misura propria ed indipendente (cioè non derivata) per ciascuna di esse. Ovviamente il quadro attuale presentato dal sistema internazionale di misura (SI / IUPAC [4]) risulta assai lontano. Ciononostante, per questa ragione di coerenza, nel testo originale del KPK compaiono alcune unità di misura non usuali, come gli “huygens” (Hy) per la quantità di moto, i “carnot” (Ct) per l’entropia, i “gibbs” (G) per il potenziale chimico.

aspetti legati alle trasformazioni della materia⁵. Una caratteristica fondamentale per le grandezze estensive è quella di obbedire ad una legge di bilancio, che, per esempio nella sua forma istantanea, lega, per un dato sistema, il tasso istantaneo di variazione della grandezza considerata con l'intensità degli scambi che avvengono fra il sistema e l'ambiente circostante e il tasso istantaneo di produzione. Ovviamente questo ultimo termine è presente nell'equazione di bilancio *solo* per le grandezze *non* conservate, ossia in quella per l'entropia (con la particolarità che il tasso istantaneo di produzione può avere – in conformità al II° principio della termodinamica - unicamente valori non negativi), e in quella per la quantità di sostanza (dove il tasso di produzione può assumere valori sia positivi che negativi).

Per quanto riguarda le grandezze intensive, una loro caratteristica essenziale emerge dall'osservazione che i trasferimenti di tipo conduttivo delle varie grandezze estensive sono sempre accompagnati dalla presenza di un gradiente nella corrispondente grandezza intensiva; in questo senso si può affermare che differenze di grandezze intensive hanno il ruolo di “spinta” o “forza motrice” per i vari fenomeni osservati (differenze di potenziale generalizzate).

In questo contesto l'energia viene introdotta attraverso l'esplicitazione di una serie di proprietà che la caratterizzano; l'energia è infatti presentata come una grandezza estensiva⁶ che:

- può essere immagazzinata;
- può essere trasferita da un sistema ad un altro;
- nei trasferimenti è sempre associata ad un'altra grandezza estensiva (indicata per questa ragione spesso con il termine di *portatore* dell'energia);
- può essere trasferita da un portatore ad un altro;
- è soggetta ad una legge di bilancio;
- è una grandezza conservata.

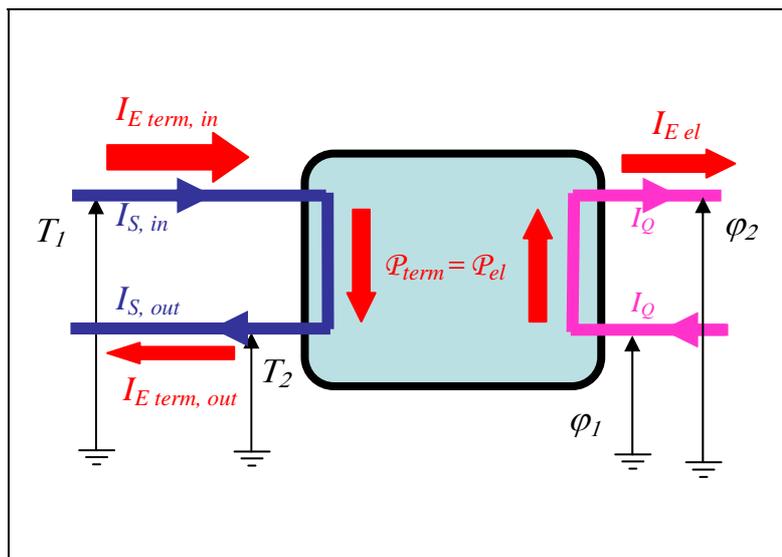
Così ad esempio si può parlare di energia posseduta da un corpo in movimento, oppure di energia che, in un urto, viene (parzialmente o totalmente) trasferita da un corpo ad un altro; di energia che nel termogeneratore passa dal portatore entropia al portatore carica elettrica.

Per quanto riguarda la rappresentazione grafica, si tratta di uno strumento che cerca di rendere “visibili” le varie grandezze in gioco e il loro ruolo. Una presentazione più estesa è già stata da noi presentata in un precedente congresso AIF; in questa sede ci limitiamo a presentare quale illustrazione una possibile modellizzazione per il termogeneratore (v. Figura 5).

⁵ Può essere istruttivo considerare rapidamente il grado di presenza di queste varie grandezze nella struttura tradizionale dei corsi introduttivi; per quanto riguarda l'elettricità e l'idraulica, la trattazione tradizionale prevede l'introduzione di queste grandezze, essenzialmente con il ruolo che hanno nell'approccio proposto; per quanto riguarda le grandezze meccaniche, esse sono sì tradizionalmente presenti, ma non con il ruolo che qui viene loro attribuito (oltre al fatto che tendenzialmente il tempo dedicato alla presentazione della quantità di moto sembra ridursi man mano che i corsi introduttivi vengono via via compressi); per quanto riguarda gli aspetti termici si è sicuramente soliti presentare la temperatura (ossia la grandezza intensiva), mentre l'entropia viene considerata una grandezza non centrale (almeno nella presentazione didattica) e, se compare, viene introdotta al termine della trattazione della termodinamica, quasi come una sorta di complemento; per quanto riguarda i fenomeni legati alla trasformazione delle sostanze, usuale è la presentazione della grandezza quantità di sostanza, ossia la grandezza estensiva, mentre il potenziale chimico risulta del tutto assente.

⁶ Il linguaggio utilizzato per la verbalizzazione delle proprietà non deve trarre in inganno; in particolare non deve risvegliare il sospetto che l'approccio sottintenda una reificazione dell'energia. L'energia è una grandezza fisica, e come tale un ente astratto, non un elemento del mondo reale. La struttura delle relazioni matematiche in cui essa compare permette (si potrebbe dire: suggerisce) nondimeno l'utilizzo metaforico del campo semantico relativo al modello delle “sostanze”. Per un approfondimento si vedano per esempio G. Falk, G. Ruppel [5] *Energie und Entropie*, F. Herrmann [6] *Ding und Mass*, Praxis der Naturwissenschaften, 2/57, 2008.

Figura 5 – Termogeneratore: la differenza di temperatura funge da “forza motrice” per la corrente di entropia. Nel processo, che qui supporremo ideale (ossia senza produzione di entropia), una parte dell’energia associata all’entropia può cambiare portatore, per la precisione da quello termico a quello elettrico, ossia dall’entropia alla carica elettrica. Il risultato si manifesta nella comparsa di una differenza di potenziale elettrico ai capi dell’elemento (che può a sua volta essere utilizzata come “spinta” per un ulteriore processo).



3 - L’energia scambiata e l’energia immagazzinata

La rappresentazione grafica proposta vuole in particolare mettere in evidenza il fatto che i flussi di energia nei fenomeni conduttivi sono accompagnati dal flusso di un’altra grandezza estensiva. Per avere una descrizione completa risulta importante poter quantificare questa relazione; come già illustrato in precedenti contributi ai congressi AIF⁷, sperimentalmente⁸ si può determinare il legame tra la potenza coinvolta nel processo, l’intensità della corrente della grandezza estensiva ed il valore della differenza di “potenziale” (ossia della grandezza intensiva coniugata). Per i trasporti di tipo conduttivo il risultato è:

$$(1) \quad \mathcal{P} = I_x \cdot \Delta\varphi_x$$

Può essere utile interpretare la potenza messa a disposizione nel processo come differenza tra l’intensità della corrente d’energia che entra e l’intensità della corrente di energia che esce dal sistema. Allora possiamo scrivere:

$$(2) \quad \mathcal{P} = I_x \cdot \Delta\varphi_x = I_x \cdot (\varphi_{x, in} - \varphi_{x, out}) = I_x \cdot \varphi_{x, in} - I_x \cdot \varphi_{x, out} = I_{E, in} - I_{E, out}$$

dove è stato posto

$$(3) \quad I_{E, in} = I_x \cdot \varphi_{x, in} \quad I_{E, out} = I_x \cdot \varphi_{x, out}$$

⁷ Una illustrazione esplicita delle situazioni sperimentali che portano a questa relazione nel caso idraulico ed elettrico era stata presentata nella comunicazione al XLI° congresso AIF 2002 di Casarano *Il gioco delle analogie e il ruolo dell’energia*, mentre per una introduzione più organica si veda il contributo presentato al Congresso AIF 2005 di Rimini dal titolo *Il Karlsruher Physikkurs: nuove correnti nell’insegnamento della fisica* [2] e le referenze lì citate.

⁸ Nel corso del seminario sono stati discussi i casi idraulico ed elettrico. Per entrambe le situazioni l’idea di base è la seguente: creare un determinato effetto attraverso modalità differenti. Dal confronto tra i valori numerici si evince che è possibile ottenere un dato effetto quando il prodotto tra l’intensità della corrente e la differenza di potenziale impiegati assume un ben determinato valore. Nel caso idraulico viene impiegata una turbina ad acqua e l’effetto è la quantità di luce prodotta dalla lampadina; nel caso elettrico si considerano dei resistori impiegati come riscaldatori ad immersione e l’effetto è un dato tasso di riscaldamento di una ben definita quantità di acqua.

Queste relazioni suggeriscono la seguente interpretazione: quando vi è il trasporto di una certa quantità per unità di tempo di una data grandezza estensiva, la quantità di energia trasportata (sempre) per unità di tempo dipende dal valore del potenziale al quale avviene il trasporto. La figura 6 illustra la situazione nel caso elettrico, considerando per esempio la situazione relativa al caso di due lampadine inserite in serie.

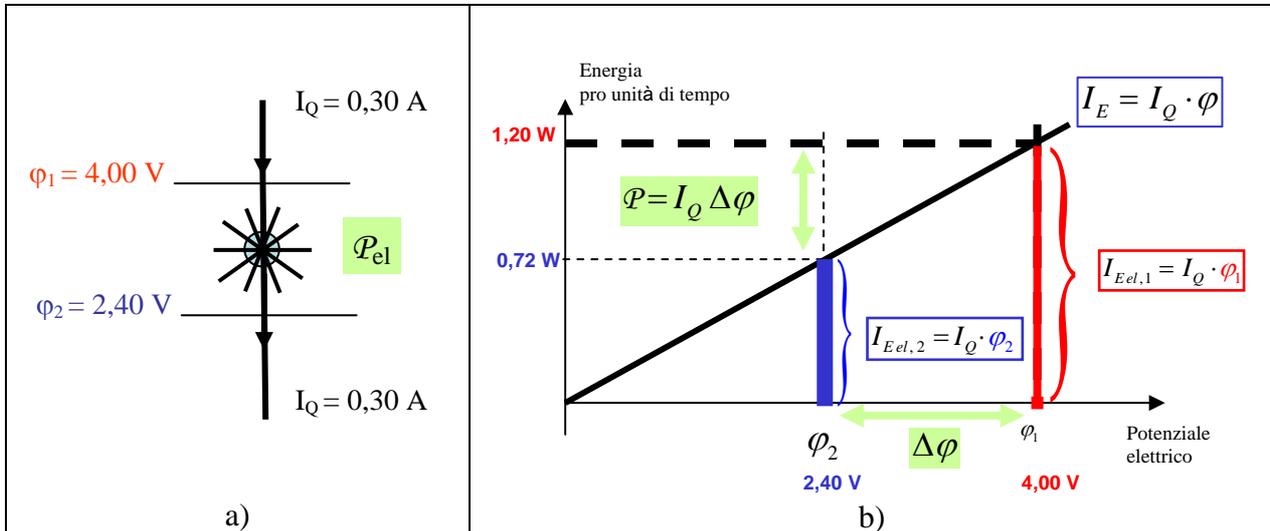


Figura 6 – Lampadina a) due lampadine sono inserite in un circuito elettrico, alimentato da una batteria da 4,0 V. Nel circuito la corrente elettrica avrà una determinata intensità (per esempio 0,30 A), mentre il potenziale elettrico “prima” e “dopo” una delle due lampadine assumerà due distinti valori (per esempio rispettivamente 4,0 V e 2,4 V). Il calcolo della potenza elettrica associata a questa lampadina è immediato: la potenza assorbita in queste condizioni dalla lampadina è di $0,30 \text{ A} \cdot (4,0 - 2,4) \text{ V} = 0,48 \text{ W}$. b) Il grafico esprime l’andamento lineare tra l’energia trasportata e il potenziale al quale avviene il trasporto; la differenza tra l’energia in entrata e quella in uscita per il “sistema” lampadina rappresenta la quantità di energia per unità di tempo (ossia la potenza) che viene messa a disposizione dei processi che avvengono nella lampadina.

Per quanto riguarda gli aspetti didattici legati all’immagazzinamento dell’energia, sono stati unicamente accennati i casi dell’energia cinetica e dell’energia elettrostatica immagazzinata in un condensatore. Maggiori dettagli possono essere trovati in [3].

4 - Discussione di alcuni esempi

Nell’ultima parte del seminario, sulla base degli strumenti elaborati, sono state presentate e discusse alcune situazioni relative al rendimento e all’efficienza di “macchine” sia termiche che elettriche. Accanto alla trattazione usuale⁹, viene ripresa la rappresentazione grafica dell’energia trasportata in funzione del valore del potenziale al quale avviene il trasporto. Nel caso termico, questa situazione aiuta a far capire come mai il rendimento di un motore termico è sempre (strettamente) minore del 100%: l’entropia in uscita dalla macchina alla temperatura T_2 porta con sé una parte dell’energia che era stata prelevata dal serbatoio caldo alla temperatura T_1 ; questa semplice argomentazione costituisce in effetti un grosso aiuto per lo studente, per esempio quando viene confrontato con la classica formulazione di Kelvin-Planck del secondo principio della termodinamica. Ma dal grafico possiamo estrarre anche altri risultati: così, ad esempio, per una (ipotetica) *macchina termica reversibile*

⁹ Per un articolo introduttivo in cui vengono messi a confronto l’approccio qui proposto con quello tradizionale si veda anche *L’equazione di bilancio dell’energia e dell’entropia* [7].

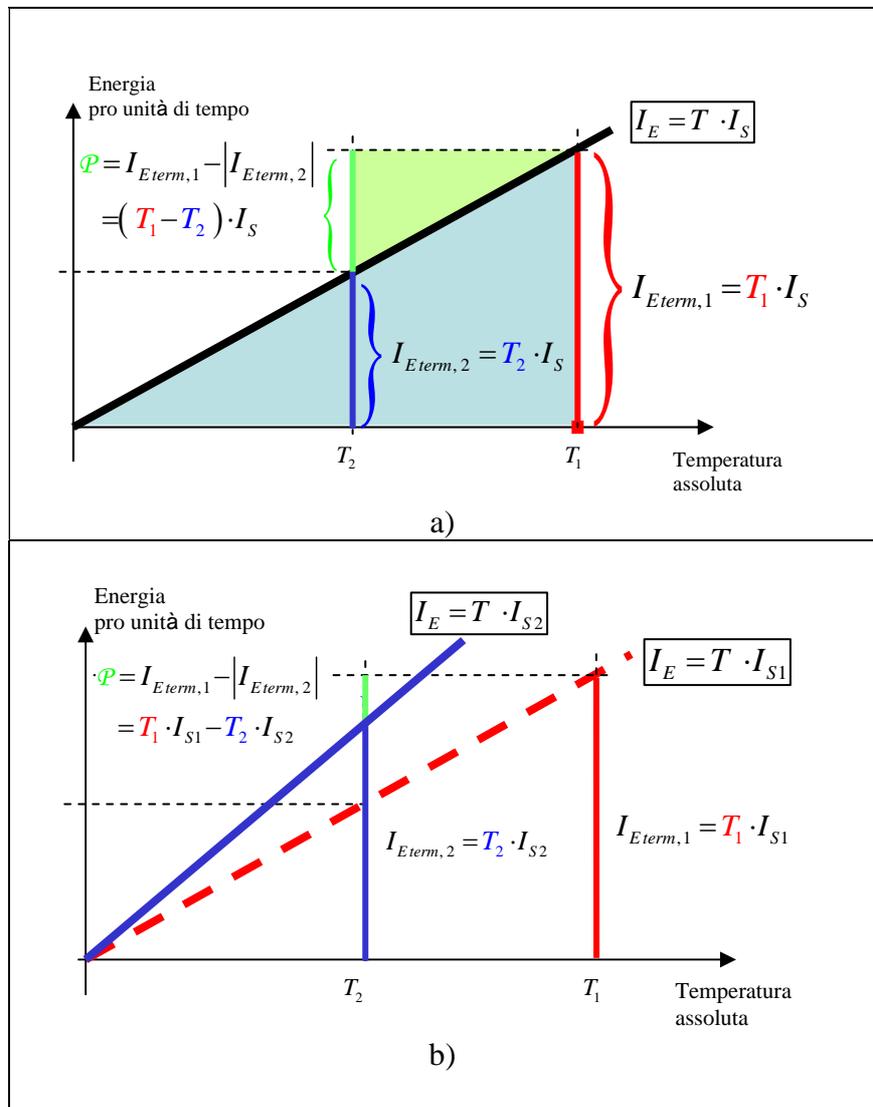
le che lavora tra le temperature T_1 e T_2 è possibile ricavare il rendimento con semplicissime considerazioni geometriche (v. figura 7a). È facile riconoscere la posizione che occupano nella figura le tre quantità che entrano nel bilancio energetico, in particolare l'energia "utilizzabile", cioè quella parte dell'energia in entrata che, nel corso del processo, è possibile trasferire dal portatore termico (entropia) a quello meccanico (p. es. momento angolare). Su questa base è allora immediato stabilire la relazione di proporzionalità (triangoli simili) che permette di esprimere il rendimento¹⁰:

$$(4) \quad \eta_{rev} = \frac{\mathcal{P}_{mecc}}{I_{Eterm,1}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} < 1$$

In modo analogo è possibile raffigurare e discutere il rendimento di un motore termico irreversibile: dato che all'interno del dispositivo viene prodotta entropia, è evidente che l'intensità (media) della corrente di entropia in uscita sarà maggiore di quella in entrata. Ciò significa che, rispetto al caso precedente, l'energia rilasciata al serbatoio freddo in questo caso sarà (strettamente) maggiore e, di conseguenza, che il rendimento del motore termico reversibile sarà (strettamente) inferiore a quello relativo al motore reversibile. La figura 7 b) illustra graficamente la situazione.

Figura 7 – Motore termico

a) nel caso del motore reversibile l'intensità della corrente di entropia che entra è uguale a quella in uscita. Questo significa che il rendimento può essere ottenuto con una semplice considerazione geometrica.
 b) nel caso del motore irreversibile, in uscita, oltre all'entropia che entra, avremo anche l'entropia che è stata prodotta nel processo; rispetto al caso a), per evacuare l'entropia è necessaria una maggior quantità di energia. La potenza termica disponibile risulta quindi inferiore: per unità di tempo, la quantità di energia che può essere "caricata" sul portatore meccanico è inferiore. Ritroviamo in questo modo il ben noto risultato di Sadi Carnot: il rendimento della macchina irreversibile è strettamente minore di quello di una macchina reversibile che lavora tra le medesime temperature.



¹⁰ Nel contesto preso in considerazione, l'intensità delle varie correnti che caratterizzano i vari scambi devono essere intese come medie nel tempo (su intervalli possibilmente molto maggiori della durata di un singolo ciclo).

In queste considerazioni risulta didatticamente importante separare ciò che è specificamente “termico” dagli altri aspetti più generali, presenti quindi in tutti gli ambiti di studio. Da questo punto di vista risulta significativa la *macchina elettrica à la Carnot* proposta da H.U. Fuchs [8] (v. figura 8a) che utilizza un “ciclo” che risulta essere l’esatto analogo del famoso ciclo (reversibile) di Carnot per i motori termici. Anche per questa macchina è possibile ripetere l’analisi e ricavare l’espressione per il rendimento, che dipende unicamente dai valori numerici dei due potenziali elettrici scelti (v. figura 8b). Dal punto di vista didattico, questi risultati ci fanno forse meglio capire l’inadeguatezza del concetto tradizionale di *rendimento* e la necessità di introdurre il concetto di *efficienza* quando si discute la “bontà” di una macchina: in realtà l’elemento più caratterizzante è il grado di irreversibilità dei processi impiegati, ossia se essi producono più o meno entropia. Questa problematica è già stata da tempo riconosciuta come centrale (si vedano per esempio le considerazioni di S. Sgrignoli e M-L. Viglietta in *Efficienza nell’uso dell’energia*¹¹ [9], oppure i due contributi dedicati al tema da F. Herrmann e G. Job negli *Altlasten der Physik* [1]), ma fa fatica a trovare riscontro nell’insegnamento (salvo che in quello specifico per gli ingegneri).

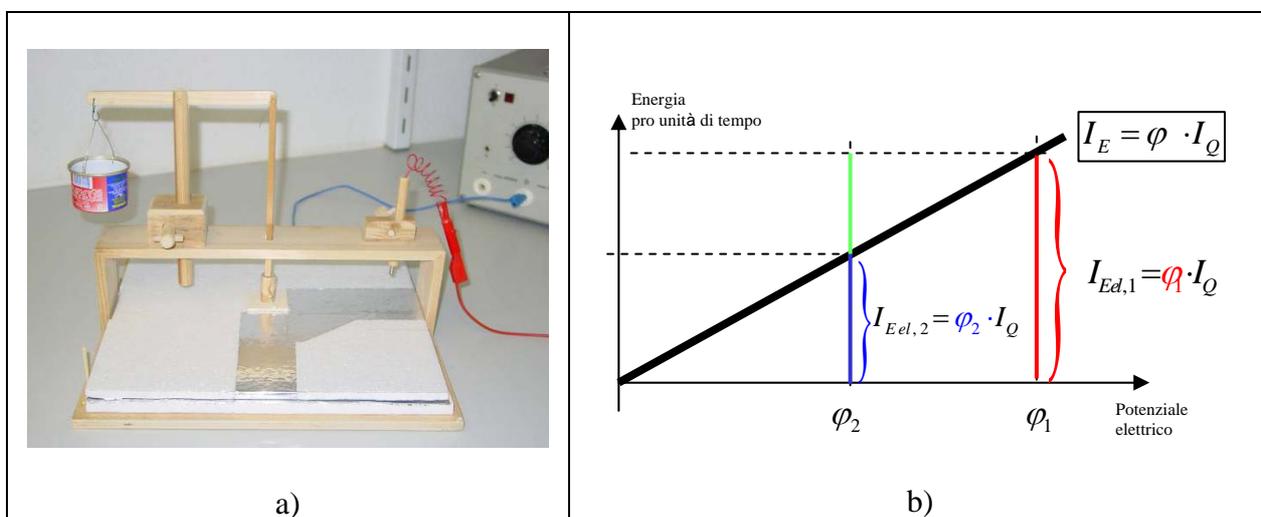


Figura 8 – Motore elettrico à la Carnot a) l’apparecchiatura è costituita essenzialmente da un condensatore che viene alternativamente caricato e scaricato, sfruttando il fatto che una delle sue lastre può muoversi verticalmente ed entrare alternativamente in contatto con punzoni metallici mantenuti a potenziale elettrico definito φ_1 e φ_2 da una sorgente di tensione esterna; b) anche in questo caso il rendimento è ottenibile dalla figura sulla base di una relazione geometrica: il rapporto tra l’energia disponibile per unità di tempo e l’energia in entrata nella macchina è dato dal rapporto $(\varphi_1 - \varphi_2) / \varphi_1$.

5 – La traduzione degli *Altlasten der Physik*

In occasione del seminario è stata inoltre presentata la traduzione italiana di alcuni degli *Altlasten der Physik* pubblicati a cura di G. Job e F. Herrmann [1]: si tratta di brevi testi, organizzati tutti con la medesima struttura, e in cui vengono presentati e analizzati sia dal punto di vista disciplinare che storico alcune problematiche ritenute di impedimento all’apprendimento della fisica (da qui la dicitura *concezioni inadatte per l’insegnamento della fisica* impiegata per la traduzione del termine tedesco originale). Nell’ultima parte di ogni contributo vengono infine suggerite possibili piste per

¹¹A pagina 20 possiamo per esempio leggere: *La sola conoscenza del valore assunto da η per un dato dispositivo non ci dà un’indicazione diretta del margine disponibile (almeno teoricamente) per migliorare l’efficienza del sistema. In effetti, parlando di “efficienza” di un dispositivo, apparirebbe logico porre uguale all’unità (100 %) l’efficienza di una macchina che realizzasse la trasformazione desiderata “nel modo migliore possibile”, mentre dovrebbe essere zero l’efficienza del dispositivo peggiore (che non realizzasse affatto quanto desiderato).*

una risoluzione didattica della difficoltà segnalata. In appendice al seminario sono stati brevemente presentati i primi contributi tradotti in italiano, dedicati all'ambito dell'energia¹².

* * *

Riferimenti bibliografici

- [1] F. HERRMANN, G. JOB, *Altlasten der Physik*, Aulis, Köln (2002);
- [2] F. HERRMANN, *Der Karlsruher Physikkurs*, Aulis, Köln (1995); per la traduzione italiana si veda <http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/>
- [3] M. D'ANNA, *Il Karlsruher Physikkurs: nuove correnti nell'insegnamento della fisica* Atti del Congresso AIF 2005, p. 44 – 54;
- [4] *Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry*, IUPAC, Blakwell Science (1993);
- [5] G. FALK, G. RUPPEL *Energie und Entropie*, Springer, Berlin (1976), p.2;
- [6] F. HERRMANN, *Ding und Mass*, Praxis der Naturwissenschaften (2008) (traduzione italiana in preparazione);
- [7] M. D'ANNA, U. KOCHER, P. LUBINI E S. SCIARINI, "L'equazione di bilancio dell'energia e dell'entropia", *La Fisica nella Scuola*, XXXVIII, 4 (2005);
- [8] H.U. FUCHS, *A surrealistic tale of electricity*, Am.J.Phys, 1986;
- [9] S. SGRIGNOLI, M-L. VIGLIETTA, *Efficienza nell'uso dell'energia*, Zanichelli, Bologna, 1984 p. 20-21.

¹² I temi specifici disponibili nella traduzione italiana, a cura di Corrado Agnes, sono i seguenti (è mantenuta la numerazione originale dei testi pubblicati nella rivista *Praxis der Naturwissenschaften – Physik*): (1) *Le forme dell'energia*; (2) *La potenza*; (3) *Rendimento di Carnot*; (9) *Energia pura*; (10) *L'equivalenza di calore e lavoro*; (13) *L'equivalenza di massa ed energia*; (25) *La tendenza verso il minimo dell'energia*; (31) *Energia chimica*; (33) *Efficienza delle macchine*; (68) *Calore ed energia interna*; (75) *La svalutazione dell'energia*; (86) *La conservazione dell'energia*.