



Repubblica e Cantone Ticino
Dipartimento dell'educazione, della cultura e dello sport
Divisione della scuola
Ufficio dell'insegnamento medio superiore
Centro Didattico Cantonale



*Strumenti per
l'insegnamento interdisciplinare
della termodinamica
nelle scienze sperimentali*

Volume II – Applicazioni didattiche

Sistemi dinamici
Corso di Scienze sperimentali di terza liceo

Luigi Croci, Paolo Danielli, Marco Villa
Liceo cantonale di Mendrisio



Versione maggio 2011

Repubblica e Cantone Ticino
Dipartimento dell'Educazione, della Cultura e dello Sport
Divisione della scuola / Centro Didattico Cantonale e Ufficio dell'Insegnamento Medio Superiore

Strumenti per l'insegnamento interdisciplinare della termodinamica nelle scienze sperimentali

Estratto dal Volume 2 – Applicazioni didattiche (versione maggio 2011)

ISBN 88-86486-60-X

Responsabili del progetto: Michele D'Anna, Giuseppe Laffranchi, Paolo Lubini

Contatti: michele.danna@edu.ti.ch; giuseppe.laffranchi@edu.ti.ch; paolo.lubini@edu.ti.ch

Gruppo di redazione:

Claudio Arrivoli, Luigi Croci, Paolo Danielli, Michele D'Anna, Giuseppe Laffranchi, Paolo Lubini,
Fabio Lucchinetti, Ruben Moresi, Paolo Agostino Morini, Giancarlo Parisi, Christian Rivera, Stefano Russo,
Marco Villa

Immagine di copertina:

Pittura rupestre de la Cueva de la Araña en Bicorp: Individuo recolectando panales,

Apiculture - création Achilléa d'après peinture rupestre de la Cueva de Arana - libre disposition suivant
GNU Public Licence, http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cueva_arana.svg

INDICE

1. Introduzione

2. L'equazione di bilancio

- 2.1. Introduzione e formulazione dell'equazione di bilancio
- 2.2. Processi con flussi costanti
- 2.3. Interpretazione grafica
- 2.4. Alcuni esempi grafici dell'evoluzione $X(t)$ e della variazione istantanea $\dot{X}(t)$
- 2.5. Equazione di bilancio e reazioni chimiche
- 2.6. Verifica delle conoscenze e competenze acquisite

3. L'energia

- 3.1. La grandezza energia
- 3.2. Il portatore di energia
- 3.3. Rappresentazione grafica: i trasferitori di energia
- 3.4. Caratteristiche dei portatori
- 3.5. Il contenuto energetico dei portatori: il potenziale
- 3.6. I diagrammi di flusso: correnti di energia e potenza scambiata
- 3.7. Entropia e calore
- 3.8. Il modello spinta – corrente – resistenza
- 3.9. Verifica delle conoscenze e competenze acquisite

4. Il potenziale chimico

- 4.1. Introduzione al concetto di potenziale chimico
- 4.2. Proprietà del potenziale chimico
- 4.3. Dipendenza del potenziale chimico dalla concentrazione
- 4.4. Verifica delle conoscenze e competenze acquisite

5. Applicazioni in fisica

- 5.1. Pompe di calore
- 5.2. Motori termici
- 5.3. Verifica delle conoscenze e competenze acquisite

6. Applicazioni in chimica

- 6.1. Emissioni antropiche e bilancio globale della CO_2
- 6.2. Equazione di bilancio e livello degli inquinanti atmosferici
- 6.3. Il potenziale chimico e l'equilibrio acido – base
- 6.4. Verifica delle conoscenze e competenze acquisite

7. Applicazioni in biologia

- 7.1. Bilancio idrico nei viventi
- 7.2. Il potenziale di membrana ed il potenziale d'azione
- 7.3. Verifica delle conoscenze e competenze acquisite

Bibliografia

Allegati digitali

- Esercizi e problemi risolti
- Allegati cap 7
- Quattro verifiche (fis/chi)
- Una verifica (bio)

1. Introduzione

Sistemi dinamici è un corso che, con alcune variazioni e numerose implementazioni, è stato tenuto per tre anni consecutivi al Liceo di Mendrisio nelle classi di terza liceo che hanno scelto un curriculum non-scientifico. Per queste classi l'insegnamento delle *scienze sperimentali* si conclude al terzo anno con un corso integrato di biologia, chimica e fisica. Grazie alla messa in campo di un'impostazione didattica uniforme e coerente si è voluto dare particolare risalto alla messa in evidenza di un approccio basato sugli organizzatori cognitivi energia – sistema – corpuscolarità¹.

Il presente lavoro è composto, oltre che da questa introduzione di carattere generale, da altri sei capitoli nei quali vengono presentati i temi e le applicazioni proposti nel corso.² In ogni capitolo, oltre ad un riassunto dei fondamenti teorici del campo di studio affrontato, vengono presentati l'approccio didattico seguito e alcuni possibili approfondimenti praticabili anche in altri corsi. Vengono sempre discusse in dettaglio una o più attività esemplari svolte dagli allievi stessi: altri materiali didattici si possono trovare negli allegati digitali.

Nella prima parte del percorso didattico (capitolo 2) si introduce lo strumento principale, che verrà utilizzato in tutto il corso, grazie al quale viene proposto lo studio di vari fenomeni: l'**equazione di bilancio**. L'utilizzo di questo strumento permette di prevedere l'evoluzione di una *grandezza estensiva* all'interno di un *sistema*, sulla base delle interazioni che il sistema considerato ha con l'ambiente che lo circonda.

Con gli allievi è essenziale approfondire alcuni concetti come quello di sistema, di grandezza estensiva, di flusso attraverso il bordo del sistema, di produzione o annichilazione interna: concetti che rappresentano i termini dell'equazione di bilancio. Accanto alla formulazione dell'equazione di bilancio viene proposto nel corso un approfondimento sulla **rappresentazione grafica** dell'evoluzione temporale delle grandezze in esame e dei loro tassi istantanei. In questo modo è possibile fare un riferimento più chiaro, nella lettura dei grafici, a termini quali l'aumento o la diminuzione di una quantità oppure la crescita o decrescita della variazione istantanea della quantità. In più si vuole fare uso degli elementi scientifici a disposizione degli allievi, acquisiti nel primo biennio, per poter discutere l'evoluzione temporale di una quantità attraverso l'analisi di *pendenze e aree*. Infine si introducono i concetti di *stato d'equilibrio* e di *regime stazionario* di un sistema, molto utili per la descrizione di diversi sistemi fisici, chimici e biologici trattati in seguito.

L'analisi di sistemi dinamici, che interagiscono con l'esterno attraverso dei limiti ben definiti nello spazio, permette la descrizione astratta di processi e fenomeni reali. A questa analisi viene affiancato un *modello*, riassunto nello schema **spinta-corrente-resistenza**, che può essere introdotto per interpretare l'origine dell'*interazione* tra i sistemi dinamici in esame e l'ambiente esterno. In particolare si evidenzia un'analogia che sussiste nei vari fenomeni naturali considerati: quella di poter spiegare grazie ai tre concetti di spinta, corrente e resistenza le cause della formazione di un flusso.

Le differenze (o gradienti) di alcune grandezze intensive costituiscono la "spinta" per la "corrente" di una grandezza estensiva. Inoltre, insieme a queste *differenze di potenziale* (ad esempio la "f.e.m." in elettrodinamica e le "forze generalizzate" in termodinamica) bisogna considerare anche le proprietà del *mezzo* attraverso il quale si sviluppa il flusso, che determinano la "resistenza" al flusso. È chiara l'analogia con le correnti elettriche che, però, sono solo uno dei vari processi che

¹ Vedi Vol 1, cap 2.

² La parte di biologia è stata integrata da altri temi introduttivi sulla fisiologia del sistema nervoso che qui non vengono presentati. Essi sono necessari per far acquisire agli allievi alcuni prerequisiti richiesti da questo corso.

possono essere descritti da *equazioni fenomenologiche costitutive* quali, ad esempio, la legge di Ohm per la conduzione elettrica, la legge di Hooke per l'elasticità, la legge di Fourier per la conduzione termica, la legge di Fick per la diffusione, ecc. Tali equazioni, che specificano il comportamento di un sistema (e quindi identificano un modello), hanno tutte la stessa struttura che può essere interpretata, appunto, nello schema spinta-corrente-resistenza. A questo proposito lungo il percorso didattico vengono presentate **analogie** in applicazioni nell'ambito idraulico, meccanico, elettrico, termico, chimico e biologico.

Nei capitoli 3 e 4 viene dato ampio spazio alla grandezza **energia** e alle grandezze ad essa coniugate nei processi di trasporto, i **portatori di energia** e i rispettivi **potenziali**.³ Questa rappresentazione costituisce il secondo strumento fondamentale di questo corso.

Nel capitolo 3, dopo un'introduzione sulle proprietà dei portatori e dei potenziali, si introducono i *diagrammi di flusso* per rappresentare graficamente i processi nei quali interviene una corrente di energia. I processi accoppiati, nei quali l'energia viene trasferita da un portatore ad un altro, sono schematizzati dai *trasferitori* di energia, utili per definire e visualizzare tali trasferimenti con le *potenze scambiate*. Ci si sofferma poi, in particolare, sui processi termici, con l'introduzione della grandezza **entropia**, un approfondimento sulle sue proprietà e della sua relazione con il concetto di *calore*. Il capitolo 4 è costituito da tre moduli didattici che introducono la grandezza **potenziale chimico** e propongono un'introduzione sperimentale e un approfondimento delle sue proprietà e della sua dipendenza con altre grandezze fisiche.

Gli ultimi capitoli (5, 6 e 7) sono dedicati ad **applicazioni** in ambito fisico, chimico e biologico del modello spinta-corrente-resistenza in cui si fa ampio uso dello strumento equazione di bilancio e dei portatori di energia.

Nel capitolo 5 sono illustrate applicazioni nell'ambito delle pompe di calore e delle macchine termiche, con dei contributi sui concetti di efficienza e rendimento.

Nel capitolo 6 sono presentate delle applicazioni nell'ambito della chimica ambientale con particolare riferimento al bilancio globale dell'anidride carbonica ed ai problemi ambientali dovuti all'emissione di inquinanti gassosi. Accanto a questi temi si discute l'applicazione del concetto di potenziale chimico nello studio dell'equilibrio acido-base.

Nel capitolo 7 vengono proposte applicazioni riferite a sistemi biologici in cui l'equazione di bilancio è applicata allo studio dei laghi ed al bilancio idrico degli esseri viventi. Grazie al modello spinta-corrente-resistenza e ad analogie idrauliche si studiano i fenomeni legati alla formazione ed alla variazione del potenziale di membrana.

³ Vedi Vol 1, cap 2.

2. L'equazione di bilancio

Il capitolo propone la presentazione dell'equazione di bilancio e alcune sue applicazioni, un approfondimento sull'interpretazione e l'analisi grafica dell'evoluzione temporale di alcuni fenomeni, e l'applicazione dell'equazione di bilancio nel caso delle reazioni chimiche. Queste tre parti sono di fondamentale importanza perché l'equazione di bilancio costituisce lo strumento d'applicazione didattica principale impiegato nei vari capitoli del corso.

Prerequisiti

Per tutto il presente capitolo non servono prerequisiti particolari, se non quelli normalmente acquisiti in fisica, chimica e matematica nel primo biennio di studio liceale.

Obiettivi

Apprendere il formalismo matematico e saper utilizzare concretamente l'equazione di bilancio, comprendere il significato dei suoi termini e riconoscere il bilancio di alcune grandezze estensive coinvolte in alcuni processi. Apprendere i concetti di sistema, stato d'equilibrio e regime stazionario. Rinfrancare e approfondire gli strumenti d'analisi e di interpretazione grafica dei processi in esame. Saper applicare correttamente l'equazione di bilancio in presenza di reazioni chimiche.

Strategia didattica

La durata di questo capitolo si può quantificare in 12 ore lezione, naturalmente variabili a seconda delle scelte didattiche che si vogliono considerare. Nella prima parte si introducono esempi discussi qualitativamente che aiutano a identificare gli elementi che costituiscono l'equazione di bilancio. Successivamente essi vengono ripresi in maniera quantitativa, accompagnati da altri esercizi e problemi di diversa natura che aiutano l'apprendimento a seconda del grado di approfondimento desiderato.

2.1 Introduzione e formulazione dell'equazione di bilancio

2.1.1 Quadro generale di riferimento per il docente

Lo strumento dell'equazione di bilancio permette di comprendere in maniera efficace le proprietà di alcune importanti grandezze fisiche. Inoltre offre la possibilità di esaminare sia qualitativamente che quantitativamente l'interazione fra il sistema che contiene la grandezza considerata e l'esterno. L'equazione di bilancio offre quindi un aiuto didattico fondamentale per la comprensione e l'analisi di diversi fenomeni e processi perché essi possono essere affrontati dagli allievi su differenti livelli di approfondimento, a dipendenza dei prerequisiti e degli strumenti matematici a disposizione.

Le equazioni fondamentali di diverse teorie fisiche, d'altronde, nascono da *equazioni di bilancio*. Ad esempio, le leggi della dinamica di Newton nella meccanica del punto materiale e l'equazione di Navier – Stokes nel moto dei fluidi viscosi sono delle equazioni di bilancio della quantità di moto; l'equazione di Fourier nella conduzione termica è un'equazione di bilancio dell'energia.

Oltre a essere alla base della fisica del continuo, esistono degli approcci moderni in diversi altri campi, in particolare nella termodinamica lontana dall'equilibrio, che evidenziano la grande potenzialità di questo strumento nell'affrontare nuovi fenomeni fisici, chimici e biologici.

Un'equazione di bilancio, in generale, lega una variabile A associata ad un volume V con una variabile B associata al bordo di V , che può essere espresso con il simbolo ∂V .

Abbiamo così che:

$$A[V] = B[\partial V] \tag{2.1}$$

Le due variabili hanno le stesse dimensioni fisiche ma, per ragioni storiche, talvolta hanno nomi diversi. Ad esempio l'energia interna è associata al sistema, mentre il calore è associato al trasferimento di energia attraverso il bordo del sistema.

Nella trattazione con gli allievi l'equazione di bilancio viene presentata nella sua forma estesa, dove compaiono i termini che descrivono come varia una data grandezza estensiva (cfr. eq. 2.6).

2.1.2 L'equazione di bilancio integrata e istantanea: presentazione in classe

Due esempi qualitativi discussi in classe permettono agli allievi di capire come si possa descrivere un processo mediante il **bilancio** della **grandezza estensiva** coinvolta. In seguito è così possibile formulare l'equazione di bilancio generica esplicitando in modo corretto i vari termini che la compongono.

a) Bacino idrico

La prima situazione presentata alla classe consiste nel discutere delle cause della variazione del volume d'acqua di un bacino idrico (cfr. esercizio 1, serie1 nell'allegato). Agli allievi si chiede di definire il sistema (il *bacino*) e la grandezza in esame ($V = \text{volume d'acqua}$). Le cause della variazione del volume d'acqua contenuto nel bacino idrico, solitamente, vengono ricondotte abbastanza rapidamente al bilancio di quattro fattori:

- l'afflusso d'acqua da parte di immissari;
- il deflusso d'acqua a causa di emissari;
- l'evaporazione di una parte dell'acqua del bacino;
- la pioggia che porta acqua al bacino.

È molto interessante, a questo punto, discutere sull'importanza (o sull'incidenza) di questi fattori sulla variazione del volume d'acqua facendo riferimento ad alcuni casi concreti diversi tra loro, come il caso di uno stagno, di un laghetto alpino, ecc.

Gli allievi si accorgono in questo modo che non è affatto evidente stabilire quale sia il contributo medio giornaliero dell'evaporazione, piuttosto che del tasso netto di afflusso/efflusso causato dai fiumi. In generale essi tendono a considerare scarso il contributo dell'evaporazione e della pioggia (intesa come contributo diretto al bacino e non come causa di ingrossamento dei fiumi). Interessante notare, inoltre, come molto raramente vengono presi in considerazione altri fattori che possono contribuire alla variazione del volume d'acqua di un bacino, come l'apporto dovuto ad afflussi e deflussi sotterranei.

Un caso concreto, corredato da dati sperimentali, viene proposto e discusso nel paragrafo 7.1.

Al termine dell'attività, gli allievi riconoscono e riassumono nei termini di *corrente* in **entrata** e in **uscita** i vari fattori elencati precedentemente. Il risultato ottenuto è perciò formalizzabile tramite la seguente equazione di bilancio:

$$\text{variazione volume d'acqua} = \text{entrata d'acqua dall'esterno} - \text{uscita d'acqua verso l'esterno}$$

È interessante notare come un semplice bilancio economico sia un altro esempio istruttivo: la variazione di un piccolo capitale presente nel proprio portafoglio dipende dalle entrate (ricavi) e dalle uscite (costi). In questo caso è esplicita la scelta del segno: positivo per le entrate e negativo per le uscite.

b) Evoluzione demografica

Questo secondo esempio permette agli allievi di capire come alcuni processi non possono essere spiegati unicamente con le entrate e le uscite di una grandezza attraverso il sistema in esame.

Infatti, nel caso dell'evoluzione del numero di abitanti di un paese, oltre alle migrazioni (uscite) e alle immigrazioni (entrate) si individuano subito due nuovi fattori che contribuiscono alla variazione demografica: le *nascite* e le *morti*.

Essi devono essere introdotti nell'equazione di bilancio e rappresentano, nel caso più generale, i termini di "produzione" e di "distruzione" (o "annichilazione") della grandezza in esame che avvengono all'interno del sistema.

Formalizzazione dell'equazione di bilancio

È possibile ora, per il docente, introdurre l'equazione di bilancio vera e propria con una formalizzazione matematica.

Dagli esempi proposti gli allievi arrivano a comprendere che l'equazione di bilancio permette di studiare l'*evoluzione* di un dato processo sulla base delle interazioni che il sistema considerato ha con l'ambiente che lo circonda. È così possibile descrivere la *variazione nel tempo* di una *grandezza estensiva* considerata all'interno di una determinata porzione di spazio, che abbiamo definito *sistema* Σ .

La forma generale dell'equazione di bilancio si può quindi esprimere come segue:

$$\{\text{variazione entro il volume } V\} = \{\text{flusso attraverso il bordo } \partial V\} + \{\text{produzione/distruzione entro il volume } V\}$$

e, indicando con X la variabile sulla quale è possibile eseguire un bilancio, si può scrivere in termini più sintetici e riferiti ad un **intervallo di tempo** (equazione di bilancio *integrata*)

$$X^{\text{var}}(V) = X^{\text{flusso}}(\partial V) + X^{\text{prod/distr}}(V) \quad (2.2)$$

In particolare, si vedrà più avanti, possiamo scrivere un'equazione di bilancio per ciascuna delle seguenti grandezze: *massa; energia; carica elettrica; quantità di moto; momento angolare; entropia; quantità di sostanza*.

Per ogni *grandezza estensiva* X è possibile infine esprimere l'equazione di bilancio riferita all'**istante di tempo** (equazione di bilancio *istantanea*), ossia una relazione della forma:

$$\dot{X} = I_X + \pi_X \quad (2.3)$$

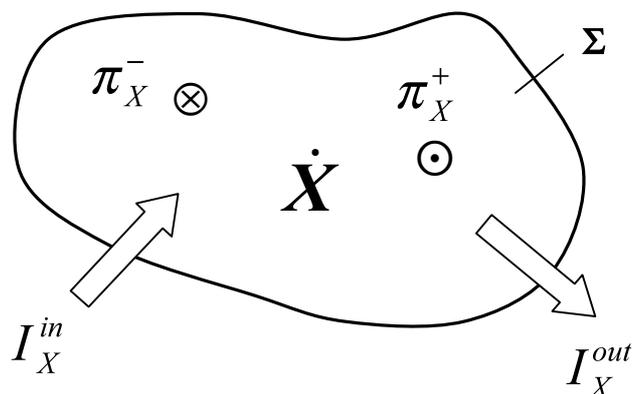


Fig. (2.1): I termini dell'equazione di bilancio.

dove la grandezza $\dot{X} = dX/dt$ rappresenta la **variazione istantanea** (o **tasso istantaneo**) della grandezza X all'interno della regione di spazio considerata e dipende sia dall'intensità della **corrente** associata agli *scambi con l'esterno*, I_X , sia dal tasso istantaneo di **produzione** e **distruzione** (o annichilazione) *interni*, π_X . Questi termini sono rappresentati in modo schematico nella Fig. (2.1).

L'equazione (2.3) è anche l'espressione dell'equazione di bilancio che utilizziamo nel corso.

I due termini, I_X e π_X , vogliono evidenziare le *modalità* secondo le quali la grandezza estensiva X può *variare* all'interno del sistema considerato. Da un lato si hanno le correnti di X , che possono sia entrare (I_X^{in}) che uscire (I_X^{out}) dal sistema, tale da avere la corrente netta I_X :

$$I_X = I_X^{in} + I_X^{out}, \quad \text{con } I_X^{in} > 0 \text{ e } I_X^{out} < 0. \quad (2.4)$$

Dall'altro lato si hanno fenomeni interni al sistema associati al tasso di produzione (π_X^+) e di distruzione (π_X^-) di X , tale da avere la produzione netta π_X :

$$\pi_X = \pi_X^+ + \pi_X^-, \quad \text{con } \pi_X^+ > 0 \text{ e } \pi_X^- < 0. \quad (2.5)$$

Possiamo quindi riscrivere l'equazione di bilancio (2.3) in una forma più estesa:

$$\dot{X} = (I_X^{in} + I_X^{out}) + (\pi_X^+ + \pi_X^-). \quad (2.6)$$

2.1.3 Primo utilizzo dell'equazione di bilancio formalizzata

Evoluzione demografica

Dopo aver discusso qualitativamente dei termini che causano la variazione del numero di individui di una popolazione, si procede con un esempio quantitativo.

In questo esercizio proposto agli allievi si vogliono considerare *costanti* le correnti attraverso il sistema e i tassi di produzione/distruzione al suo interno, di modo che essi *non variano nel tempo*:

$$I(t) = I, \quad \pi(t) = \pi \quad \Rightarrow \quad \dot{X}(t) = \dot{X}. \quad (2.7)$$

Lo scopo è studiare l'evoluzione temporale del numero N di individui di una popolazione di un ipotetico paese (idealizzato con un sistema aperto), tale che soddisfi le condizioni (2.7). Vengono presentati i seguenti ipotetici dati relativi al numero di individui:

Immigrazioni:	8527 persone al mese	$\Rightarrow I_N^{in} = 8527 \text{ p/m}$
Emigrazioni:	5268 persone al mese	$\Rightarrow I_N^{out} = 5268 \text{ p/m}$
Nascite:	2354 persone al mese	$\Rightarrow \pi_N^+ = 2354 \text{ p/m}$
Morti:	2188 persone al mese	$\Rightarrow \pi_N^- = 2188 \text{ p/m}$

Una volta scritta l'*equazione di bilancio* gli allievi sono chiamati ad analizzare i vari termini e a calcolare qualche valore demografico:

- variazione* totale della popolazione in 1 anno;
- flusso* netto di persone scambiate con l'esterno (*corrente netta*);
- persone *scambiate* in un anno;
- tasso* netto di nascite e morti (*produzione netta*);
- incremento* netto dovuto a nascite e morti.

L'equazione di bilancio (2.6) è data da:

$$\dot{N} = (8527 \text{ p/m} - 5268 \text{ p/m}) + (2354 \text{ p/m} - 2188 \text{ p/m}) = 3259 \text{ p/m} + 166 \text{ p/m} = 3425 \text{ p/m}$$

dove \dot{N} indica la variazione “istantanea” (qui l'unità di tempo è il mese) del numero di individui.

In un anno si può facilmente calcolare che la variazione della popolazione è di

$$\Delta N = \dot{N} \cdot \Delta t = 3425 \text{ p/m} \cdot 12 \text{ m} = 41100 \text{ persone.}$$

Il flusso netto di persone scambiate con l'esterno è di

$$I_N = I_N^{in} + I_N^{out} = 3259 \text{ p/m},$$

che ci fornisce il numero di persone scambiate in un anno

$$N_{sc} = I_N \cdot \Delta t = 3259 \text{ p/m} \cdot 12 \text{ m} = 39108 \text{ persone.}$$

Infine il tasso netto di natalità/mortalità è dato da

$$\pi_N = \pi_N^+ + \pi_N^- = 166 \text{ p/m},$$

che ci fornisce l'incremento netto di persone dovuto a nascite e morti

$$N_\pi = \pi_N \cdot \Delta t = 166 \text{ p/m} \cdot 12 \text{ m} = 1992 \text{ persone.}$$

Osservazioni e discussione finale in classe

Nel caso dell'evoluzione temporale del numero di individui appena svolto si sono considerati dei *tassi medi costanti*, relativi ad un intervallo di tempo mensile. In questo modo è stato possibile individuare facilmente i termini dell'equazione di bilancio che il docente può riassumere nei seguenti risultati:

- la **variazione** totale della popolazione in un determinato lasso di tempo, ad esempio un anno: $\Delta N = \dot{N} \cdot \Delta t$;
- il **flusso** netto di individui scambiati con l'esterno (*corrente netta*): I_N ;
- il numero di individui **scambiati** in un anno: $N_{sc} = I_N \cdot \Delta t$;
- il **tasso** netto di nascite e morti (*produzione netta*): π_N ;
- l'**incremento** netto dovuto a nascite e morti: $N_\pi = \pi_N \cdot \Delta t$.

L'equazione di bilancio *istantanea* (2.3) nel caso studiato è data da

$$\dot{N} = I_N + \pi_N$$

Si è in presenza di un regime stazionario solo se $\dot{N} = 0$, cioè solo quando sia verificata la condizione (2.7).

Si conclude l'attività generalizzando le precedenti conclusioni formulando le seguenti proposizioni:

- Gli elementi costitutivi dell'equazione di bilancio hanno *sempre la stessa unità di misura*, data dall'*unità di misura* della grandezza in esame *per unità di tempo*.
- La variazione $\Delta X \equiv X_f - X_i$ della grandezza in esame in un certo intervallo di tempo è data dalla somma tra la quantità della grandezza *scambiata* e la quantità della grandezza *prodotta*: ricaviamo così l'equazione di bilancio *integrata* già espressa dalla (2.2):

$$\boxed{\Delta X = X_{sc} + X_{\pi}} \quad (2.8)$$

I due contributi (netti) al bilancio globale si differenziano per un aspetto importante.

- Le variazioni della grandezza X dovute a fenomeni di trasporto (I_X) coinvolgono sempre due regioni di spazio e devono quindi essere contabilizzate sia nel bilancio relativo all'interno del sistema, sia in quello relativo all'ambiente circostante: quanto esce da un sistema deve entrare in un altro e non può scomparire nel nulla. Le correnti attraverso il sistema modificano sia lo stato al suo interno che lo stato esterno ad esso.
- Differente invece la situazione per quanto attiene ai tassi di produzione/distruzione (π_X): variazioni che rientrano in questa categoria sono contabilizzate *solo* all'interno del sistema, senza che all'esterno vi sia una controparte. I tassi di produzione/distruzione modificano solo l'interno del sistema.

2.1.4 Concetti di sistema, stato d'equilibrio e regime stazionario

Un ulteriore sviluppo della discussione può riprendere alcune importanti definizioni.

In relazione alla possibilità di interagire con l'ambiente esterno, si hanno i seguenti sistemi:

- **Sistema aperto:** permette lo scambio di *materia* e dei conseguenti trasporti *convettivi* delle grandezze (proprietà) ad essa associati.
- **Sistema chiuso:** permette unicamente lo scambio *conduttivo* attraverso il bordo del sistema, senza trasporto di materia (termini convettivi nulli).
- **Sistema isolato:** non permette *alcuno scambio*, non ci sono interazioni con l'esterno (termini di entrata e uscita nulli) $\Rightarrow I^{in} = I^{out} = 0$

Occorre distinguere i casi particolari di un sistema in stato di equilibrio e di un processo (o regime) stazionario:

- **Stato d'equilibrio:** non ci sono scambi con l'esterno e le grandezze interne non variano nel tempo $\Rightarrow I^{in} = I^{out} = 0, \pi^+ = \pi^- = 0, \dot{X} = 0$
- **Regime stazionario:** possono esserci scambi con l'esterno e produzioni interne, senza che varino le grandezze interne $\Rightarrow \dot{X} = 0$

2.2 Processi con flussi costanti

2.2.1 Regime stazionario

Vieni ora considerata l'evoluzione temporale di una grandezza X in un sistema a regime stazionario. Dalla discussione in classe emerge come la condizione di stazionarietà, $\dot{X} = 0$, è soddisfatta se le correnti attraverso il sistema e le produzioni/distruzioni al suo interno si annullino a vicenda:

$$I = -\pi \quad \Rightarrow \quad X(t) = \text{cost.} \quad \forall t \quad \forall = \text{"per ogni"} \quad (2.9)$$

Si rende attento il docente che in alcuni testi si parla di regime stazionario anche in presenza di *processi periodici* nei quali la grandezza fisica $X(t) = X(t+T) \quad \forall t$, dove T (il minimo intervallo di tempo $\neq 0$ per il quale sussiste la precedente identità) è denominato *periodo*.

Proprio come discusso nell'esempio qualitativo del bacino idrico (par. 2.1.2), la variazione istantanea \dot{V} è data, in linea di principio, dall'equazione di bilancio

$$\dot{V}(t) = I_V(t) + \pi_V(t), \quad (2.10)$$

dove $I_V(t)$ rappresenta il flusso d'acqua netto scambiato con l'esterno, e $\pi_V(t)$ gli eventuali tassi di produzione o distruzione d'acqua dovute a trasformazioni interne come cambiamenti di stato, reazioni chimiche, ecc. Per stabilire correttamente i vari contributi all'equazione di bilancio è importante definire il sistema all'interno del quale il volume d'acqua può variare, e le sue caratteristiche.

Se consideriamo il volume d'acqua come una grandezza conservata e incomprimibile, l'equazione di bilancio *istantanea* (2.10) si riduce a

$$\dot{V}(t) = I_V(t), \quad (2.11)$$

che può essere riscritta in termini di equazione di bilancio *integrata* (cioè riferiti ad un intervallo di tempo Δt) come

$$\Delta V = V_{sc} \quad (\pi_V(t) = 0 \quad \forall t) \quad (2.12)$$

In assenza di produzioni o distruzioni interne, nell'intervallo di tempo Δt la variazione ΔV coincide infatti con la quantità scambiata V_{sc} attraverso il bordo del sistema.

Aiutandosi con dei misuratori di flusso si riescono a quantificare le correnti d'acqua in gioco grazie a delle misure sperimentali. Gli allievi sono così confrontati con lo studio dell'equazione di bilancio quale strumento per la modellizzazione di un sistema fisico semplice e facilmente sperimentabile.

Nei capitoli successivi l'equazione di bilancio viene usata nello studio di nuove grandezze fisiche, permettendo così agli allievi di reinvestire quello che hanno appreso e, quando sarà possibile considerare grandezze quali l'energia, l'entropia, la quantità di sostanza, ecc. sarà pure possibile approfondire altre situazioni di regime stazionario, o di regime variabile.

2.3 Interpretazione grafica

Un importantissimo strumento a cui devono fare capo gli allievi è quello della rappresentazione grafica del fenomeno osservato. Il grafico dell'evoluzione temporale di una grandezza offre, infatti, numerosi spunti di analisi che, seppur inclusi nel bagaglio dei prerequisiti del primo biennio, non trovano semplice e immediata applicazione perché utilizzati solo in un determinato campo scientifico (solitamente la cinematica del punto materiale).

Per fissare le idee è utile riprendere in classe gli elementi di analisi di un grafico partendo dal caso di un regime variabile semplice in cui la grandezza in esame, ad esempio il numero di individui $N(t)$ di una popolazione, cresce linearmente nel tempo (per un anno) e le correnti e le produzioni interne rimangono costanti.

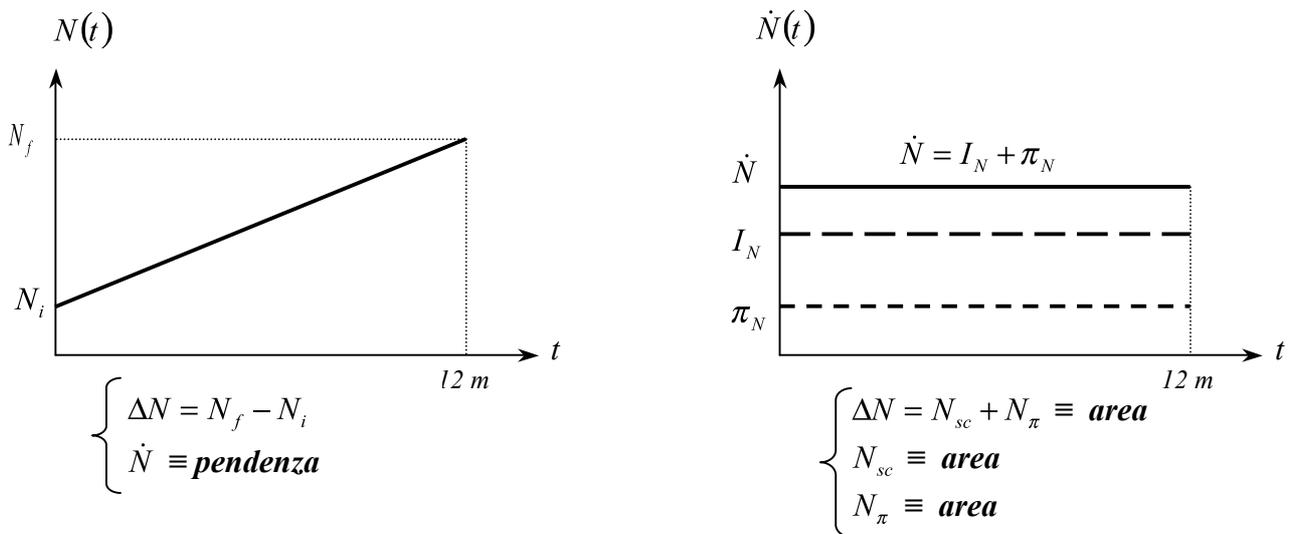


Fig. (2.2): Crescita lineare del numero di individui di una popolazione.

L'interpretazione dei grafici della Fig. (2.2) permette di portare gli allievi a trarre alcune conclusioni generali:

- La variazione istantanea \dot{X} di una certa grandezza X è rappresentata graficamente dalla **pendenza** nel grafico di $X(t)$.
- La variazione ΔX della grandezza in esame in un certo intervallo di tempo è data dall'**area** nel grafico di $\dot{X}(t)$. Anche la quantità della grandezza scambiata X_{sc} e la quantità della grandezza prodotta X_{π} sono date dall'**area** nei grafici di $I_X(t)$ e di $\pi_X(t)$.

Nel caso generale, cioè di andamenti non lineari in cui le correnti attraverso il sistema e le produzioni/distruzioni al suo interno siano dipendenti dal tempo, cioè $I = I(t)$ e $\pi = \pi(t)$, l'interpretazione grafica dell'evoluzione temporale della grandezza in esame, dei suoi scambi con l'ambiente esterno e delle produzioni/distruzioni all'interno del sistema resta immutata.

Rimangono cioè applicabili gli strumenti di pendenza e di area che, anzi, spesso sono l'unico mezzo a disposizione per calcolare le variazioni ΔX e le quantità scambiate X_{sc} o prodotte X_{π} .

2.4 Alcuni esempi grafici dell'evoluzione $X(t)$ e della variazione istantanea $\dot{X}(t)$

Di seguito vengono mostrati esempi grafici dell'evoluzione temporale di una grandezza X , che può essere, come negli esempi precedenti, un volume d'acqua ($X = V$) o il numero di individui di una popolazione ($X = N$), e della sua variazione istantanea \dot{X} . Inizialmente, ancora per richiamare elementi acquisiti nel primo biennio (in particolare i grafici spazio-tempo e velocità-tempo di un corpo con moto uniformemente accelerato), si è considerato il caso particolare in cui l'evoluzione temporale $X(t)$ sia descritta da una *funzione quadratica*: la variazione istantanea $\dot{X}(t)$, che geometricamente corrisponde alla pendenza delle tangenti alla curva ad ogni istante t , è così descritta da una *funzione lineare*.

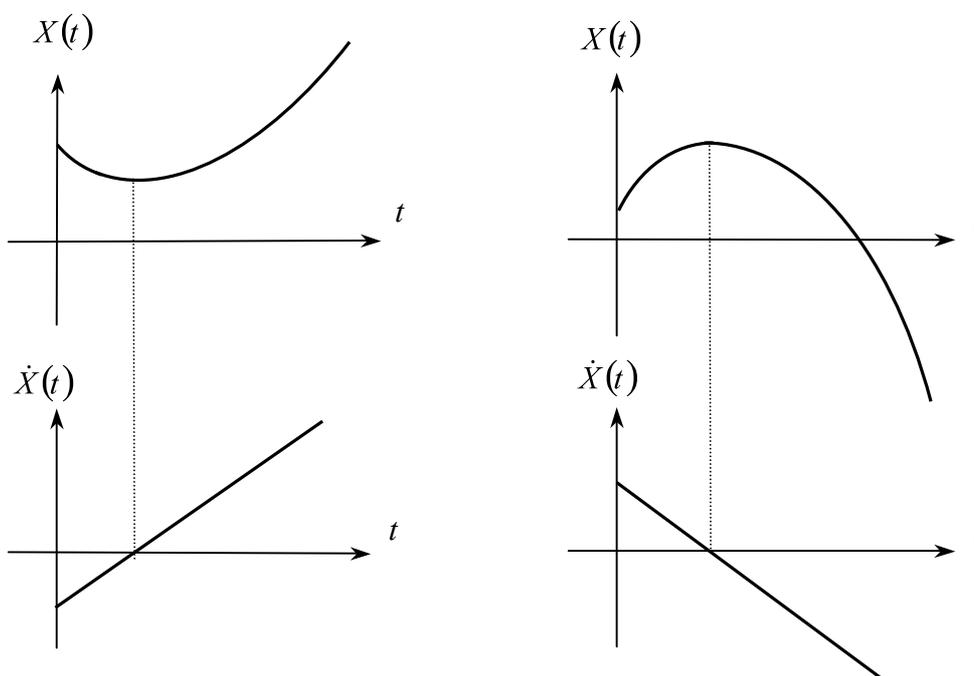


Fig. (2.3): Ad una variazione lineare del tasso istantaneo dX/dt corrisponde una funzione quadratica in X .

Le rappresentazioni grafiche della Fig. (2.3) possono quindi aiutare l'allievo a determinare l'andamento della variazione istantanea di una grandezza qualsiasi a partire dal grafico della sua evoluzione temporale. Infatti la lettura di una pendenza e la sua rappresentazione grafica richiedono esercizio da parte degli allievi, in particolare poi se l'esercizio s'inverte: rappresentare l'evoluzione temporale di una grandezza a partire dal grafico della sua variazione istantanea.

Esercizi e problemi svolti dagli allievi a tal proposito si trovano negli allegati digitali.

2.4.1 Esempi proposti in classe

Alcuni esempi possono essere istruttivi per gli allievi per familiarizzarsi con le rappresentazioni grafiche. A metà classe viene consegnato un foglio con il grafico della grandezza $X(t)$, all'altra metà un foglio con il grafico della grandezza $\dot{X}(t)$: a tutti viene richiesto di disegnare (qualitativamente) il grafico mancante.

Esempio 1.

Una grandezza X aumenta di una certa quantità, la sua variazione istantanea \dot{X} mostra perciò una sorta di picco. L'area racchiusa dal picco è positiva (vedi Fig. 2.4).

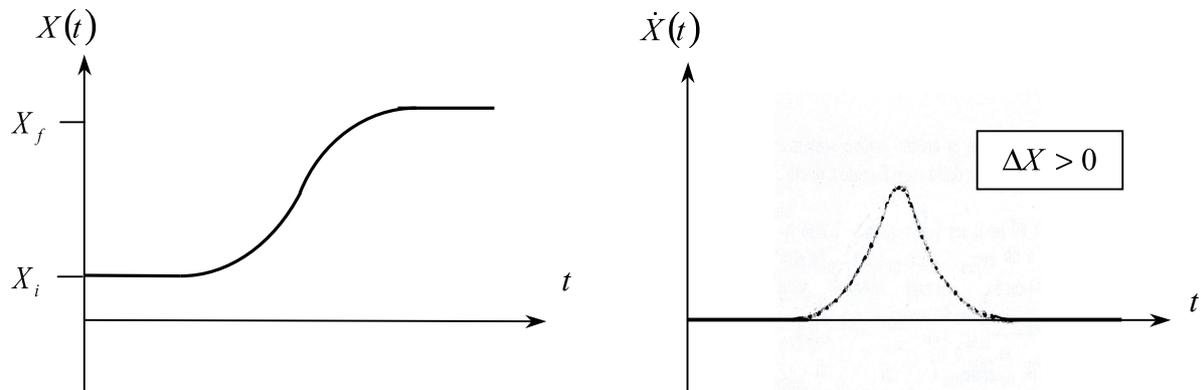


Fig. (2.4): Aumento di una grandezza X di una certa quantità ΔX .

Esempio 2.

Nel grafico seguente la grandezza X subisce un aumento repentino del suo valore per poi ritornare altrettanto rapidamente al suo valore iniziale: non si verifica perciò, dopo la “perturbazione”, una variazione della grandezza in esame. L'area totale racchiusa nel grafico della variazione istantanea \dot{X} sarà perciò uguale a zero.

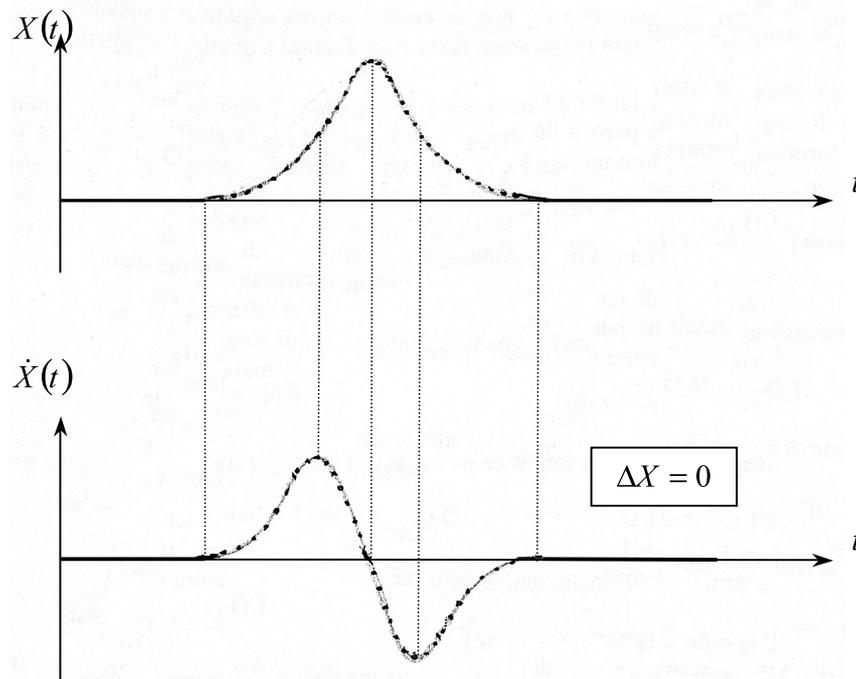


Fig. (2.5): Aumento e diminuzione di una grandezza X , tale da non avere nessun incremento ΔX .

2.4.2 Possibilità di un approfondimento sperimentale nell'ambito di regimi variabili

Un ambito interessante di studio da svolgere con gli allievi, svolto solo in parte in questo corso, consiste nell'analisi concreta di alcuni regimi variabili.

Il caso a regime variabile semplice in cui il volume d'acqua varia linearmente nel tempo con una funzione del tipo $V(t) = at + b$ può essere usato per approssimare fenomeni non lineari. Infatti un andamento non lineare, ad esempio una curva crescente o decrescente, può essere ricostruita

sperimentalmente tramite una sequenza di misure su brevi intervalli di tempo, ciascuna delle quali considerate come se fossero a dipendenza lineare. Ne risulta così una curva a “zig-zag” che tanto meglio approssima la curva cercata quanto è più breve l'intervallo di tempo di misura (cfr. Fig. 2.6).

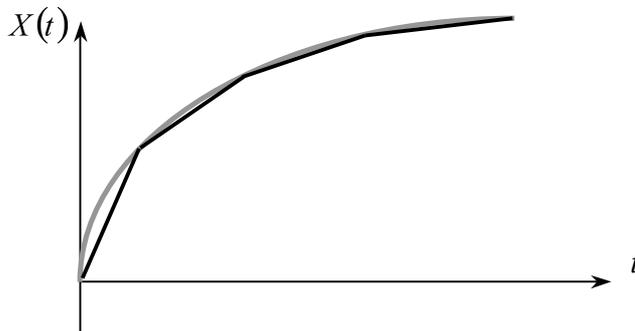


Fig. (2.6): Andamento non lineare approssimato da una serie di incrementi lineari.

È esplicito, in questo caso, il richiamo ai concetti di retta tangente, di incremento infinitesimale, (eventualmente di derivata), come pure ad elementi di cinematica trattati nel primo biennio come la velocità istantanea di un moto (uniformemente) accelerato.

Caso esemplare: svuotamento di un recipiente

Senza entrare in dettagli analitici si può discutere dei parametri che descrivono il processo e comprendere il fenomeno di rilassamento (con andamento esponenziale decrescente) dello svuotamento di un recipiente, nel quale il valore della grandezza volume d'acqua tende asintoticamente ad un valore limite $V_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} V(t)$.

Nell'ambito della rappresentazione grafica dei processi, ci si può limitare a discutere l'andamento grafico $V(t)$ e $\dot{V}(t)$ dello svuotamento di un recipiente:

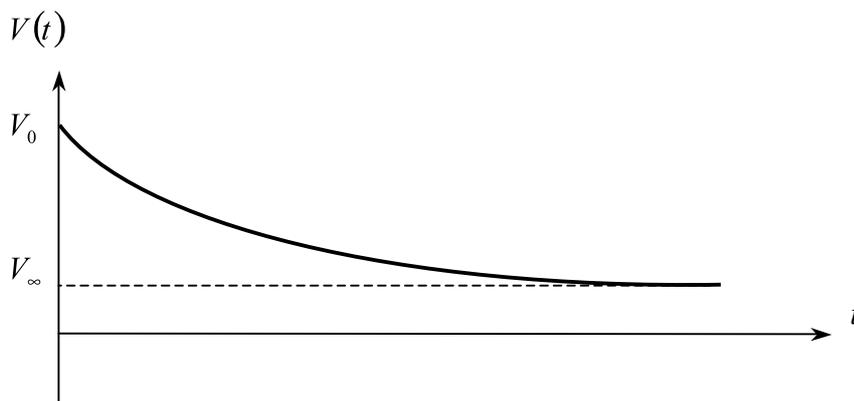


Fig. (2.7): Grafico dello svuotamento di un recipiente.

Occorre aggiungere che un comportamento grafico simile, e cioè l'andamento esponenziale decrescente $V(t) = V_0 e^{-\lambda t}$ rappresentato nella Fig. (2.7), oltre a trattarlo analiticamente nel corso base di matematica gli allievi di terza liceo, lo possono incontrare nell'ambito dello studio della radioattività (decadimento), dell'elettrostatica (scarica di un condensatore), dell'ottica (assorbimento della radiazione in un mezzo), ecc.

Si noti come la pendenza resti sempre negativa, quindi lo è anche l'area racchiusa dal grafico di $\dot{V}(t)$ Fig. (2.8).

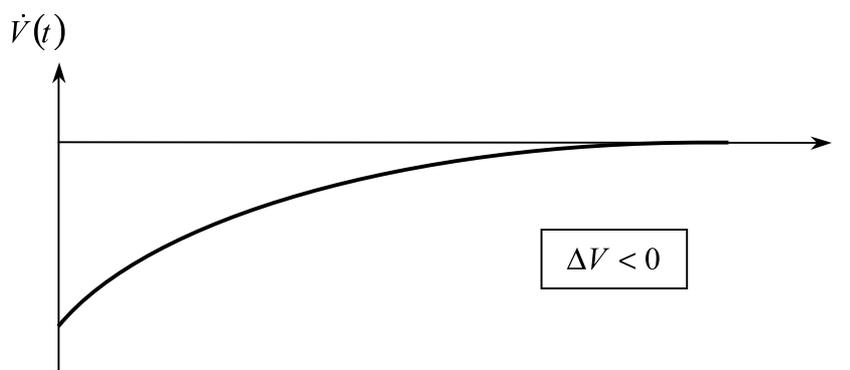


Fig. (2.8): Svuotamento di un recipiente.

2.5 Equazione di bilancio e reazioni chimiche

Il capitolo è dedicato ad una **rivisitazione** nell'ottica dell'equazione di bilancio di concetti e definizioni che tutti gli allievi hanno incontrato nel corso del loro primo biennio di studio della chimica. Per facilitare questa operazione, particolare attenzione deve venir accordata dal docente all'uso di un appropriato linguaggio, come mostrato nei paragrafi sottostanti. La durata di questo modulo è molto variabile (indicativamente, da 4 ad 8 ore-lezione) a dipendenza della difficoltà incontrate dalla classe nell'usare i nuovi strumenti interpretativi e, ovviamente, al grado di approfondimento desiderato in ambito strettamente chimico. La modalità didattica scelta per il modulo è quella della lezione dialogata: è infatti importante che gli interventi dei singoli allievi vengano subito messi in comune e discussi in classe.

2.5.1 Il concetto di reazione chimica

Si inizia rivisitando e precisando il concetto di reazione chimica. La definizione più semplice fa riferimento alla **produzione¹ di nuove sostanze** (cosa che **non** avviene nei passaggi di stato). È utile che il docente verifichi l'avvenuta assimilazione di questo concetto proponendo alla riflessione degli allievi una serie di situazioni rese un tantino più ostiche dalla presenza di opportuni ostacoli linguistici (usando termini quali "formazione" di brina, "sviluppo" di gas, "separazione" di un miscuglio,...).

In un secondo momento la questione della formazione di nuove sostanze viene ripresa a livello microscopico: si pone alla classe il problema se nella formazione di solfuro di ferro a partire da ferro e zolfo gli atomi restino davvero intatti o meno. La presenza di Fe^{2+} e S^{2-} in questo solido ionico porta facilmente gli allievi a comprendere che in effetti nelle reazioni chimiche sono **i nuclei atomici a rimanere intatti²**: i singoli atomi rimangono immutati, ad eccezione del fatto che, proprio a causa della formazione di nuovi legami, uno o più elettroni del guscio esterno (cioè quelli di valenza) possono essere ceduti, acquisiti, o venir messi in comune con altri atomi.

¹ Ci si riferisce a produzione oppure distruzione di sostanze perché questi sono gli stessi nomi usati per i termini presenti nell'equazione di bilancio.

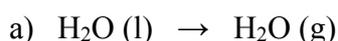
² Nella maggior parte dei manuali di chimica si parla di "**legami tra gli atomi**" contenuti in una molecola. Questa terminologia, seppur molto diffusa, è imprecisa: infatti all'interno di una molecola non esistono più atomi indipendenti, ma nuclei atomici le cui sfere elettroniche interagiscono fra loro in modo da formare legami chimici. In classe però si è continuato ad usare l'espressione "legami fra atomi" evitando di usare termini come "**legami fra nuclei**" che potrebbero risultare comunque altrettanto problematici. Infatti nei manuali di chimica i "legami tra nuclei" vengono definiti come "**intra-molecolari**": si tratta dunque di legami **inter-nucleari** (caratterizzati da interazioni di tipo elettromagnetico), legami che devono essere assolutamente distinti dai legami **intra-nucleari** (caratterizzati da altri tipi di interazioni).

Discutendo una semplicissima reazione chimica (come la formazione di NaCl a partire da sodio e da dicloro) si comprende come il fatto che i nuclei restino intatti durante le reazioni chimiche possa spiegare la **legge della conservazione della massa** (già formulata nel '700 da Lavoisier). È utile che il docente sottolinei ancora una volta il fatto che nelle reazioni chimiche sono le sostanze ad essere create e distrutte, e non i nuclei atomici!

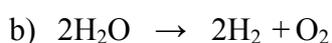
Può essere utile portare la classe a riflettere pure sul formalismo legato ad un'equazione chimica. La classica freccia **non** indica direttamente una corrente di sostanza, ma **l'evoluzione della reazione**³. Se necessario si possono proporre agli allievi dei grafici che illustrano la variazione dei reagenti e dei prodotti nel corso di una reazione chimica: nel corso del processo chimico $A + B \rightarrow C + D$ i **reagenti** A e B vengono gradualmente consumati (cioè distrutti) e si formano i **prodotti** C e D.

Comunemente gli allievi tendono identificare il termine “**sostanza**” con quello di “**formula chimica**”: occorre prestare attenzione e distinguere i due termini. Infatti una sostanza è un'**entità reale**, dotata di ben precise proprietà fisico-chimiche; una **formula** è invece una rappresentazione concettuale dell'unità strutturale (oppure minima) della sostanza stessa. In particolare, per identificare in modo univoco una sostanza occorre riferirsi alla sua **formula di struttura**, ovvero usare una rappresentazione che mostri come gli atomi (o, più esattamente, i nuclei) presenti nella molecola sono legati tra loro (o più in generale, come sono disposti nello spazio).

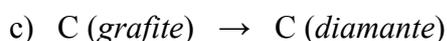
Per chiarire meglio i termini del discorso si possono discutere in classe gli esempi seguenti:



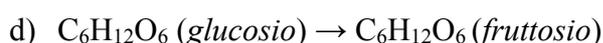
Evaporazione dell'acqua: è un semplice passaggio di stato, non si formano nuove sostanze



Elettrolisi dell'acqua: si formano nuove sostanze!



È una reazione chimica che trasforma una cosiddetta **forma allotropica** del carbonio in un'altra: in questo caso particolare abbiamo a che fare con grafite e diamante, cioè due sostanze diverse ma costituite dallo stesso elemento.



Si tratta di una reazione chimica che trasforma un **isomero di struttura** in un altro: si noti che la **formula molecolare** $C_6H_{12}O_6$ è **la stessa** per tutta una serie di zuccheri in cui gli atomi sono però legati diversamente tra di loro. La formula di **struttura** del glucosio è però diversa da quella del fruttosio.

2.5.2 Il concetto di quantità di sostanza

In questo corso il termine **quantità di sostanza** è stato preferito a quello di **quantità chimica**: questo termine infatti, anche se perfettamente corretto secondo le norme IUPAC, nasconde però un'insidia, ovvero può lasciar intendere che la grandezza che rappresenta riguardi solo le reazioni chimiche. Per superare questo ostacolo è utile ricordare agli allievi che la quantità di sostanza entra anche in numerose leggi naturali (come la **legge dei gas ideali**) in cui non sono coinvolte reazioni chimiche. L'uso sistematico di una terminologia e simbologia sufficientemente rigorose si è rivelato utile per meglio chiarire anche agli allievi più deboli il concetto centrale di **quantità di sostanza**⁴.

³ Per i dettagli teorici si rimanda al cap. 4 del Volume 1).

⁴ Le **precise definizioni** di quantità di sostanza e della sua unità di misura (mol) sono parecchio ostiche e difficilmente si trovano espresse in una forma ineccepibile anche nei più rinomati libri di testo. Un'accurata puntualizzazione di questi aspetti, oltre a richiedere parecchio tempo, distoglierebbe gli allievi dagli obiettivi principali del corso. In qualche lezione si fa dunque uso di espressioni non del tutto accurate, ma che rispecchiano una tradizione didattica consolidata.

Nel sistema SI la quantità di sostanza (simbolo: n) si esprime nell'unità di misura **moli**: è sempre necessario indicare di quale sostanza si tratta:

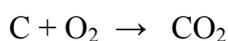
$$\begin{aligned}n_{Zn} &= 0,2 \text{ mol} && (0,2 \text{ moli di zinco}) \\n_{NO} &= 2,3 \text{ mol} && (2,3 \text{ moli di monossido di azoto})\end{aligned}$$

Il linguaggio chimico descrive le reazioni grazie a schemi di reazione (equazioni chimiche) che danno informazioni sia qualitative che quantitative. Proprio a riguardo di queste ultime, anche se sembra scontato, vale la pena insistere con gli allievi che questi **bilanci** in cui si calcolano la produzione e distruzione di sostanze sono riferiti direttamente alla quantità di sostanza, e che dunque è necessario effettuare i calcoli "usando le moli".

Per meglio fissare questa idea vengono proposti i quattro esempi sottostanti, che, prima di essere discussi in classe, sono svolti dagli allievi come esercizi individuali o a gruppi:

- a) *In una centrale termica a carbone vengono bruciati 120 kg di carbone al secondo. Stimare quanta CO₂ viene liberata dal processo.*

Evidentemente **non** sono 120 kg di CO₂ al secondo! Bisogna passare attraverso l'appropriata equazione chimica bilanciata. In questo caso consideriamo il carbone come se fosse composto da carbonio puro (è una buona approssimazione solo nel caso della varietà di carbone detta antracite):

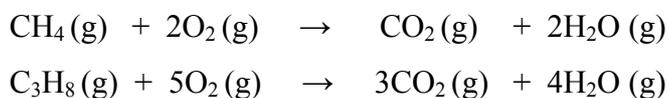


Dall'equazione chimica si vede che per ogni mole di carbonio che reagisce (= viene distrutta) si libera (= viene prodotta) una mole di CO₂. Un semplice calcolo stechiometrico ci dice che 1 mole di carbonio corrisponde ad una massa di 12 grammi di questa sostanza, mentre che una mole di CO₂ equivale ad una massa di 44 g di questo gas. Con una semplice proporzione si può calcolare che dalla combustione di 120 kg di carbonio si liberano ben 440 kg di CO₂: evidentemente la legge di conservazione della massa non è violata in quanto il processo richiede anche 320 kg di O₂!

- b) *Alcuni modelli di automobile sono alimentati a gas naturale: il "pieno" deve essere fatto in apposite stazioni di servizio. Alcuni modelli possono essere alimentati anche con il cosiddetto GPL (gas di petrolio liquefatto), un tipo di carburante erogato da molti distributori in Italia. Perché in questo caso la "centralina" che controlla la cosiddetta iniezione dovrà essere regolata in modo diverso?*

Nell'ottimizzazione del funzionamento di una reazione di combustione occorre tenere in considerazione il tipo di carburante usato: la migliore combustione (e, dunque, anche la minore produzione di sostanze nocive) si ottiene quando il combustibile e l'ossigeno contenuto nell'aria vengono miscelati in un ben preciso **rapporto stechiometrico**.

Il cosiddetto **gas naturale** è composto in gran parte (> 85%) da metano (CH₄). Il cosiddetto **GPL** (gas di petrolio liquefatto) è invece costituito da una miscela di propano (C₃H₈) e butano (C₄H₁₀). Per semplificare il problema ammettiamo di alimentare l'auto con del metano, rispettivamente del propano puri. Abbiamo le seguenti equazioni chimiche:

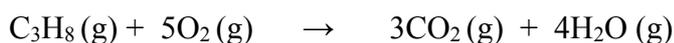
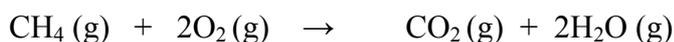


Dall'equazione chimica si vede che per bruciare una mole di metano occorrono due moli di ossigeno, mentre nel caso del propano ne occorrono ben cinque.

Se consideriamo che le reazioni avvengono allo stato gassoso, per risolvere più facilmente il problema possiamo sfruttare il **principio di Avogadro**: *alle stesse condizioni due volumi di gas contengono lo stesso numero di particelle* (in questo caso, molecole di CH₄, C₃H₈, rispettivamente O₂). La combustione del propano richiede un volume di ossigeno superiore: occorrerà dunque modificare la quantità di aria da miscelare al carburante (istruzioni memorizzate nella cosiddetta centralina che controlla l'iniezione del carburante).

- c) *L'utilizzazione dei combustibili fossili causa un'importante immissione antropica (cioè causata dall'uomo) di diossido di carbonio nell'atmosfera. L'aumento della concentrazione di questo gas è ritenuta dagli esperti una delle principali cause del cosiddetto effetto serra. Per cercare di limitare le emissioni antropiche di diossido di carbonio, anche in Svizzera verrà presto introdotta la "tassa sul CO₂". Questa tassa dovrà essere uguale per tutti i combustibili?*

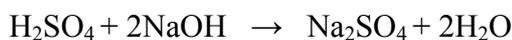
Evidentemente no: occorrerà tener conto della quantità di CO₂ effettivamente prodotta nel corso della combustione. Consideriamo ad esempio le equazioni chimiche viste nell'esempio precedente:



La combustione di una mole di metano libera una sola mole di CO₂, mentre quella del propano ne genera ben tre. La maggior parte dei combustibili non sono però sostanze pure: occorrerà dunque tener conto delle percentuali dei vari idrocarburi presenti nel miscuglio. Una buona stima sulla produzione di CO₂ liberata dalla combustione della benzina può essere effettuata approssimando la stessa con un carburante costituito unicamente da ottano puro (C₈H₁₈).

- d) *In un furgone sono stati caricati dei recipienti contenenti circa la stessa quantità (100 kg) di "soda caustica" (= idrossido di sodio, NaOH), rispettivamente di acido solforico (H₂SO₄). A causa di un incidente i recipienti si rompono. Le due sostanze avranno reagito tra di loro in modo da neutralizzarsi completamente?*

Per semplicità consideriamo di avere dell'acido solforico puro (quello commerciale è di regola al 96% V/V). La reazione chimica è la seguente:



Dall'equazione chimica si vede che per neutralizzare una mole di acido solforico occorrono due moli di idrossido di sodio. Con un semplice calcolo stechiometrico possiamo concludere che:

- 100 kg di H₂SO₄ corrispondono a 1020 moli di H₂SO₄
- 100 kg di NaOH corrispondono a 2500 moli di NaOH

Si nota che la completa neutralizzazione richiede solo 2040 moli di NaOH: il resto è in eccesso. Dunque, anche se le sostanze fuoriuscite dai bidoni si fossero mescolate completamente, sul furgone sarebbero restati comunque 460 moli di NaOH, cioè 18,4 kg di idrossido di sodio che non sono state neutralizzate. Da questo esempio emerge che in certe situazioni un reagente può essere presente **in eccesso**: l'altro reagente viene detto allora

limitante. In generale, per stabilire se in un certo sistema vi sia o meno del reagente in eccesso occorre considerare l'equazione chimica bilanciata ed effettuare i calcoli basati sulle quantità di sostanze presenti.

Nei casi precedenti si è usato il concetto di quantità di sostanza per effettuare dei bilanci al termine di una reazione chimica. Come ultimo importante esempio si deve ancora discutere un caso di un sistema aperto in cui si svolge una reazione e nel quale entrano ed escono in continuazione delle sostanze. In classe viene dunque proposto un esercizio a gruppi in cui si riflette su di un **reattore chimico** per la produzione di metanolo allo stato gassoso (CH_4O (g)) schematizzato nella Fig 2.9:

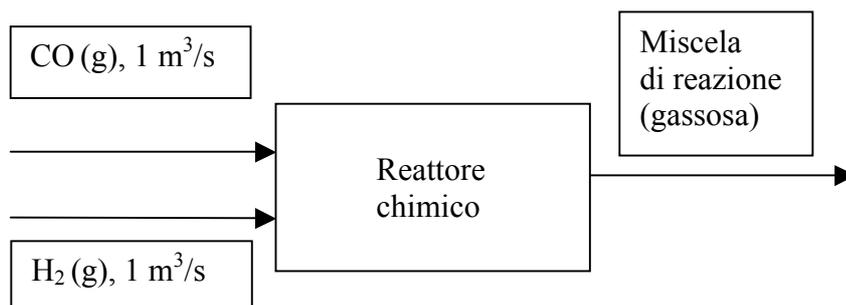


Fig. (2.9): Schema di reattore chimico a flusso continuo.

Per semplicità si suppone che la temperatura dei reagenti e dei prodotti sia la stessa. Il caso può essere affrontato proponendo ai gruppi le seguenti domande:

- Scrivere l'**equazione chimica** (bilanciata) per la sintesi del metanolo.
- Quanti metri cubi di metanolo (g) si possono produrre a partire da **1 m^3 di H_2** ?
- Supponete che il flusso delle sostanze in entrata ed in uscita dal reattore sia costante. Il sistema rappresentato dal reattore sarebbe in un regime **di equilibrio** oppure no? Motivare!
- Calcolare la **composizione della miscela di reazione** ed il suo flusso in uscita (in metri cubi al secondo) ammettendo che la reazione sia praticamente istantanea e che non vengano prodotte altre sostanze se non il metanolo. Attenzione al cosiddetto reagente limitante!
- In un **sistema più vicino al caso reale** (dove la reazione **non** è istantanea), vi aspettate una diversa composizione della miscela di reazione? Perché? (risposta qualitativa!)

La discussione in classe può ovviamente svolgersi secondo diverse modalità, anche in funzione delle difficoltà incontrate nei vari gruppi. Le risposte alle domande sono riassunte qui sotto:

- $2\text{ H}_2(\text{g}) + 1\text{ CO}(\text{g}) \rightarrow 1\text{ CH}_4\text{O}(\text{g})$
- Tutte le sostanze sono allo stato gassoso. Si può dunque applicare il principio di Avogadro: dalla reazione di 1 m^3 di $\text{H}_2(\text{g})$ si può produrre $0,5\text{ m}^3$ di $\text{CH}_4\text{O}(\text{g})$
- $I_X \neq 0$: se i flussi di sostanza sono costanti c'è da attendersi che nel reattore venga a stabilirsi una situazione di regime stazionario
- Il reagente limitante è H_2 . Supponendo una reazione completa ed istantanea il flusso di metanolo gassoso all'uscita del reattore sarà di $0,5\text{ m}^3/\text{s}$. All'uscita del reattore troveremo anche $0,5\text{ m}^3/\text{s}$ di CO che non hanno reagito.
- In generale in un sistema reale (dove la reazione **non** è istantanea) potremmo trovare in uscita dal reattore anche H_2 e CO che non hanno reagito.

Questo esercizio a gruppi può evidentemente servire anche a mettere meglio a fuoco le difficoltà degli allievi al termine di questo modulo didattico ed ad identificare i punti da eventualmente riprendere magari tramite ulteriori esercizi (per una lista completa vedi l'allegato).

2.5.3 Energia e reazioni chimiche

Questo spunto di riflessione è stato inserito proprio qui per evidenziare la **centralità del concetto di energia** (trattato in dettaglio nel prossimo capitolo) anche nel contesto delle reazioni chimiche.

Nel caso dei carburanti o degli oli da riscaldamento l'aspetto energetico è ovvio: lo è meno invece il legame con il concetto di quantità di sostanza appena affrontato dagli allievi. Ritornando agli esempi visti in precedenza, si deve rendere attenta la classe al fatto che la combustione di una mole di **propano** libera una quantità energia maggiore di quella di una mole di **metano**. Nell'ottica della limitazione dell'effetto serra i carburanti fossili migliori sono però quelli che, in un processo di combustione, **liberano la maggior quantità di energia rispetto alla quantità di CO₂** immessa nell'atmosfera. Grazie ai dati sperimentali si può effettuare **un bilancio energetico** concreto:

Metano: $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ Energia liberata: 890 kJ (pro mol di CH₄ bruciato)

Propano: $\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 \rightarrow 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$ Energia liberata: 2220 kJ (pro mol di C₃H₈ bruciato)

Si ottengono, nel caso del metano, **890 kJ/mol** di energia liberata per mole di CO₂ emessa, mentre in quello del propano 2220 kJ / 3 mol, ovvero **740 kJ/mol** per mole di CO₂ emessa.

Dunque, considerando le emissioni di anidride carbonica per rapporto all'energia liberata, l'uso del metano come combustibile è da preferire a quello del propano! In queste considerazioni non sono inclusi altri aspetti pure rilevanti, quali il costo energetico dei processi legati all'estrazione, raffinazione, e trasporto di questi gas combustibili.

2.6 Verifica delle conoscenze e competenze acquisite

Alla fine di questo capitolo occorre verificare l'acquisizione delle seguenti conoscenze e competenze:

- saper riconoscere e spiegare i termini dell'equazione di bilancio di una grandezza estensiva nei diversi ambiti di studio;
- saper riconoscere e discutere lo stato d'equilibrio, il regime stazionario e il regime variabile di un sistema;
- saper rappresentare qualitativamente il grafico dell'evoluzione temporale di una grandezza e della sua variazione istantanea;
- saper effettuare calcoli quantitativi grazie all'uso opportuno di aree e pendenze estrapolate dai grafici;
- saper distinguere tra la grandezza fisica quantità di sostanza (= quantità chimica) e la sua unità di misura (mole);
- saper usare il corretto formalismo per esprimere la quantità di sostanza, il numero di particelle e la concentrazione molare;
- saper interpretare in termini di equazione di bilancio reazioni ed equazioni chimiche;
- effettuare semplici calcoli stechiometrici usando il principio di Avogadro.

Una selezione delle verifiche scritte effettuate nelle varie classi (comprendenti anche argomenti trattati in altre parti del corso) è presente negli allegati digitali.

3. L'energia

Grazie allo strumento dell'*equazione di bilancio* introdotto nel Capitolo 2, ci addentriamo ora ad analizzare le proprietà di alcune grandezze fisiche. In particolare, in questo capitolo viene evidenziato il ruolo fondamentale dell'*energia* per la comprensione e lo studio dei fenomeni naturali, e il fatto che l'energia, nei processi di trasporto, venga sempre associata ad almeno un'altra grandezza fisica che definiamo *portatore di energia*.¹ Dopo il concetto di *potenziale*, interpretabile come indicatore del contenuto energetico dei portatori, si introduce il modello di *spinta-corrente-resistenza* che offre un'interessante possibilità didattica per interpretare in modo chiaro il meccanismo con cui avvengono diversi processi. Questo modello, insieme con l'equazione di bilancio, costituisce le fondamenta su cui si basano i prossimi capitoli. Viene proposto, infine, un approfondimento sul concetto di *calore* e sui processi di *produzione dell'entropia*.

Prerequisiti

Concetti e competenze acquisiti tramite lo sviluppo del modulo didattico presentato nel Cap. 2.

Obiettivi

Conoscere le proprietà della grandezza energia e dei suoi portatori; riconoscere il ruolo dell'energia come "principio regolatore" nei diversi processi fisici, chimici e biologici.² Saper disegnare un *diagramma di flusso* (rappresentazione grafica del trasferimento di energia da un portatore all'altro) e riconoscere l'importanza della *potenza scambiata* (l'energia messa a disposizione dal processo). Saper interpretare la causa e la permanenza di processi a regime stazionario grazie al modello spinta-corrente-resistenza.

Strategia didattica

La durata di questo capitolo si può quantificare in circa 12 ore lezione. Esso si basa essenzialmente sulla presentazione di concetti teorici che vengono poi utilizzati e approfonditi nei capitoli successivi. Esempi illustrativi ed esercizi accompagnano comunque i vari temi e ne aiutano man mano la comprensione.³

3.1 La grandezza energia

3.1.1 Premessa

Il concetto di energia non è nuovo agli allievi di terza liceo, anno per il quale è stato preparato questo corso. Perciò si è deciso semplicemente di riproporlo, in questo contesto, a partire dalle sue note proprietà di grandezza estensiva e conservata, tramite l'equazione di bilancio. Nei prossimi paragrafi e nel capitolo 5 si riprende il concetto di energia relativamente al contesto sociale, in un breve approfondimento sull'uso e sul significato del termine energia nell'ambito dell'approvvigionamento energetico, dell'efficienza energetica dei dispositivi elettrici e delle macchine termiche, delle energie rinnovabili e delle problematiche ambientali. Di particolare importanza in questo contesto è l'elaborazione di un corredo di termini e di concetti che saranno utilizzati dai colleghi in tutto il corso. In questo modo è possibile un insegnamento multidisciplinare coordinato fra i docenti e coerente nell'esposizione didattica verso gli allievi.

¹ Vol. 1, cap. 2.

² Vedi anche M. D'Anna e A. Merletti, *Il ruolo dell'energia nei fenomeni naturali*, XLVI Congresso dell'Associazione per l'Insegnamento della Fisica (AIF), *Energia e Ambiente*, Montesilvano, 17 – 20 ottobre 2007.

³ Cfr. anche gli allegati digitali.

3.1.2 Equazione di bilancio dell'energia

In questa prima parte, si invitano gli allievi a interpretare le (già note) proprietà dell'energia, in particolare quella di essere una grandezza conservata, per mezzo dell'equazione di bilancio.

L'**energia** E (unità di misura: joule = J) è, infatti, una grandezza estensiva molto importante per i processi naturali. L'equazione di bilancio, dal momento che l'energia non ammette termini di produzione e distruzione, assume la seguente forma

$$\dot{E} = I_E = I_E^{in} + I_E^{out} \quad (3.1)$$

dove I_E è la *corrente di energia* e l'unità di misura è il watt [W = J/s].

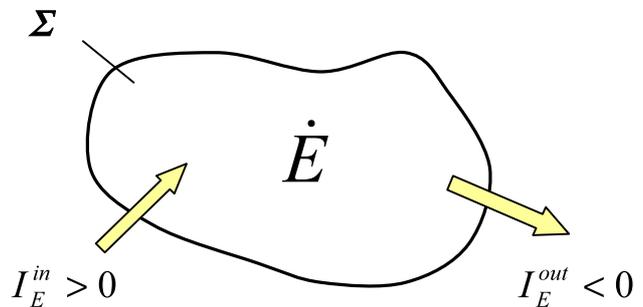


Fig. (3.1): Correnti di energia attraverso il bordo del sistema.

La grandezza energia è riferita ad una *regione di spazio* (il sistema Σ è un contenitore di energia), mentre la corrente di energia è l'energia nell'unità di tempo che *fluisce* da un punto ad un altro attraverso la *superficie* che delimita il sistema.

In classe si sottolinea poi, in particolare, il fatto che esistono altre grandezze estensive X che non possono essere né create né distrutte e che, dunque, i termini π_X^+ e π_X^- presenti nell'equazione di bilancio sono sempre nulli. Queste grandezze possono variare il loro valore all'interno di un volume solo se una corrente fluisce attraverso la superficie che lo delimita. L'equazione di bilancio per le grandezze conservate è quindi la seguente:

$$\dot{X} = I_X \quad (3.2)$$

Tali grandezze (per le quali si ha sempre $\pi_X^+ = \pi_X^- = 0$) sono dette **grandezze conservate**, e l'equazione di bilancio (3.2) diventa un'equazione di *conservazione* o di *continuità*.

Un esempio è rappresentato dall'equazione di bilancio del volume d'acqua già vista in precedenza (cfr. eq. 2.11), altri esempi vengono mostrati nel paragrafo 3.4.

3.2 Il portatore di energia

Con l'aiuto di alcuni casi concreti,⁴ si può già far intuire agli allievi che in tutti quei processi in cui si ha un **trasferimento** di energia, si ha anche il trasferimento di un'*ulteriore grandezza fisica* che può essere chiamata **portatore di energia**.

Il concetto centrale da far comprendere agli allievi è che l'energia non *fluisce* mai da sola!⁵

Occorre soffermarsi sul significato dei termini utilizzati come fluire e trasportare: alcune grandezze estensive (l'energia, l'entropia, la quantità di moto, la quantità di sostanza, la carica elettrica...)

⁴ Cfr. M. D'Anna, Vol. 1 par. 3.1, e anche *Un Atto di Fisica o l'Entropia Giocosa* al XLI° congresso nazionale AIF, con il contributo di D'Anna e Herrmann.

⁵ Nel linguaggio comune vengono indicati come processi di "trasformazione" delle varie "forme" di energia: meccanica, elettrica, termica, chimica, ecc... Vedi, ad esempio, G. Falk, F. Herrmann, B. Schmid, *Diverse forme di energia o portatori di energia?*, didattica KPK, traduzione di Annamaria Fichera, 1983.

vengono infatti definite tipo-sostanza o **tipo-quantità** (dal termine tedesco “Mengenartig” o anche dall'equivalente inglese “substance like”⁶) con lo scopo di sottolinearne caratteristiche comuni quali le proprietà di poter essere trasferite da un sistema all'altro e di poter essere immagazzinate all'interno di un volume.⁷ Naturalmente si rende attento l'allievo al fatto che tali grandezze **non** sono affatto entità materiali, ma che il loro *comportamento* nei processi di trasformazione può essere paragonato a quello di un fluido.

3.2.1 Quadro generale di riferimento per il docente

La giustificazione scientifica dell'approccio didattico adottato si basa sull'interpretazione del formalismo dell'equazione di Gibbs⁸

$$dE = TdS - pdV + \sum_{i=1}^r f_i dX_i \quad (3.3)$$

nella quale compaiono termini formati da grandezze *intensive* (dette anche di *sorgente* di campo) ed *estensive* (dette anche di *configurazione*) coniugate tra loro, che insieme formano delle *variabili energetiche* (che hanno la dimensione fisica dell'energia).

I primi due termini del secondo membro della (3.3) non sono altro che il *calore* e il *lavoro* del Primo Principio della termodinamica, mentre la sommatoria si riferisce alle cosiddette *forze generalizzate* f , ossia a tutte le possibili cause di variazione di energia interna del sistema (reazioni chimiche, interazione di campi elettrici e magnetici, ecc...).

Si noti che la variazione dell'energia è *associata* alla variazione di altre grandezze *estensive* che nell'approccio didattico adottato vengono chiamate *portatori di energia*.

3.2.2 Attività in classe: “l'approvvigionamento energetico di casa mia” (2 ore lezione)

Definire il concetto di energia è impresa ardua. Il termine **energia**, del resto, è utilizzato non solo nelle discipline scientifiche (nel senso di scienze della natura), ma anche in quelle politico-economiche. Ne consegue che ogni individuo, avendo acquisito nel corso della sua esistenza un bagaglio di informazioni sull'energia da un grandissimo numero di canali, si costruisce un suo quadro concettuale che spesso è difforme da quello proposto dalla fisica contemporanea.

Dunque, in base alle conoscenze degli allievi acquisite nei vari ambiti scolastici e grazie all'informazione dei media, una prima attività importante da svolgere in classe consiste nel costruire un quadro d'insieme, una sintesi nella quale il concetto di base è l'energia. Ad esempio si cerca di spiegare di cosa ha bisogno la società per vivere, e più in particolare di cosa ha bisogno un'abitazione per garantire i servizi di cui l'uomo, oggi, ha bisogno. Dall'analisi di questo quadro d'insieme scaturiscono facilmente i concetti di portatore e di trasferitore di energia.

Ecco le domande che sono state proposte agli allievi:

- Di cosa ho bisogno per vivere in casa mia?
- Perché l'energia è importante ed è implicata in tutto ciò di cui ho bisogno per vivere?
- Come arriva l'energia in casa mia (“trasporto”)?
- Da dove arriva l'energia (“produzione”)?
- Che fine fa l'energia (“consumo”)?

⁶ Cfr. F. Herrmann, Praxis-Magazin, *Was ist eine mengenartige Grösse?*, 2006.

⁷ Cfr. F. Herrmann, Praxis-Magazin, *Ding und Mass*, 2008.

⁸ Cfr. anche Vol. 1, cap. 2.

⁹ Si noti l'uso, fra virgolette, di termini del linguaggio comune.

Le risposte date sono variegata e interessanti, e non occorre un gran dispendio di tempo per mettere insieme tutti gli spunti proprio perché si tratta di richiamare aspetti già incontrati, in un modo o nell'altro, nel primo biennio di studio. Si constata che, dagli alimenti alla luce, dall'acqua calda agli elettrodomestici e, estendendo il discorso alla società, dall'industria ai trasporti, tutto può fare riferimento all'energia. Sulle etichette degli alimenti compare il contenuto energetico, nei contatori di casa e sugli elettrodomestici compare il consumo di energia, sulla "carta grigia" dei veicoli compare la potenza del motore, nell'economia si determinano i costi e i ricavi anche in base alla produzione (giacimenti, centrali), al trasferimento (trasporti, rete) e al consumo (clienti finali) di energia.

Dall'analisi delle risposte degli allievi si possono trarre spunti interessanti:

- *l'energia proviene da diverse **fonti energetiche** disponibili: i giacimenti (carbone, petrolio, uranio, gas,...), il Sole (fotovoltaico, collettori), il vento (eolico), la Terra (geotermico), ecc.*
- *L'elettricità è un importante vettore energetico, ed essa stessa viene prodotta dalle **centrali elettriche** che sono di diversa natura: le centrali termiche (che sfruttano i combustibili fossili), le centrali nucleari (fissione dell'uranio), le centrali idroelettriche (che sfruttano un flusso d'acqua) e le altre centrali che sfruttano le fonti di energia rinnovabili (solare, eolico, geotermico, biogas, ecc).*
- *Tutte le centrali elettriche hanno in comune lo stesso obiettivo: creare il **movimento** rotatorio delle turbine, che a loro volta trasmettono il moto ai generatori di corrente elettrica.*

Si può così introdurre il concetto di "**portatore di energia**". Gli allievi inizialmente tendono a identificare questo termine con la *materia* che *contiene* energia e che viene spostata da un luogo all'altro per poter essere sfruttata: ad esempio i combustibili fossili, l'acqua di un bacino idroelettrico, l'elettricità, l'acqua calda nei riscaldamenti, i generi alimentari.

Nel prossimo paragrafo, però, sarà chiarito il fatto che il concetto di *portatore di energia* si riferisce alle *grandezze fisiche* che sono responsabili del *trasferimento* dell'energia da un sistema all'altro. Così, ad esempio, al posto dell'acqua calda è meglio parlare di *entropia* che "accompagna" un flusso di energia (che chiamiamo calore) dall'acqua all'ambiente. Per i combustibili si fa invece riferimento alla quantità di sostanza che viene coinvolta in una reazione chimica, attraverso la quale viene liberata dell'energia utile per essere sfruttata (caricata) da un altro portatore.

Infine, dal momento che l'energia è una grandezza conservata, gli allievi possono interpretare più correttamente ciò che nell'ambito economico, industriale e commerciale viene definito "produzione" e "consumo" di energia: si tratta infatti di un **trasferimento di energia** da un portatore ad un altro (vedi anche il paragrafo 3.3).

Da un punto di vista fisico possiamo considerare l'energia come una grandezza fisica che gode di una serie di **proprietà** che la caratterizzano. In particolare, assieme agli allievi, si può riassumere quanto finora detto dicendo che l'energia è una grandezza estensiva 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;
- è soggetta a “dissipazione”.¹⁰

3.2.3 Le grandezze fisiche chiamate portatori di energia

Nell'attività precedente sono emersi diversi esempi concreti di possibili “portatori” dell'energia legati all'esperienza quotidiana: i carburanti e i combustibili, i commestibili, la corrente elettrica, l'acqua dei bacini idroelettrici e l'acqua calda del boiler, la luce, il moto dei corpi, ecc... È però opportuno fare subito un ulteriore passo in modo da dare agli allievi uno strumento concettuale più rigoroso. Per fare questo occorre riconoscere che solo alcune *grandezze fisiche* sono i reali portatori coinvolti nel **trasferimento** di energia.

In effetti i principali processi fisici possono essere descritti da una piccola famiglia di portatori: il trasferimento di energia, infatti, può essere associato al trasferimento dell'**entropia S** , della **carica elettrica q** , della **quantità di moto p** e della **quantità di sostanza n** .¹¹

Riprendendo gli esempi discussi in precedenza, emerge la necessità di distinguere i casi in cui si ha a che fare con **energia immagazzinata**, cioè contenuta nel sistema, rispetto a quando si è in presenza di **flussi di energia**. Solo nel secondo caso è in effetti possibile parlare di portatori di energia! Nei libri di testo l'energia immagazzinata è riferita alle *forme di esistenza* o di *immagazzinamento* come l'energia cinetica, potenziale e interna, mentre il flusso di energia da un sistema all'altro alle *forme di scambio* come il calore e il lavoro.

3.3 Rappresentazione grafica: i trasferitori di energia

Per comprendere meglio il ruolo dei portatori di energia nei vari processi occorre introdurre una precisa simbologia. È fondamentale per gli allievi, infatti, visualizzare il più chiaramente possibile la situazione in esame e, per fare questo, si propone di rappresentare *graficamente* il “percorso” dell'energia e dei suoi portatori.

Agli allievi viene proposto così di rappresentare il flusso di energia associato alla corrente di un portatore con linee e frecce in questo modo:

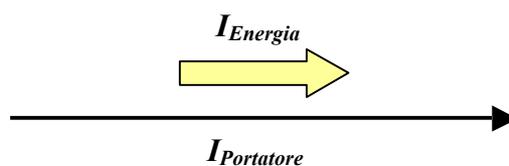


Fig. (3.2): Corrente di energia e del suo portatore.

I processi fisici possono essere quindi rappresentati con degli schemi simbolici chiamati **diagrammi di flusso dell'energia** (vedi anche paragrafo 3.6). Le *sorgenti* e i *ricevitori* di energia sono i sistemi dai quali partono e arrivano i portatori di energia e sono rappresentati come delle scatole. Le scatole sono collegate dalle frecce spesse per l'energia e dalle frecce sottili per i

¹⁰ Quest'ultimo punto, indicato perché presente nella letteratura e nel linguaggio comune, viene spesso citato dagli allievi. Questa idea è del tutto equivalente alla proprietà per cui l'energia “può essere trasferita da un portatore ad un altro”. Infatti il termine “dissipazione” indica solamente che in un processo *non* ideale una parte dell'energia coinvolta è costretta ad essere trasferita (o caricata) sul portatore entropia, a sua volta prodotta a causa dei fenomeni irreversibili, per poi essere evacuata nell'ambiente assieme all'energia. Cfr. i paragrafi 3.4 e 3.6.3.

¹¹ Un'altra entità fisica molto importante che viene sovente indicata come “portatore” di energia è la radiazione elettromagnetica (luce), che è di decisiva importanza per il bilancio termico della Terra. Le sue caratteristiche termiche sono così peculiari e complesse che non vengono trattate in questo corso introduttivo.

portatori di energia, come rappresentato nella Fig. (3.2). Il portatore parte dalla sorgente *carico* di energia e lascia il ricevitore (totalmente o parzialmente) *scarico* di energia.

I sistemi che fungono sia da sorgenti che da ricevitori sono chiamati **trasferitori di energia** (sistema trasferitore Σ^T). Nella Fig. (3.3) sono rappresentati dei possibili trasferitori di energia che vengono mostrati agli allievi come primi esempi grafici. Essi sono quindi chiamati ad interpretarli e a riconoscere delle proprietà importanti per quanto riguarda i portatori di energia.

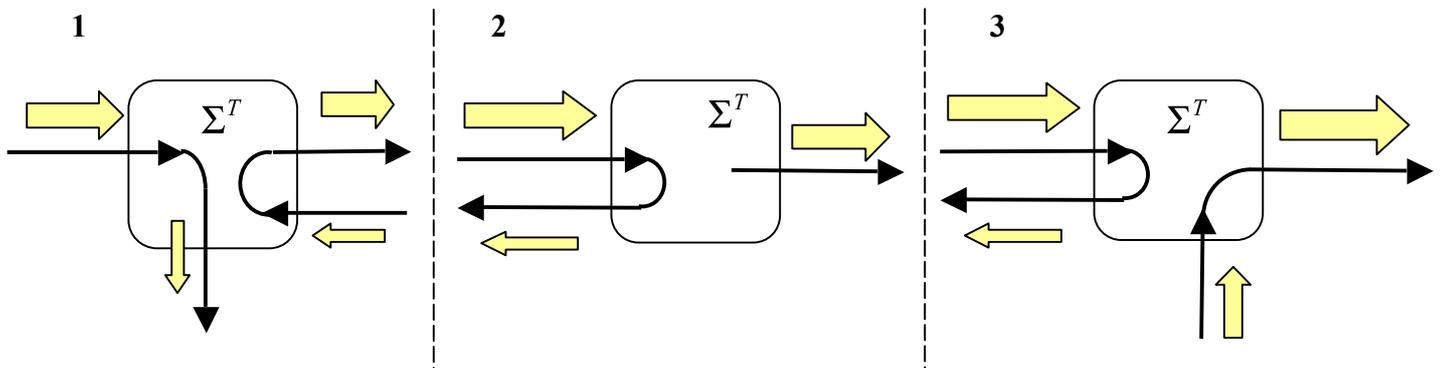


Fig. (3.3): Tre esempi di trasferitore di energia.

Dalla discussione in classe è quindi possibile raccogliere le varie osservazioni scaturite dagli allievi e riassumere le descrizioni dei tre trasferitori di energia in questo modo:

- Schema 1:** il portatore di sinistra viene evacuato (e non più riutilizzato), trasferisce (parte) della sua energia al portatore di destra che, come in un circuito, viene sempre messo a disposizione per essere di nuovo ricaricato.
- Schema 2:** il portatore di sinistra rifornisce continuamente di energia il portatore di destra, il quale viene prodotto direttamente nel trasferitore.
- Schema 3:** il portatore di sinistra rifornisce continuamente di energia il portatore di destra, il quale viene prelevato da un luogo ed evacuato in un altro.

Da questi e da altri esempi concettuali è interessante notare come il portatore possa essere *creato* o *distrutto* all'interno del trasferitore (vedi anche par. 3.4), oppure possa lasciare il sistema in due modi diversi: può *ritornare* alla sorgente per essere nuovamente caricato di energia o può essere *evacuato* nell'ambiente circostante.

È sicuramente utile poi lasciare il tempo agli allievi di familiarizzare con gli schemi proposti e con quelli che vengono approfonditi nei prossimi paragrafi. Essi offrono un comodo strumento per visualizzare i flussi delle grandezze in gioco nei vari processi considerati, e abitano l'allievo a ricercare sempre una sintesi (riassunta appunto dagli schemi) per spiegare i fenomeni naturali.

Esercizio in classe: “dall’acqua alla luce!”

In base agli esempi della Fig. (3.3) discussi in precedenza, agli allievi viene ora chiesto di provare a rappresentare una serie di trasferitori collegati fra di loro. Infatti spesso l'energia viene trasferita da un portatore all'altro più volte di seguito, attraverso una “catena” di diversi trasferitori.

L'esercizio proposto consiste nel rappresentare il trasporto dell'energia da una centrale idroelettrica alla lampadina di casa tramite gli schemi opportuni simili a quelli descritti nella Fig. (3.3). Viene inoltre chiesto di indicare i nomi dei vari portatori di energia.

Il risultato può essere schematizzato come nella Fig. (3.4):

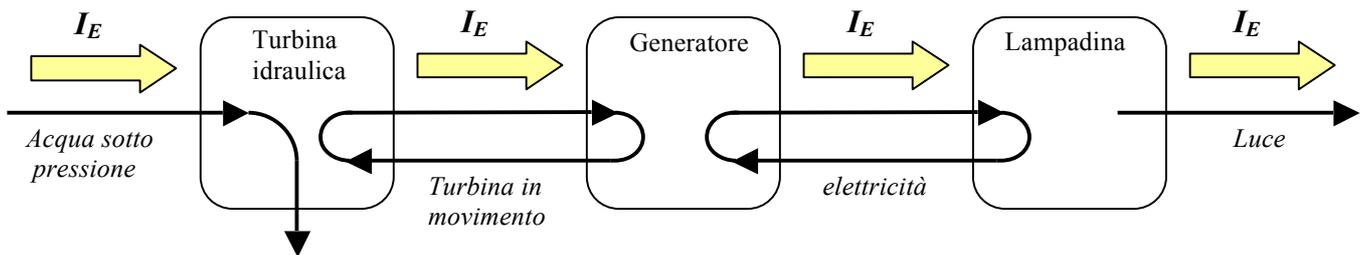


Fig. (3.4): “Catena” di trasferimento dell’energia dalla centrale elettrica alla lampadina.

I nomi dei portatori indicati nella Fig. (3.4) non sono formalmente corretti. Gli allievi inizialmente fanno fatica a distinguere l’agente materiale responsabile del trasporto dell’energia dalla grandezza fisica corrispondente. Volendo però introdurre i nomi corretti dei veri portatori è necessario sostituire i termini utilizzati in questo modo:

Acqua sotto pressione	→	quantità di moto
Turbina in movimento	→	quantità di moto angolare
Elettricità	→	carica elettrica
Luce	→	radiazione elettromagnetica ¹²

3.4 Caratteristiche dei portatori

Ogni portatore possiede delle proprietà peculiari che lo differenziano dagli altri portatori. Agli allievi viene proposto di riassumere queste caratteristiche nelle diverse *equazioni di bilancio* che caratterizzano i vari portatori di energia, proprio come già fatto per la grandezza energia nel paragrafo 3.1.2. Questo aspetto è molto importante da evidenziare nell’esposizione didattica, perché le equazioni di bilancio dei portatori rappresentano anche leggi fisiche importanti come, ad esempio, quelle di conservazione. Nel caso dell’entropia, le sue peculiarità e l’equazione di bilancio corrispondente vengono introdotte dal docente, in modo che sia possibile un primo confronto con questa nuova grandezza che si rivela poi importante nei processi termici trattati in seguito. Ulteriori approfondimenti vengono proposti nei paragrafi successivi.

➤ Carica elettrica

Il portatore carica elettrica fluisce in circuiti elettrici chiusi: infatti dopo aver lasciato il ricevitore torna alla sorgente per essere di nuovo caricato di energia. La carica elettrica è una **grandezza conservata**. La variazione istantanea della quantità carica elettrica è quindi dovuta solo a delle *correnti elettriche*. L’equazione di bilancio diventa perciò:

$$\dot{q} = I_q \quad (3.4)$$

➤ Quantità di moto

La quantità di moto è una proprietà dei corpi in movimento: più la velocità e la massa di un corpo sono grandi, più quantità di moto esso contiene. Il portatore quantità di moto fluisce da un corpo ad un altro a causa di un urto, oppure defluisce a terra in presenza di attrito. In

¹² In questo contesto si potrebbe parlare di *quantità chimica di fotoni*. La luce, già citata nel par. 3.2.3, in base alla definizione utilizzata (grandezza intensiva associata) non è propriamente un portatore di energia. Essa infatti trasporta anche entropia, quantità di moto, ecc. e soddisfa altre relazioni rispetto a quelle che vengono introdotte in seguito (par. 3.6 e seg.) per descrivere i flussi dei portatori e di energia.

ogni caso essa non può essere prodotta o distrutta (**grandezza conservata**), così che l'equazione di bilancio diventa:

$$\dot{p} = I_p \quad (3.5)$$

➤ **Quantità di sostanza** (cfr. cap. 2.5)

Il portatore quantità di sostanza fluisce quando la sostanza è in movimento (I_n), oppure si crea o si distrugge se avviene una **reazione chimica** (π_n). L'equazione di bilancio diventa perciò:

$$\dot{n} = I_n + \pi_n \quad (3.6)$$

➤ **Entropia**

L'entropia è contenuta in *tutti i corpi*. Più la temperatura e la massa di un corpo sono grandi, più entropia esso contiene. Il portatore entropia può sempre fluire da un corpo ad un altro; in ogni caso fluisce *spontaneamente* da punti a temperatura più alta verso punti a temperatura più bassa fino al raggiungimento dell'equilibrio termico. La caratteristica principale dell'entropia è quella di non poter **mai essere distrutta** ($\pi_s^- = 0$), ma **solo prodotta**.

Si deve avere sempre $\pi_s \geq 0$: questa proprietà riassume il **Secondo Principio della termodinamica** (cfr. cap. 5).

L'entropia può essere prodotta in una reazione chimica, in un filo attraversato da una corrente elettrica, grazie all'attrito meccanico, e in generale in tutti i processi definiti *irreversibili*. L'equazione di bilancio diventa perciò:

$$\dot{S} = I_s + \pi_s^+ \quad (3.7)$$

L'*entropia* è quindi una grandezza fisica che¹³

- può essere immagazzinata;
- può fluire da un sistema ad un altro;
- ha il ruolo di portatore di energia nei fenomeni termici;
- per un qualsiasi processo è soggetta ad una legge di bilancio;
- *non* è una grandezza conservata: l'entropia può essere prodotta, ma non può *mai* essere distrutta.

Esiste, da parte degli allievi, la necessità di chiarire la relazione esistente tra l'entropia e il calore. Questo aspetto viene approfondito in fasi successive nei paragrafi seguenti, e in particolare nel paragrafo 3.7.

3.5 Il contenuto energetico dei portatori: il potenziale

Un portatore può essere “caricato” con molta o poca energia: un flusso del portatore è, infatti, associato ad un flusso più o meno intenso di energia. L'aspetto che si vuole approfondire in classe è quello di capire in che modo si possa determinare **quanta energia fluisce** assieme alla corrente del rispettivo portatore.

¹³ Cfr. Vol. 1, cap.3, in particolare i paragrafi 3.2 e 3.4.

Il docente aiuta gli allievi con una premessa importante: la quantità di energia trasferita dalla corrente di un portatore è determinata da **un'altra grandezza fisica** che, in generale, viene chiamata **potenziale** del portatore. Il potenziale corrisponde, infatti, a una *misura di quanto il portatore sia carico di energia*. A questo punto si chiede agli allievi di provare a stabilire quale potrebbe essere l'unità di misura di queste "nuove" grandezze e, conseguentemente, quale relazione lega l'energia, il portatore e il potenziale.

Il risultato al quale essi giungono è che la corrente di energia è data dalla corrente del portatore moltiplicata per il contenuto energetico di tale portatore:

$$\text{corrente di energia} = \text{corrente del portatore} \cdot \text{potenziale} \quad (3.8)$$

L'equazione (3.8)¹⁴ rispetta l'unità di misura indicata dagli allievi stessi per i potenziali, e cioè

$$\frac{\text{joule}}{\text{unità di misura del portatore}}$$

Ma quali sono queste grandezze fisiche che costituiscono i potenziali dei portatori? Nel capitolo 4 viene proposto un percorso didattico utile per determinare le caratteristiche del potenziale riferito al portatore quantità di sostanza: il potenziale chimico. Qui, invece, le diverse grandezze fisiche che fungono da potenziali vengono semplicemente presentate in classe (vedi Tab. 3.1). Lo scopo primario, infatti, è quello di far comprendere il diverso ruolo che assumono le grandezze fisiche (come quello di portatore e potenziale) e la loro applicazione in situazioni concrete (vedi par. 3.6).

Tab. (3.1): I portatori di energia e i rispettivi potenziali, con le loro unità di misura.

<i>portatore</i>	<i>unità di misura</i>	<i>potenziale</i>	<i>unità di misura</i>
Carica elettrica q	C = [coulomb]	Potenziale elettrico ϕ	J/C = [volt: V]
Quantità di moto p	Hy = [huygens]	Velocità v	J/Hy = m/s
Quantità di sostanza n	mol = [mole]	Potenziale chimico μ	J/mol = [gibbs: G]
Entropia S	Ct = [carnot]	Temperatura T	J/Ct = [kelvin: K]

Si noti come, per utilità didattica, si possano considerare primarie le grandezze riferite ai portatori di energia e, pertanto, si associno ad esse unità di misura proprie e indipendenti.¹⁵ In questo modo, si sottolinea il senso dell'unità di misura corrispondente per i diversi potenziali: si tratta di una scelta didattica coerente, perché giustifica l'interpretazione dell'energia come quantità caricata sul portatore ("joule al portatore").

Ad ogni modo, per evitare malintesi o difficoltà nella lettura di testi scientifici, occorre richiamare le unità ufficiali del Sistema Internazionale, per cui si ha che

$$\begin{aligned} 1 \text{ Hy} &= 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s} \\ 1 \text{ Ct} &= 1 \text{ J/K} \\ 1 \text{ G} &= 1 \text{ J/mol} \end{aligned}$$

¹⁴ Per il docente è senz'altro utile far notare come derivando nel tempo l'equazione di Gibbs (3.3) si ricava che la corrente di energia è data dalla corrente del portatore moltiplicata per la grandezza intensiva ad essa coniugata, che noi chiamiamo potenziale.

¹⁵ Le unità di misura così introdotte (huygens, carnot e gibbs) non sono però riconosciute dal SI.

Per le applicazioni concrete sui potenziali si rimanda al prossimo paragrafo che evidenzia le relazioni esistenti fra portatori, potenziali ed energia; in particolare vengono considerati dei processi in cui avviene un trasferimento di energia.

Agli allievi è utile far notare, senza ulteriori considerazioni, che le grandezze che vengono definite come potenziali, sempre associate (coniugate) alle rispettive grandezze estensive (i portatori), sono in effetti delle grandezze **intensive**.

Nel paragrafo 3.6.2 viene mostrato che nei processi in cui avviene un trasferimento di energia, più che il potenziale in sé, è di estrema utilità calcolare (o misurare) quanta energia viene *liberata* da un portatore e *caricata* su un altro portatore (denominata “potenza scambiata”). Inoltre, nel paragrafo 3.8 viene chiarito l'aspetto più importante e fondamentale dal punto di vista didattico: occorre, infatti, guardare alla *differenza* (o gradiente) di potenziale per comprendere le *cause* delle correnti di portatore e dell'energia ad essi associata.

3.6 I diagrammi di flusso: correnti di energia e potenza scambiata

3.6.1 Il trasferitore di energia ideale

In questo paragrafo si vuole evidenziare il ruolo centrale che hanno gli schemi proposti nel paragrafo 3.3, per comprendere meglio gli aspetti energetici dei vari processi considerati in classe. Per fare questo il docente propone agli allievi un esempio concreto, su cui essi devono applicare le conoscenze acquisite fino a questo momento e dal quale è poi possibile ricavare alcuni concetti importanti come la **potenza scambiata** e la **potenza dissipata**.

Esercizio in classe: il trasferitore ideale

Consideriamo un esempio grafico di trasferitore **ideale** per mettere meglio in evidenza i portatori, i potenziali e i flussi di energia. Agli allievi viene chiesto di rappresentare un trasferitore ideale di energia che possa rappresentare un motore elettrico.

Gli allievi sono così confrontati con i portatori carica elettrica e quantità di moto¹⁶. Quest'ultimo portatore non è stato approfondito nei suoi aspetti formali ma, piuttosto, con dei semplici esempi è stato introdotto esplicitando le sue proprietà: è una grandezza conservata che dipende dalla velocità e dalla massa di un corpo, può passare da un corpo a un altro (come nel caso degli urti) o defluire a terra (ad esempio se un corpo in movimento si ferma spontaneamente a causa dell'attrito).

Nel motore elettrico l'energia viene trasferita continuamente dal portatore carica elettrica (elettricità) al portatore quantità di moto¹⁷.

Nella Fig. (3.5) è rappresentato il trasferitore richiesto, con l'aggiunta dei simboli e delle indicazioni riguardanti i potenziali e i portatori.

¹⁶ In questo caso, per essere precisi, si ha a che fare con il portatore *quantità di moto angolare* ma, per ragioni pratiche e di tempo, in questo contesto si parla solo di portatore quantità di moto.

¹⁷ Con questo esercizio e con quello che segue nel par. 3.6.2 si vuole mettere in evidenza la differenza fra un motore ideale e uno reale. Non si ha qui l'esigenza di approfondire il portatore quantità di moto. Ad ogni modo, per correttezza, è giusto chiarire che nel caso di un volano il motore *pompa* quantità di moto angolare da terra al volano attraverso l'albero motore. Il volano in rotazione può scaricare la sua quantità di moto angolare azionando un altro dispositivo.

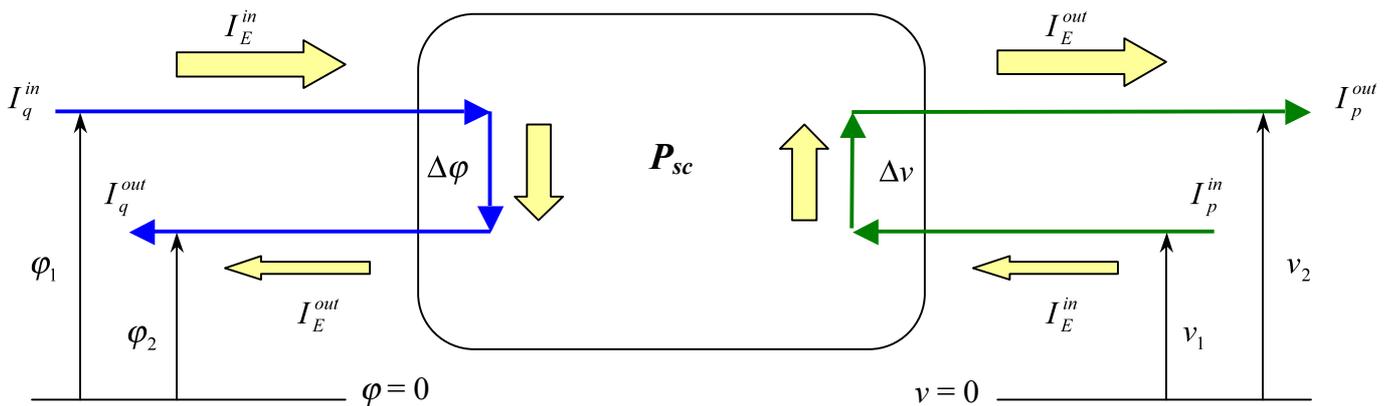


Fig. (3.5): Un esempio di trasformatore ideale.

Si noti che il portatore *carico* di energia è rappresentato, nello schema del trasformatore, sempre al potenziale più *alto* (parte superiore dello schema). La corrente del *portatore* è, in valore assoluto, *uguale* sia all'entrata che all'uscita dal trasformatore: $|I_{portatore}^{in}| = |I_{portatore}^{out}|$.

3.6.2 La potenza scambiata

In classe è importante chiarire il significato del trasferimento di energia che avviene all'interno di un trasformatore (le frecce dell'energia verticali in Fig. 3.5). Quanta energia viene trasferita da un portatore all'altro nel trasformatore? La quantità di *energia trasferita nell'unità di tempo* viene detta **potenza scambiata** P_{sc} , in quanto è l'energia che viene scaricata da un portatore per essere caricata su un altro portatore di energia. La potenza scambiata è una grandezza di primaria importanza in quanto indica **l'energia messa a disposizione dal processo**. Volendo considerare positive le potenze scambiate (e ricordando che $I_E^{out} < 0$), per ogni portatore si ha che

$$P_{sc} = |I_E^{in} + I_E^{out}| \quad (3.9)$$

Sostituendo la (3.8) nella (3.9) è possibile inoltre ricavare la seguente importante relazione:

$$\text{potenza scambiata} = \text{corrente del portatore} \cdot \text{differenza di potenziale} \quad (3.10)$$

Si deve far notare agli allievi come nell'eq. (3.10) compare una **differenza di potenziale** che risulta spesso determinante per poter calcolare la potenza scambiata in un dato processo. Ma anche dal punto di vista sperimentale la differenza di potenziale e l'intensità di corrente dei portatori sono le **grandezze misurabili** dagli strumenti di laboratorio, grazie alle quali è poi possibile risalire all'energia trasferita nei processi in esame.

Nella tabella (3.2) vengono riassunti i portatori con le correnti di energia e le potenze scambiate ad essi associate. Per comodità alle correnti di energia è stato aggiunto il riferimento al proprio portatore. Dal momento che le potenze scambiate indicano l'energia messa a disposizione dal processo, che è la quantità utile misurabile, possiamo indicarle semplicemente con il simbolo P di potenza con l'aggiunta dell'indicazione dei portatori coinvolti nel processo.

Tab. (3.2): I portatori di energia, le correnti e le potenze scambiate.

<i>portatore</i>	<i>Corrente di energia</i>	<i>Potenza scambiata</i>	<i>unità di misura</i>
Carica elettrica q	$I_{E,el} = I_q \cdot \varphi$	$P_{el} = I_q \cdot \Delta\varphi$	$\frac{J}{s} = \frac{C}{s} \cdot \frac{J}{C}$
Quantità di moto p	$I_{E,mecc} = I_p \cdot v$	$P_{mecc} = I_p \cdot \Delta v$	$\frac{J}{s} = \frac{Hy}{s} \cdot \frac{J}{Hy}$
Quantità di sostanza n	$I_{E,ch} = I_n \cdot \mu$	$P_{ch} = I_n \cdot \Delta\mu$	$\frac{J}{s} = \frac{mol}{s} \cdot \frac{J}{mol}$
Entropia S	$I_{E,term} = I_S \cdot T$	$P_{term} = I_S \cdot \Delta T$	$\frac{J}{s} = \frac{Ct}{s} \cdot \frac{J}{Ct}$

Esercizio in classe: il trasferitore reale

Si propone ora alla classe di sviluppare l'esercizio precedente. In particolare si chiede quali sono i cambiamenti che intervengono nella rappresentazione di un trasferitore **reale**, che considera cioè anche i **processi irreversibili**. In questo caso si discute con gli allievi del fatto che occorre tener conto dell'energia "persa" (o dissipata) nei fenomeni dissipativi, come quelli dovuti all'attrito, che a volte viene associata alla "formazione di calore" come si legge anche in ambito scientifico.

L'*energia dissipata*, nell'ambito della rappresentazione grafica, non è altro che dell'energia prelevata da altri portatori, caricata sul **portatore entropia** ed evacuata (appunto dissipata) assieme ad essa nell'ambiente. Quindi, in realtà, l'aspetto rilevante da sottolineare in classe riprendendo anche l'equazione di bilancio (3.8) è che in presenza di fenomeni dissipativi si ha una **produzione di entropia**, che viene poi evacuata dal sistema assieme a dell'energia che nella Fig. (3.6) viene indicata come **potenza dissipata** P_{diss} . L'esatta relazione che intercorre fra il calore e l'entropia viene discussa nel paragrafo 3.7.

In questo esercizio svolto in classe agli allievi viene solamente chiesto di *completare* lo schema del trasferitore già disegnato per il dispositivo ideale precedente: lo scopo è di mostrare come l'energia e l'entropia vengono "dissipati" nell'ambiente. La Fig. (3.6) rappresenta una delle possibili soluzioni a cui si arriva con gli allievi¹⁸.

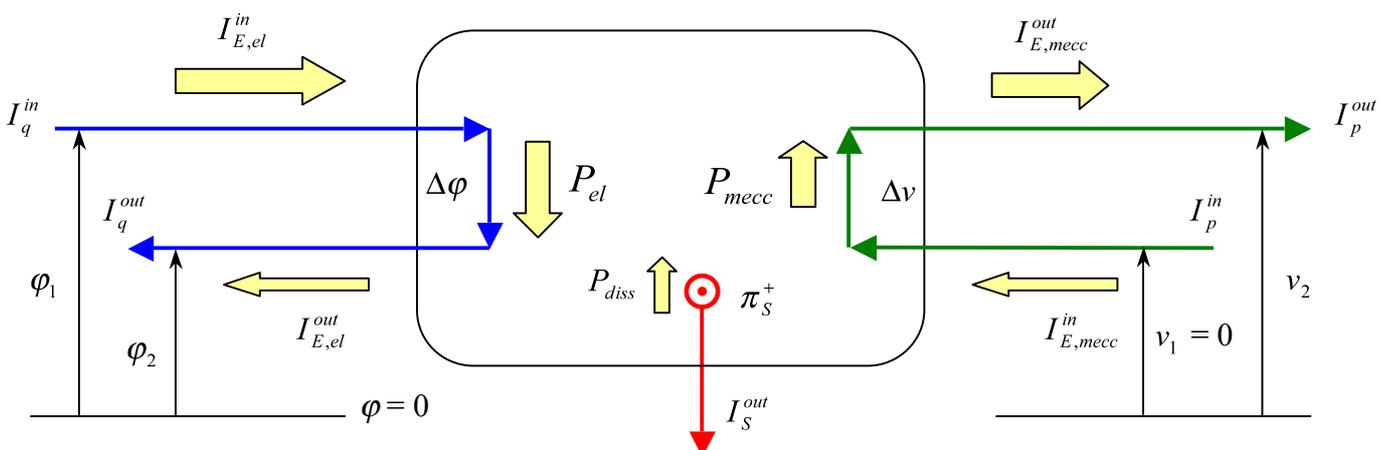


Fig. (3.6): Un esempio di trasferitore reale.

¹⁸ Cfr. anche M. D'Anna, Vol 1, par. 3.6. Per quanto riguarda altre modalità di rappresentazione del flusso di entropia prodotta nei processi dissipativi si rimanda agli schemi ampiamente utilizzati nel Vol. 1, come anche alle Fig. (5.4) e (5.5) del presente volume. Si noti come, per comodità, le potenze sono indicate con frecce rivolte verso il basso quando sono scaricate da un portatore, mentre sono rivolte verso l'alto quando sono caricate su un nuovo portatore.

È importante che l'allievo riconosca le differenze fondamentali che ci sono fra il trasferitore ideale e quello reale. Riassumendo, in questo ultimo caso si hanno:

- una produzione di entropia, π_s^+ ;
- una potenza dissipata, P_{diss} ;
- una potenza scambiata trasferita al secondo portatore, P_{mecc} , minore rispetto a quella rilasciata dal primo portatore, P_{el} .

3.6.3 La potenza dissipata

La potenza P_{mecc} messa a disposizione per il portatore quantità di sostanza è data, quindi, dalla potenza P_{el} scaricata dal portatore carica elettrica *meno* il **tasso di dissipazione dell'energia** P_{diss} che è associato al tasso di produzione dell'entropia π_s^+ (in seguito notata semplicemente con π_s):

$$P_{mecc} = P_{el} - P_{diss} \quad (3.11)$$

dove tutti i valori numerici delle potenze sono indicati come positivi.

La produzione di entropia ha sempre un "costo" energetico; in un *processo dissipativo* una parte dell'energia del sistema viene "legata" all'entropia prodotta e non è quindi più disponibile per essere sfruttata per altri fini. Quantitativamente si ha:

$$P_{diss} = T \cdot \pi_s \quad (3.12)$$

dove T è la temperatura alla quale l'entropia viene prodotta.

L'eq. (3.12) è importante nell'ambito sperimentale in quanto, grazie ad essa, si nota che per determinare il tasso di produzione dell'entropia è "sufficiente" misurare la potenza dissipata e la temperatura alla quale avviene il processo.¹⁹

3.7 Entropia e calore

3.7.1 Premessa

In questo paragrafo viene proposto alla classe un approfondimento sulle modalità di *trasferimento* della grandezza entropia, sui vari processi che causano una *produzione* di entropia, e sul concetto di *calore*. Il termine calore, infatti, viene usato e abusato in tantissimi ambiti sia scientifici che non scientifici. Senza voler biasimare la *necessità comunicativa* del linguaggio comune alla quale si rifanno spesso anche i manuali e le riviste tecniche, occorre notare che anche in molti libri di testo scientifici il concetto di calore, pur definito con precisione formale all'inizio della trattazione, viene poi usato senza coerenza per descrivere fenomeni e processi diversi tra loro.

Bisogna pur dire che anche nella comunità scientifica si tollera un uso del termine calore piuttosto ampio, perché spesso i fenomeni da descrivere sono talmente complessi che a volte si riassume in poche (a rigore non corrette) parole come *produzione di calore*, *trasporto di calore*, *accumulatore di calore*,... una situazione in cui si crea la condizione per uno scambio termico, per esempio l'esito di tutta una serie di processi che possono portare al *riscaldamento* o al *raffreddamento* del sistema considerato.

¹⁹ Per ulteriori dettagli ed esempi concreti consulta M. D'Anna, Vol 1, par. 3.9.

È perciò utile che l'allievo che segue un corso di scienze sappia sempre fare “mente locale” quando si imbatte nel concetto di calore e sappia distinguere, in particolare, le proprietà e il comportamento di due fondamentali grandezze in gioco nei **processi termici**: l'energia e l'entropia.

3.7.2 Definizione di calore

In tutti i manuali scolastici, come pure nella maggior parte dei testi scientifici accademici, il termine calore è definito come “*energia che viene trasferita a causa di una differenza di temperatura*”. Anche se questa definizione si presta a interpretazioni diverse, è possibile affermare che:

- il calore è un **flusso di energia**;
- dal momento che la condizione (causa) del flusso di energia che chiamiamo calore è la presenza di un **gradiente di temperatura**, occorre fare esplicito riferimento alla legge fisica della “*conduzione del calore*” descritta dall'equazione fenomenologica di Fourier.²⁰

È possibile riformulare la definizione di calore nel modo seguente:

$$\text{“il calore è il flusso di energia associato ad un flusso conduttivo di entropia”} \quad (3.13)$$

Agli allievi viene richiamata l'equazione (3.8) in riferimento ai fenomeni termici, equazione presente anche nella tabella riassuntiva (3.2):

$$I_E = I_S T \quad (3.14)$$

Il *flusso di energia* così rappresentato, che viene chiamato **corrente di energia termica** $I_{E,term}$, è equivalente alla definizione di calore.

In generale, quando si parla di calore (simbolo Q) si fa riferimento all'energia termica che è stata trasferita in un certo intervallo di tempo (versione *integrata*):

$$Q = \Delta E \quad (3.15)$$

Con un disegno è possibile far visualizzare agli allievi la correlazione esistente fra le diverse grandezze in gioco. La Fig. (3.7) rappresenta infatti il tasso istantaneo di trasferimento dell'energia termica, che avviene alla temperatura T , associato alla corrente del portatore entropia.

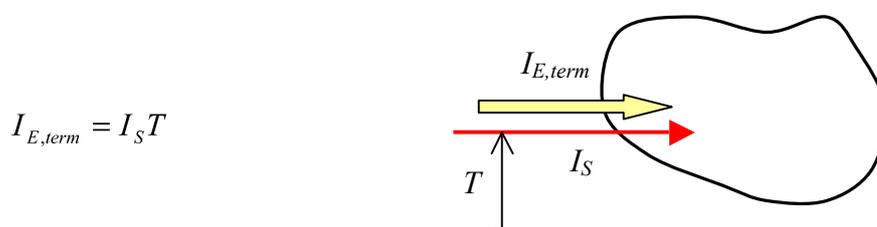


Fig. (3.7): Relazione tra flusso di energia e flusso di entropia per via conduttiva.

Riassumendo, il calore Q si riferisce all'energia termica trasferita in un certo intervallo di tempo, ΔE , mentre il tasso istantaneo dello scambio di calore (che può essere notato con \dot{Q}) corrisponde alla corrente di energia termica, $I_{E,term}$.

²⁰ Jean-Baptiste-Joseph Fourier, 1768-1830, egittologo, matematico e fisico francese.

Per il docente occorre che sia chiaro il quadro concettuale di riferimento. In un sistema chiuso, rigido e senza alcun tipo di interazione meccanica, chimica o elettromagnetica, l'unico scambio di energia possibile con l'esterno è descritto dal primo termine dell'equazione (3.4):

$$dE = TdS \equiv Q \quad (3.16)$$

dove Q rappresenta il calore, ossia la quantità di energia trasferita dal portatore entropia. In termini di variazione istantanea (o tasso istantaneo di scambio dell'energia), si può derivare nel tempo la (3.16) e ottenere la (3.14), in cui I_E è il tasso istantaneo di trasferimento dell'energia (che avviene alla temperatura T) dovuto al portatore entropia, e proprio per questo chiamata anche corrente di energia termica $I_{E,term}$.

L'equazione (3.15), infine, si può riscrivere facendo uso del calcolo integrale

$$Q = \int I_{E,term} dt \quad (3.17)$$

3.7.3 Modalità di trasferimento dell'entropia e dell'energia

Agli allievi capita, non solo in ambito scolastico, di imbattersi in alcuni concetti che riguardano il calore come, ad esempio, le tre "modalità di trasporto" che lo coinvolgono: il trasporto *conduttivo*, *convettivo* e *radiativo*.

Il calore è appena stato definito come un trasferimento di energia dovuto al flusso *conduttivo* di entropia. Già da questa definizione si capisce che non ha senso, innanzitutto, parlare di *trasporto* del calore, dal momento che esso è già un flusso di energia. Ma, oltre a questa contraddizione terminologica, la definizione di calore data in precedenza comporta anche che, a rigore, non è corretto parlare di "trasporto convettivo e radiativo" del calore, perché ciò presupporrebbe un trasporto di energia associato ad un flusso convettivo e radiativo (e non conduttivo) di entropia.

Occorre perciò approfondire con la classe in che modo può avvenire uno scambio di entropia e di energia attraverso le pareti di un sistema. Per fare ciò basta ricorrere all'aiuto di alcuni semplici schemi rappresentati in seguito nelle Fig. (3.8) e (3.9).

Un **trasporto conduttivo** indica il trasferimento di una grandezza fisica (nel nostro ambito dei *portatori di energia*) attraverso il bordo di un sistema senza che vi sia anche un trasporto di materia. Il trasferimento conduttivo è rappresentato con le solite frecce già definite in precedenza (cfr. Fig. 3.2).

Un **trasporto convettivo** è un trasporto di materia. L'energia viene quindi trasportata dal moto convettivo della materia da un luogo all'altro: si tratta di un trasporto che coinvolge, dunque, tutte le proprietà della materia stessa. La materia in movimento trasporta infatti energia, entropia, quantità di moto, massa, ecc...²¹ Nel nostro ambito, la materia in movimento può essere rappresentata dalla corrente di quantità di sostanza, rappresentate nelle Fig. (3.8) e (3.9) con delle frecce più grandi nelle quali sono state inserite delle frecce tratteggiate a indicare, ad esempio, il trasporto *convettivo* di energia ed entropia.

²¹ È importante che il docente noti come nei trasporti *convettivo* e *radiativo* non abbia senso considerare dei portatori di energia grandezze fisiche come l'entropia. Il portatore, definito a partire dall'equazione di Gibbs (3.4), è infatti riferito a quelle grandezze che sono associate ai trasferimenti di energia attraverso il bordo di un sistema, e che sono coniugate ad alcune grandezze fisiche intensive, che abbiamo chiamato potenziali, attraverso l'eq. (3.9). Tale relazione perde di significato nei trasporti convettivi e radiativi. Per un ulteriore approfondimento si veda il cap. 3.8.

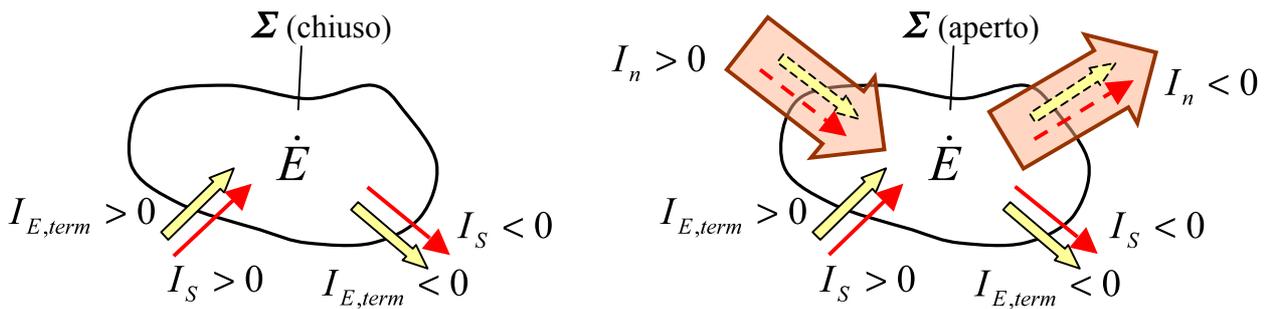


Fig. (3.8): Scambio di entropia e calore per via conduttiva e convettiva (scambio di materia).

La Fig. (3.8) mostra come in un *sistema chiuso* l'unico scambio possibile sia quello *conduttivo* (l'ambito di definizione del calore). In un *sistema aperto*, oltre agli scambi conduttivi è possibile avere anche un trasferimento *convettivo* di materia con relativo trasporto di altra entropia ed energia²².

In quest'ultimo caso, però, l'entropia e l'energia **non** sono legati dalla relazione (3.8): $I_E = I_S T$. Infatti la materia trasporta tutta l'energia e tutta l'entropia che essa contiene: il flusso di energia non può quindi essere calcolato moltiplicando la corrente di entropia (associata al flusso di materia) con la temperatura della materia! L'equazione (3.8) è valida soltanto nell'ambito di un *trasferimento conduttivo* di entropia. L'entropia non può quindi assumere il ruolo di portatore dell'energia durante il moto convettivo della materia! Perciò, non è nemmeno corretto parlare di *calore* perché il flusso di energia è accompagnato da un flusso *convettivo* (e non conduttivo) di entropia direttamente associato al flusso di materia.

Il **trasporto radiativo** viene paragonato al trasporto convettivo appena discusso, ma non ulteriormente approfondito in classe. Proprio come la materia, infatti, la luce trasporta energia, entropia, quantità di moto e altre grandezze fisiche. Anche qui vale lo stesso discorso fatto poc'anzi: non ha senso parlare di calore perché l'entropia e l'energia non sono legati dalla relazione (3.9)²³.

3.7.4 I diversi tipi di sistema.

Infine, è utile precisare in classe le diverse caratteristiche di un sistema che possono permettere le differenti modalità di trasferimento dell'energia. In un sistema aperto, come quello mostrato nella Fig. (3.9), sono possibili tutti i trasferimenti dei diversi portatori. In altre parole, l'energia interna del sistema può variare (istantaneamente) a causa della conduzione di entropia e di corrente elettrica, di una variazione del volume dovuto all'azione di forze (corrente di quantità di moto) sulle pareti del sistema, oppure al trasferimento convettivo di materia. Il sistema stesso può essere messo in moto a causa di interventi esterni e, così, acquistare quantità di moto.

Se il sistema presenta dei vincoli, non tutti i flussi sono permessi. Ad esempio è possibile considerare i casi seguenti:

Sistema chiuso:	$I_n = 0$
Pareti adiabatiche:	$I_S = 0$
Sistema rigido e fermo:	$I_p = 0$
Sistema isolato:	$I_E = 0 \Leftrightarrow I_{S,n,q,p,\dots} = 0$

²² Cfr. H.U. Fuchs, *the dynamics of heat*, pp. 304 - 305.

²³ Cfr. H.U. Fuchs, *the dynamics of heat*, pp. 307 e ss.

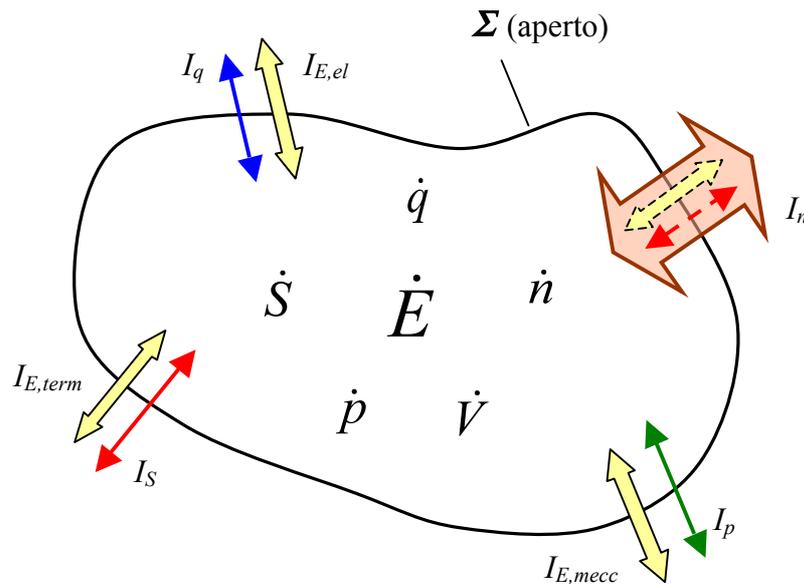


Fig (3.9): Trasferimento di energia, attraverso il bordo di un sistema aperto, per mezzo dei diversi portatori.

Esercizio: “percorso dell’entropia e del calore nel riscaldamento di casa”

Un esercizio proposto alla classe per approfondire i concetti di entropia e calore mediante un caso concreto, consiste nel provare a descrivere il **percorso dell’entropia** dal boiler (elettrico) all’aria dell’ambiente abitativo della propria casa. In particolare si chiede di completare la descrizione spiegando come introdurre correttamente il concetto di **calore** in questo contesto.

È possibile riassumere l’esito delle discussioni avute con gli allievi nel modo seguente:

- **Boiler:** la corrente elettrica causa una produzione di entropia nella resistenza presente nel boiler (effetto Joule) che, a causa della differenza di temperatura, viene poi trasferita in modo conduttivo nell’acqua attraverso la superficie di contatto del resistore. Parte dell’energia elettrica, cioè la potenza elettrica scambiata $P_{sc}^{(el)}$, fluisce assieme al portatore entropia.
- **Acqua calda:** l’acqua aumenta il suo contenuto di energia e di entropia. In questo modo aumenta anche la sua temperatura. Essa è così pronta per scorrere nelle tubature e giungere fino ai termosifoni. L’entropia e l’energia sono trasportati in modo convettivo.
- **Termosifone:** a causa della differenza di temperatura fra l’acqua nel termosifone e l’aria circostante, parte dell’entropia fluisce in modo conduttivo attraverso la parete del termosifone, trasportando con sé dell’energia²⁴. La temperatura dell’acqua tende a diminuire mentre quella dell’aria ad aumentare. L’acqua ritorna poi nel boiler per recuperare l’entropia e l’energia cedute, completando così il suo circuito nell’impianto di riscaldamento.
- **Ambiente:** l’aria presente nelle vicinanze del termosifone acquista entropia ed energia, quindi aumenta la sua temperatura e, grazie a moti convettivi, riscalda l’ambiente circostante.

²⁴ Si trascura in questo caso il trasporto radiativo dell’entropia.

La Fig. (3.10)²⁵ rappresenta il percorso dell'entropia dal riscaldatore del boiler elettrico all'acqua che poi circola nell'impianto di riscaldamento.

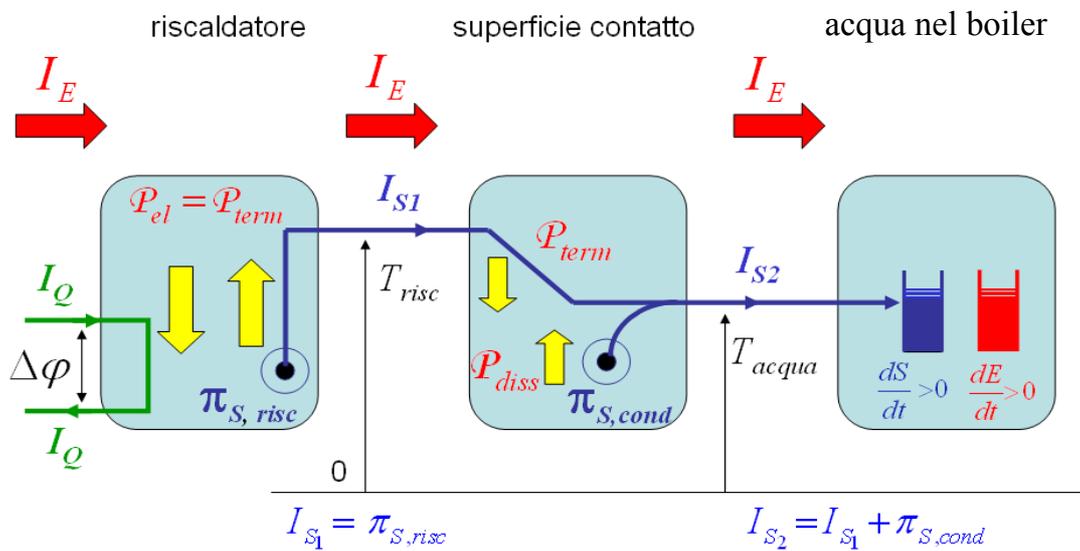


Fig (3.10): Trasferimento di entropia dal boiler all'acqua che viene poi convogliata nei termosifoni.

È utile, da questo esempio, sottolineare tre conclusioni:

- 1) l'entropia viene *prodotta* nei fenomeni dissipativi, come il passaggio della corrente elettrica in un resistore, o come durante il flusso conduttivo dell'entropia stessa attraverso la superficie di separazione tra due ambienti a diversa temperatura.²⁶
- 2) La temperatura di un corpo dipende dal proprio *contenuto* di entropia.
- 3) Formalmente, si è legittimati a parlare di calore solo in riferimento all'energia che viene trasferita assieme al flusso *conduttivo* di entropia.

3.8 Il modello spinta – corrente – resistenza

3.8.1 Quadro generale di riferimento per il docente

Perché si crea una corrente elettrica? Oppure una corrente di entropia, o di sostanza? Prima di sottolineare gli aspetti didattici essenziali, si mostrano un paio di relazioni che possono essere utili al docente che volesse meglio comprendere le motivazioni di fondo della scelta didattica di questo corso.

Si è visto come il trasporto dell'energia può essere espresso dalla (3.8), qui riassunta come segue:

$$P = y \cdot I_X \quad (3.18)$$

dove P è la potenza, I_X la corrente della grandezza estensiva e y la grandezza intensiva coniugata a X . In questo paragrafo si vuole porre l'accento sulla particolare proprietà delle *grandezze intensive* che intervengono nelle equazioni di trasporto.

²⁵ Vedi M. D'Anna, Vol. 1, cap. 3, Fig. 24.

²⁶ Cfr. M. D'Anna, Vol. 1, par. 3.5.

I **fenomeni di trasporto conduttivi** della meccanica, dell'elettrodinamica, della termodinamica e della chimica, sono descritti attraverso *leggi* fisiche costituite da *equazioni fenomenologiche* che possono essere riassunte (nel caso lineare per piccoli gradienti) nella forma generale dell'**equazione di Onsager**.²⁷

$$I_X = \sum_{k=1}^n L_{Xk} Y_k \quad (3.19)$$

La corrente I_X è generata dalle “forze generalizzate” Y_k , che rappresentano i **gradienti** delle grandezze intensive coinvolte (*gradiente* di temperatura, di potenziale elettrico, di concentrazione,...), mentre le L_{Xk} sono coefficienti fenomenologici (*conducibilità* termica, elettrica, coeff. di *diffusione*,...).

L'equazione (3.19) mostra come alla corrente di una grandezza estensiva possono essere associate diverse cause (o “spinte”): ad esempio, nei fenomeni termochimici o termoelettrici un gradiente di temperatura può indurre una corrente di sostanza e una corrente elettrica, oltre che una corrente di entropia (effetto Peltier, effetto Seebeck,...).

Un formalismo più semplice e didatticamente più utile dell'equazione (3.19) si ha considerando l'intervento di un solo gradiente per volta come causa per la corrente di una grandezza, e introducendo il concetto generale di **resistenza** invece dei coefficienti “conduttivi” L_{Xk} (dove si considera, in generale, la resistenza come l'inverso della conducibilità: $R = 1/L$). Agli allievi viene dunque presentata una relazione del tipo

$$L_X = I_X R_X \quad (3.20)$$

3.8.2 La forza delle analogie

In classe si vuole far ragionare gli allievi su quali siano le cause che possono creare una corrente. Per fare questo si può proporre il sistema idraulico dei vasi comunicanti discusso in dettaglio nel capitolo 4. Qui si riporta solamente un risultato importante:

$$\Delta p = I_{acqua} \cdot R \quad (3.21)$$

L'equazione (3.21) ci dice che una corrente d'acqua è *causata* da una *differenza* di pressione, ma dipende anche dalla *resistenza* del conduttore nel quale fluisce. La resistenza (genericamente indicata con la lettera R) dipende, in questo caso, dalla sezione del conduttore: più piccola è la sezione, maggiore diventa la resistenza al passaggio dell'acqua.

Un altro esempio concreto e spesso familiare agli allievi è il caso della corrente elettrica. La legge empirica è molto conosciuta: nel caso di resistenze *ohmiche*, si ha che

$$\Delta \varphi = I_q \cdot R \quad (3.22)$$

La corrente elettrica I_q fluisce attraverso una resistenza R , cioè un conduttore di un certo materiale. Il fatto che la corrente che fluisce attraverso il conduttore è tanto più intensa quanto maggiore è la differenza di potenziale elettrico $\Delta \varphi$ (detta anche *tensione*), viene interpretato dicendo che *la*

²⁷ Lars Onsager, 1903-1976, chimico americano di origine norvegese.

differenza di potenziale è la spinta (“forza motrice”) *che genera la corrente*. E a parità di spinta si possono ottenere correnti differenti a seconda dei diversi tipi di conduttori (cioè delle diverse resistenze) utilizzati.

Da questi due esempi si nota l'**analogia** che emerge, in particolare, confrontando le equazioni (3.21) e (3.22). Gli allievi comprendono bene come per creare una corrente bisogna tenere conto di due fattori: della *spinta* e della *resistenza* coinvolti nel fenomeno in esame.

Una prima conclusione, alla quale si giunge in classe, è quella di considerare le equazioni (3.21) e (3.22) come due aspetti di una relazione più generale, che può essere espressa nel modo seguente:

$$\textit{spinta data alla corrente del portatore} = \textit{corrente del portatore} \cdot \textit{resistenza} \quad (3.23)$$

In seguito, si vuole porre l'accento su quale sia l'*origine delle spinte* che mettono in moto le correnti. In base agli esempi proposti si giunge con gli allievi a formulare la seguente conclusione: la **spinta per la corrente** del relativo **portatore** di energia è costituita dalla **differenza di potenziale** ad esso associata.

Ad esempio, l'energia che fluisce assieme al *portatore entropia* attraverso un sistema dato deriva da una *differenza di temperatura* tra il sistema e ciò che lo circonda. La differenza di temperatura “spinge” l'entropia, e l'energia che essa trasporta, a fluire (in modo conduttivo) da un corpo a temperatura più alta ad uno a temperatura più bassa: la differenza di potenziale ΔT crea una corrente di entropia I_S .

L'esistenza di una differenza di potenziale è una condizione necessaria per la formazione di una corrente di portatore: essa però non è ancora una condizione sufficiente. Infatti bisogna fare i conti con il *mezzo attraverso il quale fluisce la corrente*, cioè con il *conduttore* tra la sorgente e il ricevitore. Due processi che dispongono della stessa spinta possono evolversi in maniera diversa a seconda dell'*intensità* della corrente prodotta. Ciò significa che la “velocità” del processo dipende non solo dalla spinta, ma anche dalla caratteristica del conduttore attraverso il quale deve fluire la corrente. Possiamo appunto riassumere queste caratteristiche con il termine *resistenza* del conduttore.

La relazione (3.23) viene esplicitata nelle sue varie espressioni nell'ultima colonna a destra della Tab. (3.3). Il simbolo R indica genericamente la resistenza nel rispettivo processo, cioè la difficoltà per la corrente di portatore a fluire attraverso il conduttore.

Tab. (3.3): I portatori di energia, i potenziali e le “spinte” alla corrente.

<i>Portatore</i>	<i>Corrente di energia</i>	<i>Potenza scambiata</i>	<i>Spinta alla corrente</i>
Carica elettrica q	$I_{E,el} = I_q \cdot \varphi$	$P_{el} = I_q \cdot \Delta\varphi$	$\Delta\varphi = I_q \cdot R$
Quantità di moto p	$I_{E,mecc} = I_p \cdot v$	$P_{mecc} = I_p \cdot \Delta v$	$\Delta v = I_p \cdot R$
Quantità di sostanza n	$I_{E,ch} = I_n \cdot \mu$	$P_{ch} = I_n \cdot \Delta\mu$	$\Delta\mu = I_n \cdot R$
Entropia S	$I_{E,term} = I_S \cdot T$	$P_{term} = I_S \cdot \Delta T$	$\Delta T = I_S \cdot R$

La resistenza R ha diversa natura e quindi diversa unità di misura a seconda del tipo di corrente che scorre attraverso il conduttore.

Uno degli obiettivi didattici è quello di discutere in classe quali parametri concorrono a caratterizzare la spinta e la resistenza alla corrente in un determinato processo. Questo tipo di esercizio aiuta a comprendere meglio le dinamiche del processo stesso, e permette di capire meglio,

ad esempio, in che modo è possibile l'instaurarsi di un regime stazionario.²⁸ Infatti, una corrente costante nel tempo presuppone che la spinta sia pure costante, ossia che la differenza di potenziale in gioco non vari durante il processo.

Per gli allievi è utile, infine, richiamare alcuni aspetti discussi precedentemente, per completezza già riassunti nella Tab. (3.3), e collegarli al modello spinta-corrente-resistenza che troverà poi ampia applicazione nei capitoli successivi. Grazie ai diagrammi di flusso (cfr. par. 3.6) si nota come l'energia trasportata da una corrente di portatore viene sempre caricata, in un trasferitore, su un'altra corrente di (diverso) portatore. L'espressione (3.11) evidenzia in particolare come la *potenza scambiata* è in stretta relazione con la *differenza di potenziale* dei portatori coinvolti. Infatti la differenza di potenziale (gradiente della grandezza intensiva) è alla base di un trasporto conduttivo dei portatori (corrente della grandezza estensiva) ma è anche responsabile del trasferimento di energia da un portatore ad un altro: la potenza scambiata P_{sc} rappresenta istante per istante la quantità di energia che, nel processo considerato, cambia di portatore.

La differenza di potenziale, dunque, non solo è la spinta alla corrente di portatore dell'energia, ma può essere la causa in determinati processi dell'instaurarsi di un'altra differenza di potenziale. Una differenza di temperatura può causare una tensione (differenza di potenziale elettrico), o il movimento di un pistone. Ma anche una tensione elettrica può servire a creare una differenza di temperatura (come nel caso delle pompe di calore presentate nel capitolo 5) o una differenza di potenziale chimico, e così via. Ecco perché si parla dei trasferitori di energia come di *sistemi accoppiati*.

Il modello spinta-corrente-resistenza, assieme ai concetti di portatore di energia e di potenziale utilizzati precedentemente negli schemi dei trasferitori di energia, vengono ripresi e utilizzati nelle applicazioni presentate nei prossimi capitoli.

3.9 Verifica delle conoscenze e competenze acquisite

Alla fine di questo capitolo agli allievi deve venir verificata l'acquisizione delle seguenti conoscenze e competenze:

- conoscere le proprietà dell'energia e dei suoi portatori, grazie all'uso dell'equazione di bilancio;
- riconoscere in alcune grandezze fisiche intensive il ruolo di potenziale del portatore;
- saper disegnare correttamente un trasferitore di energia per poter rappresentare un dato processo. Saper indicare i vari simboli e spiegarne il significato;
- nei trasferitori di energia riconoscere l'importanza della potenza scambiata e il ruolo della potenza dissipata;
- conoscere il ruolo dell'entropia nei processi termici e la differenza concettuale fra entropia e calore. Saper inoltre indicare le circostanze in cui si ha una produzione di entropia;
- riconoscere il ruolo di una differenza di potenziale e saper spiegare qualitativamente il modello spinta-corrente-resistenza;
- saper fare dei calcoli utilizzando le relazioni man mano presentate nel percorso didattico; con il corretto uso delle unità di misura.

²⁸ Vedi anche il modulo didattico "Introduzione al concetto di potenziale chimico" presentato nel cap. 4.

4. Il potenziale chimico

Questo capitolo è costituito da tre moduli didattici che possono essere affrontati anche in maniera indipendente. Nel primo modulo (cap. 4.1) il concetto di potenziale chimico viene introdotto grazie ad una serie di casi di studio che vanno dall'idraulica (vasi comunicanti) alla chimica preparativa (estrazione di una sostanza). Nel secondo modulo (cap. 4.2) vengono presentate, attraverso una serie di definizioni, le caratteristiche essenziali del potenziale chimico. Nel terzo modulo (cap. 4.3) viene esaminata la sua dipendenza dalla concentrazione, con particolare attenzione al caso dello ione idronio, ovvero $H^+(aq)$.

4.1 Introduzione al concetto di potenziale chimico

Prerequisiti

Grandezze quali densità, pressione, concentrazione e quantità di sostanza; aspetti qualitativi del processo di diffusione; concetto di equilibrio; modello spinta-corrente-resistenza (cap. 3.8), applicazione dell'equazione di bilancio in chimica (cap. 2.5).

Obiettivi

Introduzione della grandezza potenziale chimico μ e del ruolo che la **differenza di potenziale chimico** $\Delta\mu$ assume nei processi chimici attraverso l'analogia con la grandezza **pressione** vista come **potenziale idrostatico**. Approfondimento del concetto di **resistenza** e sua importanza nella relazione causa-effetto tra spinta e corrente nei processi idrodinamici e chimici.

Strategia didattica

Lo scopo di questo modulo didattico (circa sei ore-lezione) consiste nell'introduzione del concetto di potenziale chimico. Non si vuole trattare questo tema, come si usa fare spesso, attraverso lo studio delle reazioni chimiche, ma piuttosto considerando un processo che non influisca sulla grandezza quantità di sostanza, come è il caso in un processo di diffusione. Sfruttando il modello spinta-corrente-resistenza viene resa evidente l'analogia che alcune grandezze intensive (pressione, concentrazione, potenziale chimico) offrono per spiegare il raggiungimento dell'equilibrio in sistemi diversi. L'allievo deve arrivare ad identificare, in ogni situazione proposta, quelle grandezze macroscopiche che permettono di descrivere lo stato del sistema e di predirne la sua eventuale evoluzione.

Primo caso di studio: i vasi comunicanti

Situazione A

Gli allievi sono chiamati a formulare delle previsioni su di un sistema costituito da due vasi comunicanti¹. L'apparecchio può essere realizzato unendo tra loro due recipienti (bottiglie di PET adattate oppure imbuto separatori) tramite un tubo di plastica a metà del quale è stato inserito un piccolo rubinetto di vetro o un altro dispositivo che permette di chiudere il tubo di collegamento. La situazione di partenza (**stato iniziale**) consiste in due recipienti uniti dal tubo momentaneamente chiuso, riempiti ciascuno con dell'acqua (Fig. 4.1). Il sistema, costituito dai due recipienti, si trova in uno stato d'equilibrio che potrebbe essere definito "forzato" (la chiusura del tubo di collegamento corrisponde infatti alla presenza di una resistenza infinita). Dopo l'apertura del tubo di collegamento il sistema evolve verso un nuovo stato d'equilibrio, lo **stato finale**, il cui aspetto deve essere predetto dagli allievi (vedi ancora Fig. 4.1).

¹ Per semplicità si parla di **sistema** facendo riferimento all'intero apparecchio costituito dai **due vasi** comunicanti. Per interpretare i fenomeni osservati è però meglio considerare l'apparecchiatura come costituita da **due sistemi** distinti che vengono messi a contatto tra loro.

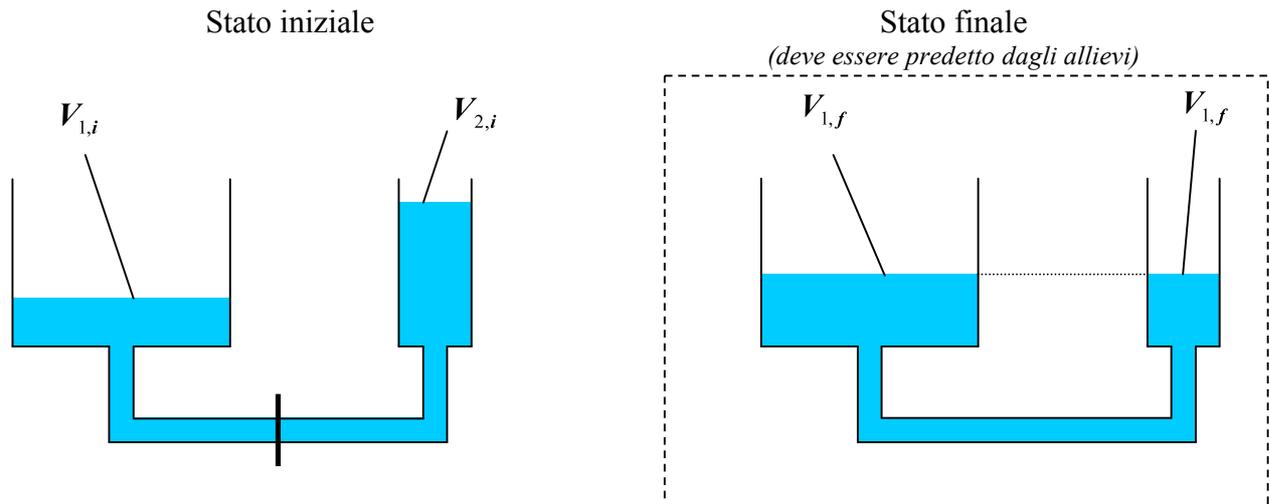


Fig. (4.1): Situazione A. Vasi comunicanti contenenti all'inizio volumi d'acqua diversi.

L'obiettivo di questo primo caso di studio (chiamato **situazione-A**) è quello di portare gli allievi a riconoscere quali siano le grandezze fisiche importanti per determinare lo stato di equilibrio; nel contempo si cerca di inquadrare il caso in un modello interpretativo che renda ragione dei fenomeni osservati. Le domande da usare per far partire la discussione in classe possono essere le seguenti:

- Perché l'acqua fluisce da un recipiente all'altro?
- Perché dopo un certo intervallo di tempo non fluisce più?
- Come varia qualitativamente il flusso d'acqua nel tempo?
- Quali grandezze caratterizzano la spinta, la corrente e la resistenza del sistema?

Per favorire una migliore focalizzazione sulle grandezze che caratterizzano lo stato d'equilibrio del sistema si può porre la **condizione iniziale** $V_{1,i} = V_{2,i}$ (confronta fig 4.1). In questo modo gli allievi si rendono facilmente conto che il **volume** d'acqua presente nei recipienti non è un parametro determinante per l'aspetto finale del sistema: infatti, come viene in genere predetto dagli schemi proposti dagli allievi stessi, e come confermato dalla verifica sperimentale proposta in classe, si osserva che $V_{1,f} \neq V_{2,f}$. A causa del **diverso volume** d'acqua presente **all'equilibrio** nei due recipienti, si conclude che il volume (o la massa d'acqua) non possa essere una grandezza utile per definire il raggiungimento dello stato di equilibrio. Risulta invece facile stabilire che lo stato d'equilibrio finale è caratterizzato da un'uguale **altezza** (o livello) dell'acqua nei due vasi comunicanti. Si ha dunque che $h_1 = h_2$, dove h è l'altezza del liquido misurata a partire dal punto più basso in cui vi è ancora del liquido (cioè alla base del tubo di collegamento).

Le considerazioni espresse sopra portano gli allievi a concludere che è una **differenza d'altezza** a produrre la **spinta** che genera una corrente da un recipiente all'altro².

$$\Delta h \rightarrow \text{spinta}$$

Se si auspica un maggior livello di approfondimento, si può chiedere agli allievi di descrivere cosa succede alle correnti durante il passaggio dallo stato iniziale allo stato finale del sistema. Molto utile

² Qualche allievo argomenta da subito usando la differenza di pressione. Naturalmente l'impostazione è corretta, ma nell'esempio proposto non è ancora necessario introdurre la pressione per prevedere lo stato d'equilibrio: a questo scopo è sufficiente considerare l'altezza, una grandezza macroscopica facilmente e direttamente osservabile.

è il confronto con una **fontana**, in cui il livello dell'acqua nella vasca rimane pure costante nel corso del tempo. È chiaro però che nel caso appena studiato dei vasi comunicanti non si instaura un regime stazionario: infatti il flusso d'acqua (o, più precisamente, la corrente) diminuisce nel tempo fino ad arrestarsi completamente (vedi anche cap. 2.4.1).

Sempre nell'ottica del modello spinta-corrente-resistenza (confronta cap. 3.8) può essere utile soffermarsi sul ruolo della resistenza. Per generare o modificare una corrente non occorre valutare solo la spinta (in questo caso una differenza d'altezza) ma è assolutamente necessario considerare anche il mezzo attraverso il quale fluisce la corrente, ovvero il tubo di collegamento. In particolare è la sezione del tubo (oltre alla viscosità del fluido) che caratterizza la difficoltà allo scorrimento dell'acqua: la sezione del tubo è dunque una componente della **resistenza** presente all'interno del processo. Per un ulteriore approfondimento, si può infine chiedere agli allievi cosa potrebbe succedere se il tubo di collegamento fosse "privo di resistenza", cioè dotato di una sezione sufficientemente grande attraverso il quale possa fluire un fluido perfetto (cioè con viscosità nulla). La risposta richiede una buona capacità di astrazione: infatti in quest'ultimo caso si instaurerebbe un **regime oscillante** nel quale l'acqua fluisce alternativamente da un recipiente all'altro con un moto periodico.

Situazione B

Gli allievi sono ora chiamati a formulare delle previsioni su di un sistema (Fig 4.2) costituito da un tubo ad U contenente acqua e mercurio³.

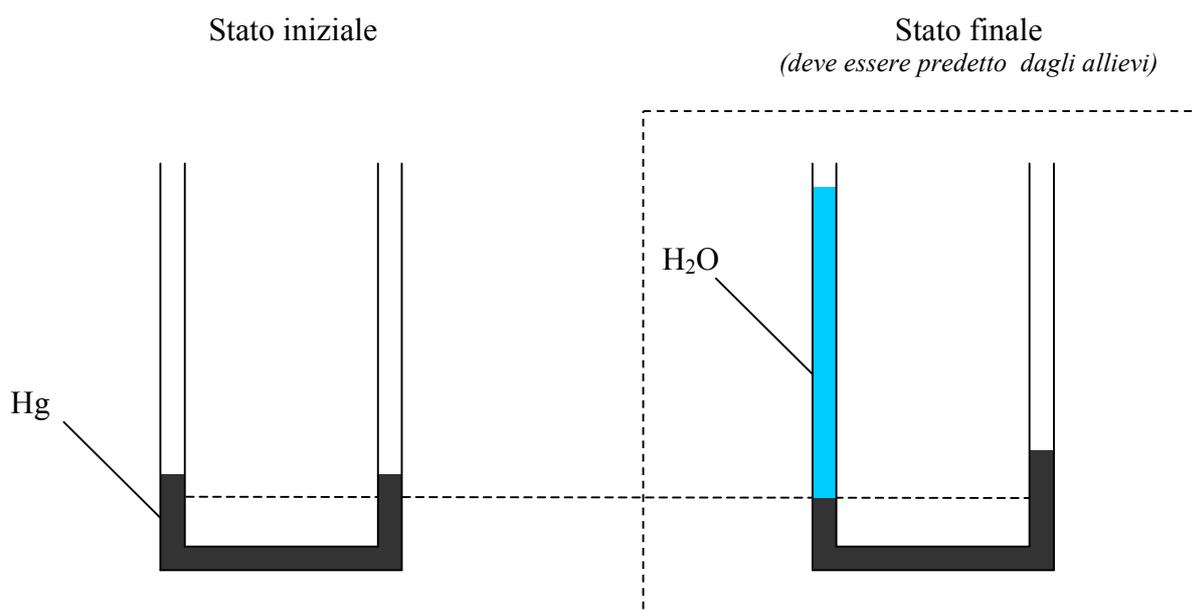


Fig. (4.2). Situazione B: tubo ad U contenente acqua e mercurio.

In questa seconda situazione il sistema è composto da un tubo di vetro a U, all'inizio riempito solo in parte con del mercurio (stato iniziale). A causa della tossicità del mercurio, ed in particolare dei suoi vapori, si raccomanda che l'esperienza venga approntata e condotta dal docente, che provvede a versare da una delle due aperture un certo quantitativo d'acqua, fino al raggiungimento di un nuovo stato d'equilibrio (stato finale). In base alle considerazioni fatte nella situazione precedente, si chiede agli allievi di descrivere questo nuovo stato d'equilibrio finale. Evidentemente non vale più la condizione "equilibrio: stesso livello dei liquidi". Per interpretare la nuova situazione gli

³ Per semplicità si parla ancora una volta di sistema riferendosi all'insieme del tubo ad U e dei liquidi in esso contenuti. Per interpretare i fenomeni osservati è però necessario considerare l'oggetto di studio come costituito da due colonne distinte rappresentate dai liquidi contenuti nei due segmenti verticali del tubo ad U.

allievi ricorrono di regola ad una nuova grandezza, la **densità**, che deve in qualche maniera rendere conto della differenze riscontrate. Grazie alla misura del livello che i liquidi hanno raggiunto nelle colonnine si riesce ad intuire che in questo caso la situazione d'equilibrio può essere descritta dall'uguaglianza fra il prodotto della densità e l'altezza dei fluidi nei due bracci del tubo ad U:

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot h_{\text{H}_2\text{O}} = \rho_{\text{Hg}} \cdot h_{\text{Hg}} \quad (4.1)$$

dove h è l'altezza del liquido misurato a partire dalla base della colonna d'acqua (vedi Fig. 4.2)

A questo punto è possibile introdurre in modo del tutto naturale la grandezza fisica che caratterizza lo stato d'equilibrio dei sistemi idraulici considerati, la **pressione (idrostatica) p** :

$$p = \rho \cdot g \cdot h \quad (4.2)$$

L'equilibrio del sistema è descritto dall'uguaglianza delle pressioni:

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = p_{\text{Hg}} \quad (4.3)$$

dove p è la pressione misurata allo stesso livello della base della colonna d'acqua⁴ (vedi linea tratteggiata nella Fig. 4.2)

Nel caso appena studiato (vedi ancora Fig. 4.2) si può notare come nella situazione di equilibrio vi è un'uguaglianza tra le masse dei liquidi delle colonnine alla base delle quali si misura la pressione. È però molto utile far notare alla classe (se possibile sperimentalmente⁵) che questa non è affatto una regola generale: basta infatti cambiare la sezione di uno dei due bracci del tubo ad U per mostrare che, di nuovo, l'equilibrio viene raggiunto solo quando vi è la stessa pressione alla base delle due colonne di liquido.

La pressione può essere definita come **potenziale idrostatico** (confronta cap. 3.8): la *differenza* di pressione è allora interpretata, in analogia ad ogni differenza di potenziale, come la spinta che *può* causare dei flussi d'acqua:

$\Delta p \rightarrow$ spinta

Secondo caso di studio: diffusione di un colorante

Gli esempi illustrati di seguito propongono dei sistemi che si trovano già all'inizio in uno stato di equilibrio idraulico. Non persistendo però ancora l'equilibrio chimico, questi sistemi sono particolarmente adatti ad investigare un nuovo tipo di processi caratterizzati dalla diffusione. Dal loro studio emerge la necessità d'introdurre un'altra grandezza fisica, la concentrazione, per prevedere l'evoluzione del sistema. La spinta, necessaria affinché il processo possa avvenire, è identificata nell'iniziale differenza di concentrazione del colorante. Questo passaggio intermedio

⁴ Il sistema di riferimento presentato è quello più semplice: alternativamente si può considerare la pressione alla base del tubo ad U, pressione determinata dall'intera colonna costituita dall'acqua e dal mercurio sottostante.

⁵ Si può collegare tramite un piccolo tubo di raccordo in plastica l'estremità contenente l'acqua del tubo a U con due tubi di sezioni diversa (ad esempio una siringa, rispettivamente una bottiglia in PET tagliata). Aggiungendo acqua si nota che il livello del mercurio nell'altro braccio non dipende direttamente dalla massa dell'acqua aggiunta, bensì dal livello che l'acqua ha raggiunto nella nuova colonnina, e dunque dalla pressione che si è venuta a creare alla sua base.

verso il potenziale chimico è da associare per analogia alla differenza di altezza vista nelle situazioni idrauliche precedenti.

DESCRIZIONE DELL'ESPERIMENTO

Lo stato iniziale consiste in un sistema all'equilibrio idraulico⁶, formato da due recipienti uniti da un tubo momentaneamente chiuso (Fig 4.3). Nel primo recipiente troviamo acqua e nel secondo una soluzione acquosa di un colorante (ad esempio blu di metilene). La soluzione è diluita a tal punto da non avere una densità significativamente diversa da quella dell'acqua. Lo stato d'equilibrio idraulico esclude la differenza di pressione come spinta al processo di diffusione.

Prima di procedere con l'esperimento, è possibile richiedere agli studenti di prevedere e rappresentare ciò che essi si aspettano succeda una volta aperto il rubinetto. Questa attività permette al docente di verificare la comprensione dei concetti appresi con l'attività precedente e di avere buoni spunti per la discussione che seguirà all'esperienza.

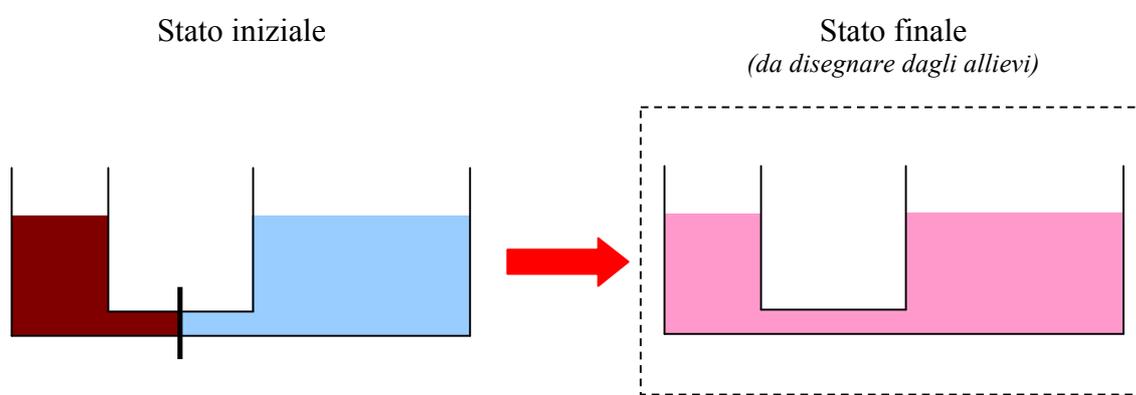


Fig. (4.3): Diffusione di un colorante in soluzione acquosa.

Dopo l'apertura del tubo, il sistema evolve verso uno stato finale di equilibrio. Il fatto che i fattori che determinano lo stato di equilibrio idraulico non possano spiegare il fenomeno della diffusione spinge gli allievi a chiedersi quali grandezze debbano essere prese in considerazione in questo caso. La presenza del colorante permette di individuare nella concentrazione una grandezza che muta durante il processo. La differenza tra concentrazione iniziale e finale del colorante evidenziano l'analogia tra questa grandezza e l'altezza nel caso dei vasi comunicanti studiato in precedenza. Una differenza di concentrazione genera dunque una spinta, mentre l'assenza della differenza di concentrazione rispecchia un'assenza di spinta e quindi una situazione di equilibrio. In questa fase dell'analisi dell'esperienza non è necessario porre particolare attenzione al problema della resistenza. Le domande chiave per favorire la discussione in classe al termine della verifica sperimentale possono essere le seguenti:

- Cosa succede aprendo il rubinetto?
- Perché il colorante fluisce da un recipiente all'altro?
- Perché ad un certo punto non fluisce più?
- Quale condizione deve valere all'equilibrio?
- Esiste un'analogia con una delle due situazioni viste nel modulo precedente?

⁶ Anche in questo caso per semplicità si parla di **sistema** facendo riferimento all'insieme dei due recipienti collegati. Per interpretare i fenomeni osservati è però necessario considerare l'apparecchiatura come costituita da **due sistemi** distinti che vengono messi a contatto tra loro.

Come spunto per un'ulteriore discussione è possibile proporre un sistema costituito da due liquidi miscibili tra loro, ma caratterizzati da densità nettamente diverse: in questo modo all'inizio non si ha né uno stato d'equilibrio idrostatico, né uno stato d'equilibrio chimico.

La variante descritta di seguito permette invece di consolidare il concetto di differenza di concentrazione come spinta per la diffusione ed escludere forze di tipo gravitazionale in questo fenomeno. Due beute di volume diverso, una contenente acqua pura e l'altra la soluzione acquosa di colorante, sono disposte una sull'altra, con l'interfaccia costituita da un sottile foglio di carta, che viene poi tolto permettendo così il contatto tra i due liquidi (Fig. 4.4).

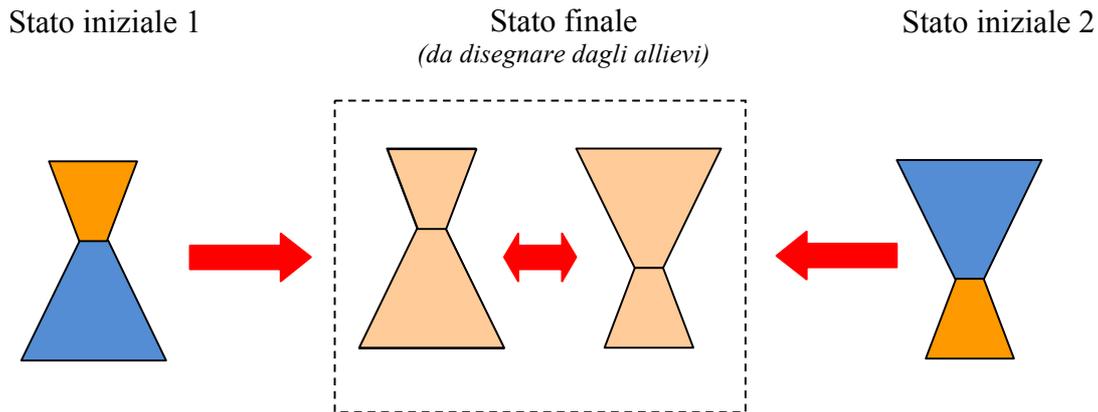


Fig. (4.4): Diffusione di un colorante tra due beute di differenti dimensioni.

La completa diffusione del colorante richiede parecchio tempo: è dunque necessario che il docente prepari e faccia partire diverse ore prima della lezione l'esperienza che verrà poi ripetuta in classe in modo da mostrare il processo all'inizio ed in una fase avanzata. Si noti come la situazione finale sia la stessa indipendentemente dalla disposizione iniziale dei liquidi contenuti nelle beute.

Analogamente a quanto fatto in precedenza, le domande per favorire la discussione possono essere:

- Come apparirà il sistema all'equilibrio?
- Perché il colorante fluisce da un recipiente all'altro?
- Perché ad un certo punto non fluisce più?
- Quale condizione deve valere all'equilibrio?

Riassumendo, le esperienze sulla diffusione dei coloranti suggeriscono che la *differenza* di concentrazione può essere interpretata come la spinta che causa il processo di diffusione:

$$\Delta c \rightarrow \text{spinta}$$

In realtà questa spiegazione non è sempre valida. Si confronti il percorso effettuato analizzando i sistemi idraulici: si è arrivati a capire che la spinta è in generale dovuta ad una **differenza di pressione Δp** e non è dovuta ad una semplice differenza di altezza Δh . Analogamente, nei sistemi in cui si osserva la diffusione di sostanze, la spinta non è dovuta semplicemente ad una differenza di concentrazione Δc , ma ad una **differenza di potenziale chimico $\Delta \mu$** , una grandezza che viene introdotta con il prossimo caso di studio:

$$\Delta \mu \rightarrow \text{spinta}$$

Terzo caso di studio: estrazione dello iodio da una soluzione acquosa

Come terzo passo verso il concetto di potenziale chimico viene impiegata una strategia basata su di un approccio **problem-solving** che permette agli allievi di interpretare grazie al modello spinta-corrente-resistenza ed alle analogie con i casi visti in precedenza quanto avviene durante una comune procedura di laboratorio (l'estrazione di una soluzione acquosa con un solvente organico).

CONSIDERAZIONI PRELIMINARI

Le esperienze dimostrative sono state ideate tenendo conto della facile reperibilità in un comune laboratorio scolastico delle sostanze impiegate, che si caratterizzano inoltre per una limitata tossicità. La concentrazione dello iodio nella soluzione acquosa (circa 1 mmol/L) garantisce una buona visibilità dell'esperienza. Una problematica legata all'uso dello iodio risiede nel fatto che il colore della soluzione iodurata varia non solo a dipendenza della concentrazione del soluto, ma anche a seconda della natura del solvente: si ha una colorazione giallo-bruna per le soluzioni acquose o alcoliche, ed una lilla-violetto per quelle preparate in solventi apolari come l'esano o il diclorometano. Prima di iniziare con l'esperienza vera e propria è dunque utile mostrare agli allievi il colore delle soluzioni facendo sciogliere un piccolo cristallino di iodio nei due tipi di solventi. L'uso di un solvente clorurato accanto ad uno comune è giustificato dalla necessità di impiegare una sostanza con una densità superiore a quella della soluzione acquosa: si è optato per il diclorometano (CH_2Cl_2), la cui tossicità è molto inferiore a quella di altri solventi clorurati come il cloroformio (CHCl_3).

CONSIDERAZIONI METODOLOGICHE

Gli allievi sono confrontati con una situazione-problema che, se da un lato è concettualmente piuttosto impegnativa, dall'altro offre ampio spunto per ulteriori riflessioni ed approfondimenti. Lo scopo primario dell'attività è quello di mostrare che, al contrario di quanto ci si potrebbe aspettare nell'ambito di un semplice processo di diffusione, il soluto non si ripartisce affatto uniformemente tra i due solventi impiegati. Allo stesso modo in cui nel **sistema idraulico all'equilibrio** studiato in precedenza le colonnine di acqua e di mercurio **non** raggiungono la **stessa altezza h** , così la **concentrazione c** del soluto all'equilibrio **non** presenta lo stesso valore nei due solventi. Da qui segue facilmente la necessità di introdurre per analogia un'altra grandezza fisica che giustifichi la spinta iniziale del sistema, rispettivamente il raggiungimento di uno stato di equilibrio caratterizzato da un gradiente di concentrazione. Per analogia con la pressione, già presentata come potenziale idraulico p , a questa nuova grandezza potrà essere assegnato il nome di **potenziale chimico della sostanza A** , ovvero μ_A .

SVOLGIMENTO

In parallelo alla situazione sperimentale agli studenti viene distribuita una scheda dal titolo "Estrazione dello iodio da una soluzione acquosa" articolata nelle due situazioni seguenti:

Imbuto separatore Nr.1 :

Il solvente organico **esano** (C_6H_{14} , $\rho = 660 \text{ kg/m}^3$) viene aggiunto ad una soluzione acquosa di iodio ($c = 1 \text{ mmol/L}$)

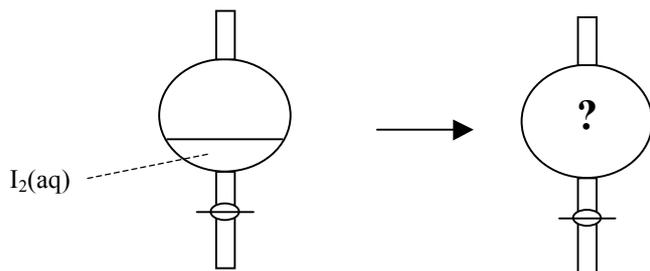


Fig. (4.5): Estrazione di una soluzione acquosa di iodio con esano.

Imbuto separatore Nr.2 :

Il solvente organico **diclorometano** ($C_2H_2Cl_2$, $\rho = 1326 \text{ kg/m}^3$) viene aggiunto ad una soluzione acquosa di iodio ($c = 1 \text{ mmol/L}$)

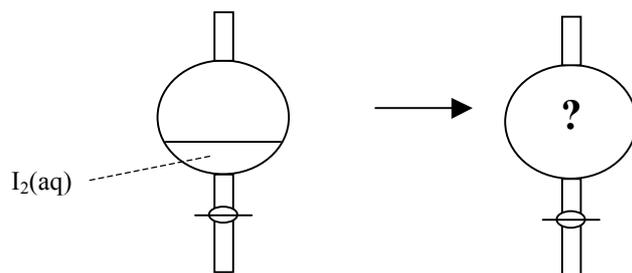


Fig. (4.6): Estrazione di una soluzione acquosa di iodio con diclorometano.

Prima di effettuare l'esperienza si chiede agli allievi di predire cosa potrebbe succedere dopo l'aggiunta del solvente; in seguito, gli allievi sono chiamati a confrontare le proprie previsioni con quanto effettivamente osservato. Sulla scheda possono essere proposte domande del tipo:

- Cosa succede se il solvente viene aggiunto **molto piano**?
- Cosa succede quando gli imbuti separatori vengono **agitati energicamente**?
- Che aspetto potrebbero avere gli imbuti separatori **dopo un certo lasso di tempo**?

Dopo questa prima fase si chiede agli allievi di individuare una ragionevole interpretazione a quanto osservato. Sulla scheda possono essere proposte domande del tipo:

- È possibile un'interpretazione basata sul modello **spinta - corrente - resistenza**?
- Il **potenziale dello iodio dissolto** in acqua e nei due solventi rimane lo stesso durante la procedura di estrazione?
- Qual è la condizione affinché le due fasi risultino in **equilibrio**?

DISCUSSIONE DELL'ESPERIENZA

Le modalità di attuazione di questa parte possono seguire diverse strade, come ad esempio il diretto confronto in discussione plenaria delle proposte degli allievi. Di seguito si propongono unicamente le tracce di risoluzione dei quesiti visti prima:

- **Cosa succede se il solvente viene aggiunto molto piano?**

A dispetto della differenza tra i potenziali chimici $I_2(aq)$ and $I_2(sol)$, lo iodio tende a rimanere nella soluzione acquosa. Dato che la superficie di contatto è molto piccola, la **resistenza** è molto alta: dunque anche l'intensità della **corrente chimica** (dello iodio verso la fase organica) è estremamente ridotta. La fase organica si colora solo in maniera molto limitata.

- **Cosa succede quando gli imbuti separatori vengono agitati energicamente?**

La superficie di contatto è ora molto estesa: l'intensità della corrente chimica è grande. La fase organica si colora chiaramente perché lo iodio è in grado di lasciare la fase acquosa e di accumularsi nel solvente organico.

- **Che aspetto avranno gli imbuti separatori dopo un certo lasso di tempo?**

Venendo a mancare la spinta, all'equilibrio l'intensità della corrente chimica **netta** è zero. I potenziali chimici di $I_2(aq)$ e di $I_2(sol)$ hanno raggiunto lo stesso valore. Si noti che all'equilibrio la differenza tra i potenziali chimici è nulla ($\Delta\mu = 0$) anche se la concentrazione dello iodio **non** è la stessa nella fase organica ed in quella acquosa.

CONCLUSIONI

Le modalità di conclusione del modulo possono essere molto diverse. Qui si propone di compilare assieme agli allievi una **tabella sinottica** (tab 4.1) che metta in risalto l'analogia tra la situazione chimica e quella idraulica. In particolare, **l'esplicitazione delle unità di misura** delle diverse grandezze fisiche in gioco offre l'opportunità di rivedere ed approfondire aspetti visti in precedenza, ed in particolare di chiarire l'analogia che sussiste a livello di portatore e di intensità della corrente.

Tab. (4.1): Confronto tra vasi comunicanti ed estrazione.

	Situazione “idraulica” <i>VASI comunicanti</i>	Situazione “chimica” <i>FASI comunicanti</i>
Potenziale	<i>Potenziale idraulico: p (pressione)</i> [pascal = $\text{N} \cdot \text{m}^{-2} = \text{J} \cdot \text{m}^{-3}$]	<i>Potenziale chimico: μ</i> [gibbs = $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$]
Spinta	<i>Differenza di pressione</i> Δp	<i>Differenza di potenziale chimico</i> $\Delta \mu$
Corrente	<i>Corrente di volume</i> I_v [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	<i>Corrente di quantità chimica</i> I_n [$\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$]
La resistenza dipende da	<i>La sezione dei tubi</i>	<i>La superficie di contatto</i>

APPROFONDIMENTI

Il ruolo della **resistenza** può essere meglio compreso discutendo in classe ulteriori situazioni come quelle elencate nella tabella sottostante:

Tab. (4.2): confronto tra spinta, corrente e resistenza in diverse situazioni.

	Spinta	Corrente	Resistenza
Bere con cannuce di diverso diametro	Δp	I_v	La resistenza dipende dalla sezione della cannuccia
Fusibili da 1A e da 6A usati per gli elettrodomestici	$\Delta \phi$ [V = J/C]	I_E [A = C/s]	La resistenza dipende dalla sezione del filamento. Il fusibile da 1A ha una sezione più piccola di quello da 6A: il primo fonderà (interrompendo l'eccessivo afflusso di corrente all'apparecchio) quando $I_E > 1A$
Reazioni chimiche nella marmitta catalitica di un autoveicolo	$\Delta \mu$ [G = J/mol]	I_n [mol/s]	Il metallo del catalizzatore ha una forma a “nido di vespa”: la grande superficie permette di ridurre la resistenza (e dunque di accelerare) i processi chimici che degradano le sostanze nocive (CO, NO, ecc) provenienti dal motore

4.2 Proprietà del potenziale chimico

Prerequisiti

Concetto qualitativo di potenziale chimico (cap. 4.1); definizioni di quantità di sostanza (= quantità chimica) e di concentrazione; calcolo con i logaritmi

Obiettivi

Conoscere le caratteristiche essenziali del potenziale chimico μ : unità di misura, condizioni standard, caso particolare delle sostanze semplici, concentrazione standard.

Strategia didattica

Lo scopo di questo modulo (due ore-lezione) consiste nel presentare i punti essenziali che permettono di operare in maniera *quantitativa* con il potenziale chimico. Il modulo può essere inserito anche dopo un'introduzione alternativa al concetto di potenziale chimico che parte dallo studio delle reazioni chimiche. Particolare attenzione deve essere dedicata alla definizione delle condizioni standard ed al corretto uso delle notazioni.

Contenuti

Nel sistema internazionale per il potenziale chimico non è stata definita un'unità di misura con un nome particolare: esso viene infatti espresso semplicemente in **J/mol** (oppure in **kJ/mol**). In alcune pubblicazioni viene usato il termine **gibbs: 1G = 1 J/mol**. L'adozione di un nome proprio per l'unità di misura del potenziale chimico è didatticamente giustificato, in quanto permette agli allievi di meglio cogliere le analogie con altri potenziali (vedi anche tab. 4.1), alle cui unità di misura è stato invece assegnato un nome, come ad esempio pascal per la pressione (= potenziale idrostatico), kelvin per la temperatura (= potenziale termico), volt per il potenziale elettrico.

Il potenziale chimico μ è una grandezza che dipende dalla sostanza: ogni sostanza semplice (impropriamente chiamata "elemento") nella forma allotropica più stabile alle **condizioni standard** ($p = 1 \text{ atm}$, $T = 298 \text{ K} = 25 \text{ °C}$) possiede **un potenziale chimico standard uguale a zero**.

Esempi: $\mu_{\text{Fe(s)}}^0 = 0 \text{ kG}$ $\mu_{\text{Hg(l)}}^0 = 0 \text{ kG}$ $\mu_{\text{H}_2\text{(g)}}^0 = 0 \text{ kG}$

Tutte gli altri composti chimici hanno in condizioni standard un proprio potenziale chimico che, in generale, è differente da zero. Da notare che si possono avere sia valori negativi che positivi:

Esempi: $\mu_{\text{NaCl(s)}}^0 = -384 \text{ kG}$ $\mu_{\text{PH}_3\text{(g)}}^0 = +13 \text{ kG}$

Per le sostanze in soluzione è stata definita una **concentrazione standard** $c^0 = 1 \text{ mol/L}$. Un caso particolare molto importante è costituito dal potenziale chimico standard dello ione H^+ in soluzione acquosa. Alla concentrazione standard $c^0 = 1 \text{ mol/L}$ il potenziale chimico di H^+ è uguale a zero:

$$\mu_{\text{NaOH(aq)}}^0 = -384 \text{ kG} \qquad \mu_{\text{PH}_3\text{(g)}}^0 = +13 \text{ kG} \qquad (4.4)$$

Per altre sostanze (anche ioniche) in soluzione il potenziale chimico standard (dunque sempre alla concentrazione 1 mol/L) è in genere diverso da zero.

Esempi: $\mu_{\text{NaOH(aq)}}^0 = -417 \text{ kG}$ $\mu_{\text{Na}^+\text{(aq)}}^0 = -262 \text{ kG}$

È utile ricordare che le condizioni standard in termodinamica ($p = 1 \text{ atm}$, $T = 298 \text{ K} = 25 \text{ °C}$) sono diverse da quelle usate per i gas (STP: $p = 1 \text{ atm}$, $T = 273 \text{ K} = 0 \text{ °C}$)

Tabelle dei potenziali chimici

Nella maggior parte dei testi di chimica al posto del termine “potenziale chimico” si trova di regola il termine “**Energia libera standard di formazione**”, abbreviata ΔG^0_f , espressa in kJ/mol. Si noti un’ incongruenza che caratterizza l’uso di questo termine tradizionale: infatti l’unità di misura della grandezza energia dovrebbe essere semplicemente kJ, e non kJ/mol. Talvolta si trova il termine di “**Energia libera molare parziale**”, sempre in kJ/mol: in questo caso grazie all’uso del termine “molare” appare chiaro il riferimento alla quantità di sostanza. In generale è utile ricordare **che ΔG** è una grandezza estensiva **numericamente** uguale alla grandezza intensiva $\Delta\mu$ quando la prima è riferita alla trasformazione di una mole di sostanza.

Approfondimenti

Il potenziale chimico di una certa sostanza dipende da tutta una serie di fattori: esso varia con la **temperatura**, la **pressione**, la **concentrazione**. A causa dei limiti di tempi imposti al corso si è scelto di non trattare i primi due aspetti. Avendone la possibilità, lo studio della dipendenza del potenziale chimico dalla temperatura potrebbe essere utilmente inserito proprio al termine di questo modulo (si veda cap. 1 e cap. 4).

4.3 Dipendenza del potenziale chimico dalla concentrazione

Prerequisiti

Relazioni *quantitative* del potenziale chimico (cap. 4.2). Calcolo con i logaritmi.

Obiettivi

Saper valutare qualitativamente e quantitativamente la dipendenza del potenziale chimico di una sostanza in base alla sua diluizione. Spiegare la relazione esistente tra pH ed μ_{H^+}

Strategia didattica

Lo scopo di questo modulo (quattro ore-lezione) consiste nel presentare in modo conciso ma accurato la dipendenza del potenziale chimico dalla concentrazione con particolare riferimento al caso dello ione H^+ . Per trattare questo modulo è sufficiente un’introduzione quantitativa essenziale del potenziale chimico. Particolare attenzione deve essere dedicata al corretto uso delle notazioni e delle unità di misura: al termine del modulo vengono proposti agli allievi degli esercizi che tengono conto anche di questo aspetto (vedi allegati digitali).

Punti essenziali e commenti

Per soluzioni diluite ($c_A < 0,1$ mol/L) vale con sufficiente approssimazione la formula seguente:

$$\mu_A \approx \mu^0_A + k \cdot \log (c_A / c^0_A) = \mu^0_A + k \cdot \log [A] \quad (4.5)$$

c_A è la concentrazione della sostanza A in mol/L

c^0_A è la concentrazione standard (= 1 mol/L)

$[A] = c_A / c^0_A$ è la concentrazione **relativa** di A (rispetto allo standard di 1 mol/L)

$k = \ln 10 \cdot R \cdot T$, dove R è la costante dei gas perfetti e T la temperatura in kelvin⁷

Alla temperatura standard ($T = 298$ K = 25 °C): si ha $k \approx 5,7$ kG = 5,7 kJ/mol

⁷ La costante k dell’equazione (4.5) viene spesso indicata nei testi di riferimento con il simbolo μ_D (vedi cap.4.3 del Volume 1). In questo corso però si è preferito evitare di usare una notazione che potrebbe creare qualche difficoltà agli allievi (infatti μ_D è in realtà un fattore di conversione e non una caratteristica tipica della sostanza A come lo è μ^0_A).

Tra le varie notazioni in uso nella letteratura specializzata per esprimere la relazione esistente tra il potenziale chimico e la concentrazione si è optato per una variante che coniughi la correttezza con la massima semplicità d'uso. L'esperienza didattica maturata con diverse classi ha dimostrato che anche gli allievi più dotati per gli aspetti matematici si trovano in notevole difficoltà davanti a delle notazioni che non siano le più chiare e coerenti possibili. Si è dunque optato per introdurre nella formula precedente (4.5) la costante k per riassumere l'espressione $\ln 10 RT$ (vedi nota 7). Come nei testi più rigorosi, si è usato il simbolo $[A]$ per indicare una concentrazione molare relativa, che è, in effetti, una grandezza adimensionale. Si noti che in molti libri di testo il simbolo $[A]$ viene usato in modo inappropriato, perché, a seconda delle circostanze, esso viene usato sia con il significato di concentrazione molare relativa o assoluta, una grandezza che invece ha l'unità di misura (mol/L) e che qui (e altrove) viene rappresentata con il simbolo c .

Il caso particolare di H^+ in soluzione acquosa

Come nel modulo precedente, per semplificare la notazione si è preferito usare $H^+(aq)$ al posto di H_3O^+ . Per lo ione $H^+(aq)$ in condizioni standard (1 atm, 25 °C, 1 mol/L) vale per definizione:

$$\mu_{H^+}^0 = 0 \text{ kG} \quad (4.6)$$

È importante far notare agli allievi che il valore di $\mu_{H^+}^0(aq)$ uguale a zero è il frutto di una definizione e non di un dato ricavato sperimentalmente. Sfruttando questa particolarità dello ione H^+ si ottiene l'equazione seguente (che, come quella vista nel paragrafo precedente, è valida con sufficiente approssimazione solo per soluzioni diluite, ovvero quando $c_{H^+} < 0,1$ mol/L):

$$\mu_{H^+}^0 \approx k \cdot \log [H^+] \approx 5,7 \text{ kG} \cdot \log [H^+] \quad (4.7)$$

A questo punto è utile richiamare o introdurre la definizione di pH, che comunemente viene definito semplicemente nel modo seguente:

$$\text{pH} = -\log [H^+] \quad (4.8)$$

È utile accennare agli allievi che questa definizione di pH (riportata in molti libri di testo senza ulteriori precisazioni) è in realtà valida con sufficiente approssimazione solo per soluzioni diluite ($c_{H^+} < 0,1$ mol/L). La precisa definizione di pH è in effetti la seguente:

$$\text{pH} = -\log a_{H^+} = -\log \gamma_{H^+} \cdot [H^+] \quad (4.9)$$

dove a_{H^+} è l'attività di H^+ , mentre γ_{H^+} è il cosiddetto coefficiente di attività di H^+ . Da notare che γ_{H^+} può essere stimato per via sperimentale: esso dipende dalla concentrazione di H^+ . Per soluzioni sufficientemente diluite si ha $\gamma_{H^+} \approx 1$, da cui segue la classica definizione di pH.

A conclusione del modulo si può costruire con gli allievi una tabella simile alla seguente (Tab 4.3):

Tab. (4.3): Confronto tra concentrazione, pH e potenziale chimico di H^+ .

c_{H^+} [mol/L]	10^1	$10^0 = 1$	$10^{-1} = 0,1$	$10^{-2} = 0,01$	$10^{-3} = 0,001$
pH	≈ -1	≈ 0	1	2	3
μ_{H^+} [kG=kJ/mol]	$\approx + 5,7$	0 (per def. di $\mu_{H^+}^0$)	- 5,7	- 11,4	- 17,1

Dalla tabella emerge chiaramente che sia il potenziale chimico che il pH variano con il logaritmo della concentrazione di H^+ . In effetti il pH è direttamente correlato al potenziale chimico dello ione H^+ in soluzione acquosa. A questo proposito può essere molto utile rendere ancora una volta attenti gli allievi alla natura logaritmica del pH. L'acidità del succo gastrico può variare, nel corso della giornata da pH 1 a pH 3. A questo corrisponde, come appare chiaramente dalla tabella, una variazione di un fattore 100 nella concentrazione di ioni H^+ .

Per ulteriori approfondimenti si veda il modulo 6.3 che è interamente dedicato all'applicazione del potenziale chimico all'equilibrio acido – base.

4.4 Verifiche delle conoscenze e competenze acquisite

Alla fine di questo capitolo agli allievi deve venir verificata l'acquisizione delle seguenti conoscenze e competenze:

- saper applicare il modello spinta-corrente-resistenza a situazioni idrauliche e chimiche;
- saper identificare la differenza di pressione come spinta per i processi idraulici;
- saper identificare la differenza di potenziale chimico come spinta per processi in cui varia la quantità di sostanza o la sua concentrazione;
- saper effettuare previsioni sullo stato finale di sistemi idraulici (tubi ad U) e chimici (estrazione di una soluzione acquosa con un solvente);
- conoscere la definizione di pH ed la relazione con il potenziale chimico di $H^+(aq)$;
- saper effettuare calcoli sulla dipendenza del potenziale chimico dalla concentrazione;
- saper calcolare il potenziale chimico ed il pH di soluzioni diluite di acidi forti.

Una selezione delle verifiche scritte effettuate nelle varie classi (comprendenti anche argomenti trattati in altre parti del corso) è presente negli allegati digitali.

5. Macchine termiche: pompe di calore e motori termici

In questo capitolo vengono presentati due esempi particolari di *trasferitori di energia*, importanti per il contributo che offrono alla nostra società: le *pompe di calore* e i *motori termici*. Senza entrare in dettagli storici e omettendo un confronto diretto con le modalità “classiche” con le quali l’argomento viene trattato nei libri scolastici¹, queste **macchine termiche** vengono presentate, attraverso un percorso didattico, grazie ai concetti e agli strumenti acquisiti nei capitoli precedenti.

Prerequisiti

Capitoli 2 e 3. Non sono necessarie, in questo contesto, particolari conoscenze sulle trasformazioni e i cicli termodinamici, nonché sulla tecnologia applicata in questo campo.

Obiettivi

Lo scopo principale di questo modulo didattico è presentare un *modello* per descrivere i flussi coinvolti nelle macchine termiche attraverso l’uso di “schemi” dei trasferitori di energia (*diagrammi di processo*) appropriati. Vengono inoltre definiti i concetti di *rendimento* e di *efficienza*.

Strategia didattica

Il presente modulo ha una durata di circa 8 ore, a dipendenza del grado di esercitazione che si intende sviluppare. Una volta richiamati i compiti che devono svolgere le pompe di calore e i motori termici, si procede alla costruzione graduale dei diagrammi di processo, eseguita e discussa assieme agli allievi. In seguito si procede a definire e a calcolare il rendimento e l’efficienza di alcuni casi concreti. Infine viene dato spazio ad esercizi e problemi, ripresi anche dai libri di testo scolastici e adattati (specie nella terminologia) ai nostri scopi.

5.1 Pompe di calore

Lo strumento principale utilizzato per poter studiare il principio di funzionamento delle macchine termiche è quello di rappresentare tali trasferitori di energia mediante i diagrammi di processo. Quindi è utile in classe riprendere il modello analizzato nel capitolo 3 per poterlo utilizzare in questa sede.

Si può riprendere questo discorso sottolineando agli allievi, in particolare, un aspetto: in natura non ci sono solo processi *spontanei* in cui viene raggiunta una situazione di equilibrio, come ad esempio due corpi a diversa temperatura che, messi a contatto, raggiungono l’equilibrio termico. Esistono anche processi naturali (ad esempio negli esseri viventi, ambito di studio che verrà loro presentato in seguito e presente in questo corso nel capitolo 7, par. 7.2) e dispositivi artificiali (come quelli analizzati nel cap. 3) che riescono a generare processi il cui risultato è la *comparsa* e il *mantenimento* di una differenza di potenziale.

I *motori termici*, come spiegato compiutamente nel paragrafo (5.2), sfruttano una differenza di temperatura e il conseguente flusso di entropia per poter caricare di energia un portatore meccanico (solitamente il momento angolare, attraverso un asse rotante).

Il fatto che l’entropia scorra spontaneamente dai corpi a temperatura più alta ai corpi a temperatura più bassa, non significa però che non possa fluire in direzione opposta. In questo paragrafo, infatti, si vuole studiare un particolare meccanismo che possa agire “al contrario” di un motore termico: si vuole mantenere una differenza di temperatura con un flusso di entropia che parte dall’ambiente a

¹ Ma a tal proposito si veda Vol. 1, Cap. 3, par. 3.7 e 3.8, come pure M. D’Anna, U. Kocher, P. Lubini, S. Sciarini, *L’equazione di bilancio dell’energia e dell’entropia*, ASP Locarno, 2005.

temperatura bassa e arriva in quello a temperatura più alta! Un dispositivo capace di trasferire determinate quantità da punti a potenziale basso a punti a potenziale più elevato può essere chiamato **pompa**.

5.1.1 Riscaldamento e macchina frigorigena

Nel nostro caso ci serve una *pompa per l'entropia*. Il nome adottato nella società per un apparecchio del genere è quello di **pompa di calore**, e tale dispositivo viene presentato dal docente e discusso in classe grazie allo schema rappresentato nella Fig. (5.1).

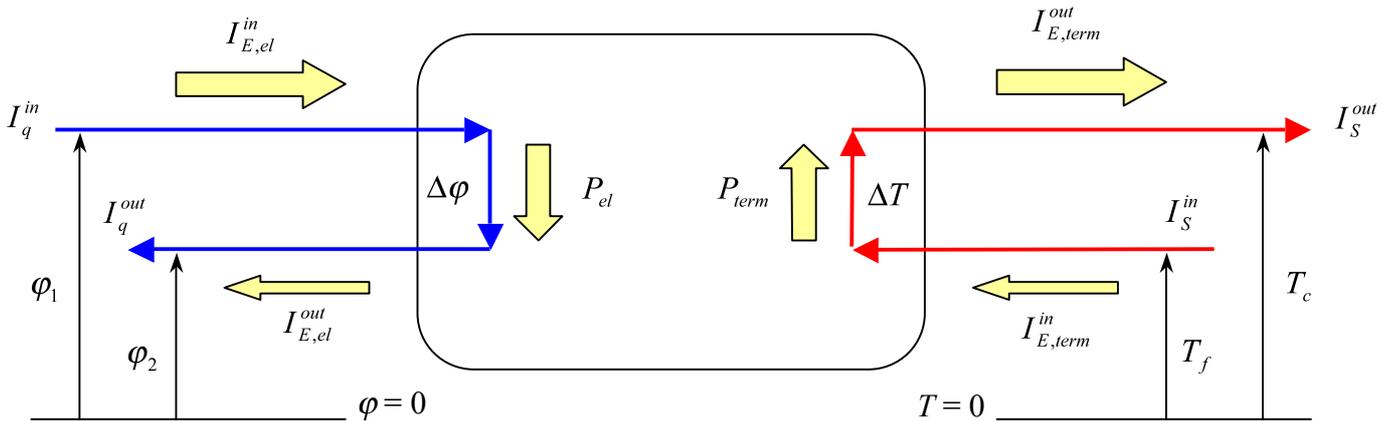


Fig. (5.1): Diagramma di processo della pompa di calore ideale.

Agli allievi, dato che la pompa di calore è divenuto un dispositivo sempre più utilizzato nella nostra società, viene data anche qualche semplice spiegazione tecnica (funzionamento, tipologia, ecc...) per poter farsi un'idea più precisa del tipo di apparecchio con cui si ha a che fare.

Dal punto di vista concettuale, il modello della pompa di calore rappresentato nella Fig. (5.1) ha un'entrata e un'uscita per l'entropia: essa ha lo scopo di **trasportare entropia da un ambiente a temperatura bassa** (chiamato "ambiente freddo", a temperatura T_f) **verso un ambiente a temperatura più alta** (chiamato "ambiente caldo", a temperatura T_c).

Sia l'entrata che l'uscita consistono in una serpentina, dentro la quale scorre un liquido o un gas.² Grazie ad un *compressore elettrico* tale fluido si trova a temperatura molto bassa (minore di T_f) quando si trova nell'*ambiente freddo* come può essere, ad esempio, l'aria esterna (in inverno) di un abitazione. In questo modo il fluido è comunque in grado di *prelevare* entropia e di trasportarla fino all'*ambiente caldo* (l'interno dell'abitazione). In quel punto il fluido si trova ad una temperatura più alta di T_c ed è quindi in grado di *cedere* entropia. È in questo modo che la pompa trasporta l'entropia.

Nella Fig. (5.1) si può notare come l'energia messa a disposizione dal compressore elettrico viene caricata sul portatore entropia che entra nel dispositivo ad un potenziale termico basso (temperatura T_f) e ne esce ad un potenziale termico più alto (temperatura T_c): l'energia messa a disposizione non è altro che la potenza scambiata P che, in assenza di processi dissipativi (quindi nel caso di una *macchina ideale*) rimane invariata per entrambi i portatori in gioco: $P_{el} = P_{term}$.

² Si tralasciano qui i dettagli sulla spiegazione del meccanismo di funzionamento del compressore e del fluido frigorifero. A dipendenza delle condizioni, viene lasciata al docente la libertà di approfondire o meno gli aspetti tecnici di funzionamento della pompa di calore.

Qual è il vantaggio della pompa di calore rispetto ad una stufa elettrica? Agli allievi viene chiesto di rispondere alla domanda posta aiutandosi con il confronto fra i rispettivi diagrammi di flusso. Senza troppe difficoltà, infatti, essi rappresentano la stufa elettrica con lo schema della Fig. (5.2).

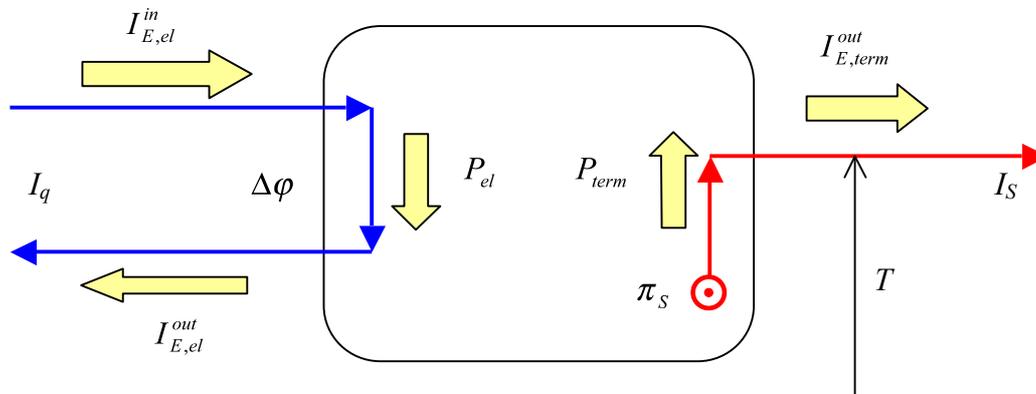


Fig. (5.2): Diagramma di processo della stufa elettrica.

La potenza elettrica P_{el} viene “caricata” sul portatore di entropia, che viene prodotta nelle resistenze elettriche della stufa, ed evacuata nell’ambiente circostante. La potenza termica, P_{term} (equivalente a $I_{E,term}^{out}$), che può anche essere rappresentata come potenza dissipata P_{diss} , è quindi dovuta interamente all’apporto della potenza elettrica.

Gli allievi si rendono a questo punto facilmente conto che nella pompa di calore la situazione è differente. La potenza elettrica si aggiunge alla corrente di energia termica in *entrata* nel dispositivo della termopompa, prelevata dall’ambiente freddo, così che l’energia termica in *uscita* è maggiore rispetto a quella di una stufa elettrica a parità di “consumo elettrico”.

Le pompe di calore possono essere utilizzate sia per **riscaldare** (dette anche **termopompe**, se impiegate appunto come *impianto di riscaldamento*), che per **raffreddare** (come nel caso del *frigorifero* e del *climatizzatore*). In quest’ultimo caso la pompa di calore prende il nome di **macchina frigorigena**.

Due punti sui quali è bene prestare attenzione nell’esposizione didattica e sui quali è proficuo coinvolgere attivamente gli allievi sono i seguenti:

- il trasformatore di energia della Fig. (5.1), che chiamiamo pompa di calore (termopompa o macchina frigorigena), rappresenta il dispositivo funzionante con un *motore elettrico* capace di muovere un fluido in opportuni canali (serpentine) e, con esso, l’entropia prelevata dall’ambiente a temperatura più bassa;
- è fondamentale riconoscere, nei vari esempi, qual è il luogo di *prelievo* (la *sorgente*, che chiamiamo “ambiente freddo”) e il luogo di *rilascio* (il *pozzo*, che chiamiamo “ambiente caldo”) dell’entropia. Una stanza può essere l’ambiente caldo nel caso di un impianto di riscaldamento, ma può corrispondere all’ambiente freddo se la pompa di calore è un climatizzatore.

Per poter discutere in classe la situazione più generale occorre considerare anche gli inevitabili processi dissipativi e considerare quindi il caso di un dispositivo reale. Alla classe viene quindi chiesto, sulla scorta dell’esempio precedente e delle conoscenze acquisite nel capitolo 3, di rappresentare schematicamente una pompa di calore come un **trasformatore reale** di energia. La

pompa di calore deve perciò considerare anche le produzioni interne dell'entropia (inevitabili in qualsiasi apparecchio reale). La Fig. (5.3) presenta il risultato a cui devono giungere gli allievi, in analogia con la Fig. (3.6) già discussa, con l'aggiunta dell'indicazione esplicita degli ambienti di prelievo e di rilascio dell'entropia.

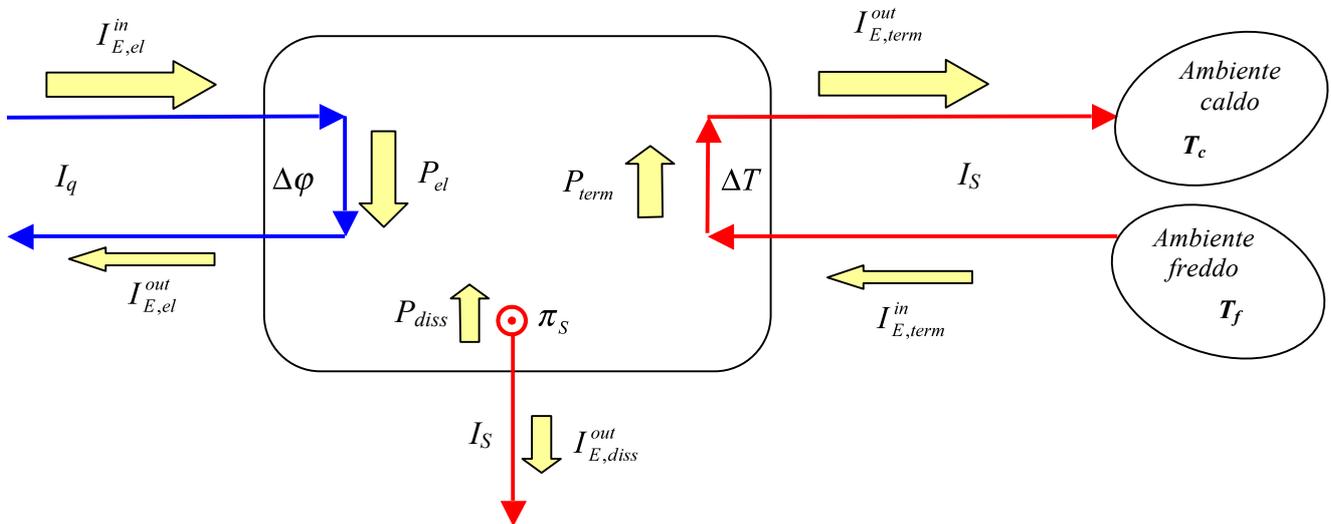


Fig. (5.3): Diagramma di processo della pompa di calore reale.

L'energia giunge al compressore con il portatore carica elettrica. L'elettricità lascia la pompa di calore dopo aver *scaricato* la sua energia, data dalla potenza scambiata P_{el} . Nella parte destra, l'entropia fluisce nel trasferitore dall'ambiente freddo e viene *caricata* con l'energia portata dall'elettricità *meno* quella persa, indicata nello schema con la potenza dissipata P_{diss} , che viene evacuata nell'ambiente circostante ($I_{E,diss}^{out}$) assieme all'entropia prodotta dai processi irreversibili della macchina (vedi anche eq. 3.11):

$$P_{term} = P_{el} - P_{diss} \quad (5.1)$$

dove tutti i valori numerici delle potenze sono indicati come positivi. Le potenze sono indicate con frecce rivolte verso il *basso* quando sono *scaricate* da un portatore, mentre sono rivolte verso l'*alto* quando sono *caricate* su un nuovo portatore. È infatti utile, in questo modo, far notare come la (5.1) non è altro che il *principio di conservazione dell'energia*, che può essere meglio espresso dalla relazione $P_{el} = P_{term} + P_{diss}$ (tutta la potenza scaricata da un portatore deve essere caricata su altri portatori).

Richiamando l'eq. (3.9) è inoltre possibile scrivere che:

$$P_{term} = \left| I_{E,term}^{in} + I_{E,term}^{out} \right| \quad (5.2)$$

dove si ricorda che le correnti in uscita sono indicate come negative ($I_E^{out} < 0$).

L'energia dissipata (indicata qui per comodità con $I_{E,diss}^{out}$) viene evacuata, assieme all'entropia prodotta, nell'ambiente dove si trova la pompa di calore. Per questo motivo si è preferito indicare tali flussi in uscita verso il basso. In questo modo è possibile distinguere bene il flusso di energia caricato sul portatore entropia prodotta a causa dei fenomeni dissipativi, da quello caricato sul portatore entropia che fluisce dall'ambiente freddo a quello caldo.

Come si vedrà nel caso dei motori termici, però, è possibile indicare tutti i flussi in uscita diretti nello stesso ambiente, così che si può sostituire il trasferitore della Fig. (5.3) con quello seguente (Fig. 5.4):

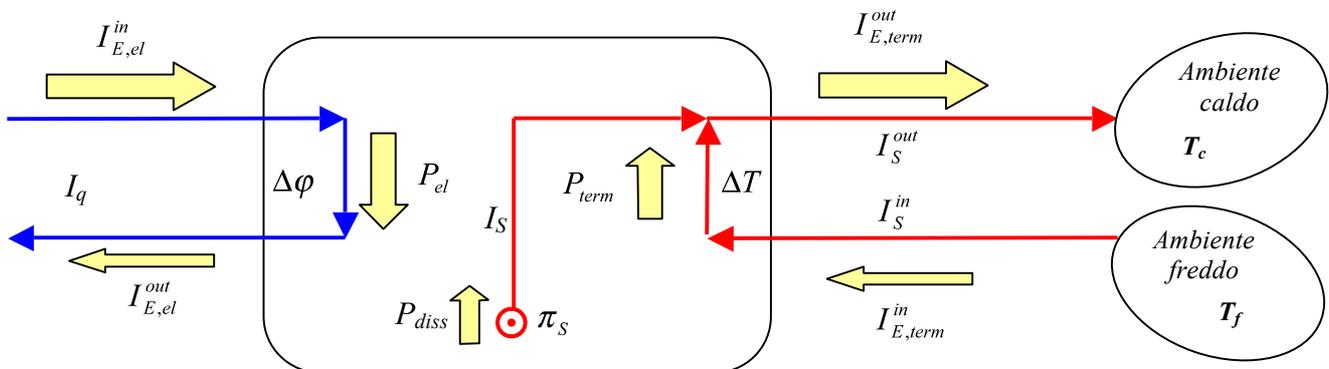


Fig. (5.4): Diagramma di processo della pompa di calore reale, con un'unica uscita per l'entropia.

In questo caso nell'ambiente caldo fluisce l'entropia prelevata dall'ambiente freddo *più* quella prodotta dai processi dissipativi. Con il diagramma della Fig. (5.4) l'eq. (5.2) deve essere sostituita dalla seguente:

$$P_{term} + P_{diss} \equiv P_{el} = \left| I_{E,term}^{in} + I_{E,term}^{out} \right| \quad (5.3)$$

In classe, per mostrare il funzionamento e soprattutto lo scopo di una pompa di calore, si è messo in funzione il dispositivo rappresentato nella Fig. (5.5)³



Fig. (5.5): Pompa di calore dimostrativa.

Dopo alcune ore, l'acqua contenuta nei secchi (inizialmente alla stessa temperatura) diventa molto calda in un secchio e molto fredda (fino a congelare) nell'altro. In questo modo, oltre a richiamare il meccanismo di funzionamento del compressore (il motore elettrico che fornisce la potenza P_{el}) e del

³ Immagine tratta da www.leybold-didactic.de.

fluido frigorifero che scorre nella serpentina, è possibile mostrare in modo chiaro che la pompa di calore preleva entropia dall'acqua contenuta in un secchio e la trasporta nell'acqua dell'altro secchio, così come modellizzato con il trasferitore della Fig. (5.2), nel caso ideale, o della Fig. (5.3) nel caso reale.

5.1.2 Rendimento ed efficienza

Dopo che gli allievi hanno imparato a rappresentare lo schema della pompa di calore, è di grande importanza che essi possano passare da un livello qualitativo ad uno più quantitativo. Per ottenere questo passaggio è utile introdurre due ulteriori concetti: quelli di *rendimento* e di *efficienza*.

Importante ai fini di un buon funzionamento della pompa di calore è “consumare” meno energia elettrica possibile, avere un apparecchio che limiti al minimo la dissipazione di energia ed ottenga buoni risultati. Una misura della bontà di una pompa di calore è espressa dall'**efficienza** ϵ .

Nei manuali tecnici (ma anche sulle riviste commerciali) la qualità del funzionamento viene espressa dal **coefficiente di prestazione COP** (*coefficient of performance*) quando la pompa di calore è attiva nella sua funzione di *riscaldamento*, e dall'**indice di efficienza energetica EER** (*energy efficiency ratio*) quando essa è invece attiva come *macchina frigorifera*.

Per praticità non occorre comunque adottare in classe una simile terminologia. Si può infatti introdurre il concetto più generale di **rendimento** ω : esso indica qual è la *prestazione energetica* della pompa di calore nelle condizioni in cui opera.

L'**efficienza**, invece, indica *quanto è buona la prestazione* della pompa di calore (e delle macchine termiche in generale), ossia di quanto si discosta dalla prestazione migliore possibile. La migliore prestazione possibile è solo teorica: è la prestazione che potrebbe offrire un dispositivo *ideale* che, operando nelle stesse condizioni, non avrebbe alcuna perdita di energia. Una macchina è perciò tanto più *efficiente* quanto più il suo *rendimento* si avvicina a quello ideale.⁴

In particolare, con riferimento alla Fig. (5.3), il progettista di una **termopompa** desidera immettere quanta più possibile energia $I_{E,term}^{out}$ nell'ambiente caldo, con la minor spesa di energia elettrica possibile, rappresentata dalla P_{el} . Una misura dell'abilità a soddisfare questo desiderio si può definire quindi come:

$$\omega_{TP} = \frac{\text{potenza resa}}{\text{potenza spesa}} = \frac{I_{E,term}^{out}}{P_{el}} \quad (5.4)$$

Ad esempio, un rendimento ω_{TP} pari a 4 significa che, per ogni kWh di energia elettrica spesa, la pompa di calore fornisce ben 4 kWh di energia termica all'ambiente caldo. Una caldaia tradizionale per poter fornire 4 kWh di energia ne deve “consumare” almeno altrettanto, ad esempio via combustione della nafta.

I rendimenti ω_{TP} tipici delle termopompe sono generalmente fra 3 e 4,5.⁵

⁴ In alcuni testi i coefficienti *COP* e *EER* vengono identificati con il termine *efficienza*, usato spesso come sinonimo del rendimento, e al posto della nostra definizione di efficienza viene usato il termine *rendimento del Secondo Principio*.

⁵ Consulta www.elettricità.ch.

Nel caso di una **macchina frigorigena**, invece, il progettista desidera estrarre quanta più possibile energia $I_{E,term}^{in}$ dall'ambiente freddo, con la minor spesa di energia elettrica possibile. Una misura dell'abilità a soddisfare questo desiderio si può definire quindi come:

$$\omega_F = \frac{\text{potenza resa}}{\text{potenza spesa}} = \frac{I_{E,term}^{in}}{P_{el}} \quad (5.5)$$

Ad esempio, un rendimento ω_F pari a 4 significa che, per ogni kWh di energia elettrica spesa, la pompa di calore estrae ben 4 kWh di energia termica dall'ambiente freddo.

Per un tipico condizionatore d'aria, il rendimento ω_F potrebbe valere ad esempio 2,5. Un frigorifero domestico potrebbe avere $\omega_F = 5$.

Nel caso di una pompa di calore **ideale**, cioè senza dissipazione di energia, si ha sempre che $P_{el} = P_{term} = |I_{E,term}^{in} + I_{E,term}^{out}|$; quindi, sostituendo la relazione $I_{E,term} = TI_S$, si ricava dalla (5.4) e dalla (5.5) che il **rendimento massimo** ω_{rev} di una pompa di calore *ideale*, chiamato anche *rendimento di Carnot*, è dato da:

$$\text{termopompa:} \quad \omega_{TP,rev} = \frac{T_c}{T_c - T_f} = \frac{T_c}{\Delta T} \quad (5.6)$$

$$\text{macchina frigorigena:} \quad \omega_{F,rev} = \frac{T_f}{T_c - T_f} = \frac{T_f}{\Delta T} \quad (5.7)$$

Il rendimento è tanto maggiore quanto più *vicini tra loro* sono i valori di temperatura degli ambienti "caldi" e "freddi". In altre parole, all'aumentare della differenza di temperatura tra l'ambiente freddo e l'ambiente in cui l'entropia deve essere trasportata, diminuisce il rendimento del sistema. Ciò si può ben comprendere grazie all'analogia idraulica: infatti, occorre più energia per pompare dell'acqua ad una quota molto elevata rispetto ad una poco elevata. L'energia elettrica (ad esempio) che devo avere a disposizione è perciò tanto minore quanto più piccolo è il livello da superare. Lo stesso avviene con la pompa di calore.

Per questo motivo, le pompe di calore che sfruttano sorgenti fredde a temperature relativamente costanti, come il terreno e l'acqua, risultano di norma più efficienti rispetto a quelle che utilizzano sorgenti fredde estremamente variabili, come l'aria.

Infine, è opportuno discutere con gli allievi su come si possa misurare l'efficienza di una pompa di calore a partire dallo spunto che, a parità di condizioni in cui operano, una macchina è più efficiente di un'altra se ha un rendimento maggiore.

Gli allievi hanno capito che il rendimento di una pompa di calore reale (*irreversibile*) è sempre *minore* del rendimento di una pompa ideale (*reversibile*, che ha il rendimento massimo possibile), a causa dell'attrito e di altri processi irreversibili che sono rappresentati negli schemi delle Fig. (5.2) e (5.3) dalla produzione di entropia, π_s^+ , e dalla conseguente dissipazione di energia, P_{diss} .

Un modo per valutare l'**efficienza** (che viene detta anche *rendimento del Secondo Principio*) di una pompa di calore è, quindi, quello di calcolare il *rapporto* tra il rendimento reale e quello massimo teorico:

$$\varepsilon = \frac{\omega}{\omega_{rev}} \quad (5.8)$$

Si noti che l'efficienza ε è sempre minore di uno: $\varepsilon \leq 1$. Per questo motivo l'efficienza viene solitamente espressa in percentuale.

5.2 Motori termici

Il secondo tipo di trasferitore di energia che viene presentato in classe concerne un ampio settore del mondo delle macchine termiche: i **motori termici** come, ad esempio, i motori a combustione e le centrali termoelettriche (a carbone, gas naturale e nucleari).

È interessante iniziare la trattazione in classe con una discussione aperta ed approfondita con gli allievi sugli aspetti che coinvolgono le macchine termiche, sul principio del loro funzionamento, sull'impatto nella società (dalla rivoluzione industriale in poi) e sulle inevitabili ripercussioni ambientali (in particolare il problema dell'effetto serra). Per gli allievi risulta essere un istruttivo esercizio di sintesi, di richiamo a diversi concetti e nozioni non solo scolastici, che coinvolgono la storia, la cultura, l'ambiente e l'attualità.

Con un percorso analogo a quello delle pompe di calore si procede poi in classe a rappresentare un motore termico grazie allo schema del trasferitore di energia. Dal questo punto di vista, un motore termico sfrutta l'energia, che viene trasportata dal flusso spontaneo dell'entropia che si genera dall'interazione tra un "ambiente caldo" e un "ambiente freddo", per generare **movimento**. Nel caso di una centrale termoelettrica, l'ambiente caldo deriva da un processo di combustione (carbone, petrolio o gas naturale) o di fissione dell'uranio 235, grazie ai quali si genera vapore acqueo ad elevata pressione e temperatura che, a sua volta, permette di muovere le *turbine* azionando così un *generatore* di corrente alternata. L'ambiente freddo corrisponde all'acqua di un fiume vicino o all'aria presente nella torre di raffreddamento.

Tralasciando l'azione intermedia della turbina e quindi del portatore meccanico, una centrale termoelettrica è una **macchina termica** che produce elettricità, e può essere schematizzata dal trasferitore di energia della Fig. (5.6):

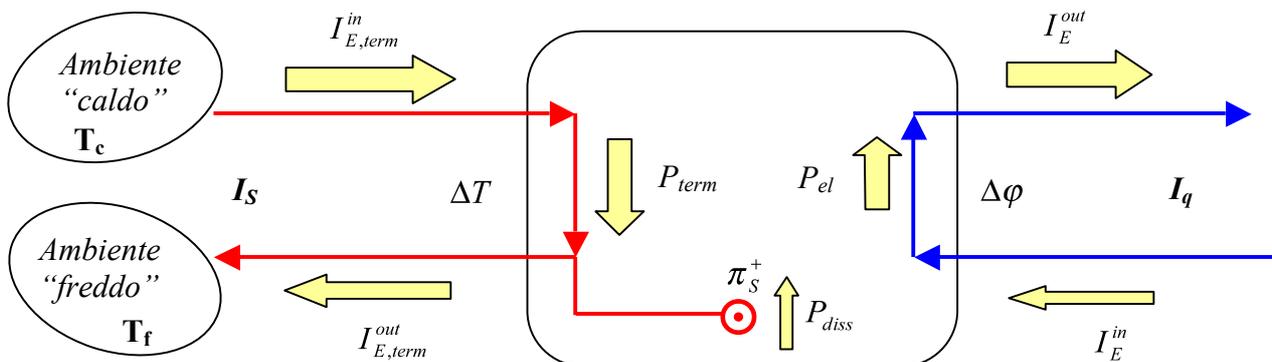


Fig. (5.6): Diagramma di processo del motore termico reale.

L'entropia prodotta e l'energia dissipata a causa dei fenomeni irreversibili vengono evacuate nell'ambiente esterno che corrisponde all'ambiente freddo. Per questo motivo, nella Fig. (5.6), esse sono dirette verso sinistra e si uniscono ai flussi di entropia e di energia principali.

Il linguaggio comune associa alle correnti di energia $I_{E,term}$ il termine **calore** (come già discusso nel paragrafo 3.7) e alla potenza scambiata P_{el} il termine **lavoro** (intesa come energia messa a disposizione dal sistema). Così, si parla di *calore ceduto* dalla sorgente calda (o alla sorgente fredda), come anche di *calore assorbito* dal motore; oppure di *potenza utile* o *potenza erogata* dal motore. Un buon esercizio è proprio quello di associare una tale terminologia, in uso nei libri di testo scolastici più comuni, con quella riferita ai simboli utilizzati nello schema adottato.

D'altronde è abbastanza immediato richiamare il fatto che una macchina termica è costituita da un fluido che, assorbendo *calore*, si espande e "produce" *lavoro* (spostando un pistone o mettendo in rotazione una turbina). Lo schema del trasferitore di energia proposto aiuta a visualizzare meglio il flusso dell'energia e dell'entropia coinvolti, senza richiedere necessariamente delle conoscenze precise sulle proprietà dei cicli termodinamici del fluido.

5.2.1 Rendimento ed efficienza

Il **rendimento termico** η (o semplicemente *rendimento*) di un motore termico è una misura della sua capacità a trasferire l'energia immessa dal portatore entropia nel motore al portatore elettricità (o ad un altro portatore di energia). È ragionevole dunque definire il rendimento di un motore in questo modo:

$$\eta = \frac{\text{potenza ottenuta}}{\text{potenza spesa}} = \frac{P_{el}}{I_{E,term}^{in}} \quad (5.9)$$

I motori che incontriamo nel mondo reale, le **macchine termiche reali**, fissate le due temperature delle sorgenti con le quali operano, hanno rendimenti variabili a seconda dei processi *irreversibili* che vi rimangono implicati.

Se potessimo avere un **motore ideale** (con *tutti* i processi *reversibili*, quindi senza produzione di entropia) avremmo il **rendimento massimo teorico** possibile. Infatti, riprendendo le considerazioni fatte per calcolare il rendimento massimo delle pompe di calore, dalla definizione (5.9) possiamo ricavare il *rendimento di una macchina termica ideale* η_{rev} operante tra le due temperature T_c e T_f :

$$\eta_{rev} = \frac{T_c - T_f}{T_c} = \frac{\Delta T}{T_c} \quad (5.10)$$

che risulta comodo anche scrivere come $\eta_{rev} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$.

Qualsiasi motore ideale che operi con due ambienti a temperature T_c e T_f presenta un rendimento dato dall'equazione (5.10), che viene anche indicato come *rendimento di Carnot*. È importante notare come $\eta < \eta_{rev} < 1$ per qualsiasi intervallo di temperatura, per cui si usa esprimere il rendimento in percentuale. Ma questo significa che il rendimento massimo possibile **non** è comunque mai uguale al 100%! Infatti, dal momento che è impossibile avere $T_f = 0$ K, l'entropia

che viene evacuata nell'ambiente freddo è sempre carica di un po' di energia, indicata nella Fig. (5.6) dal termine $I_{E,term}^{out}$. Un rendimento al 100% equivarrebbe allo sfruttamento totale del flusso di energia $I_{E,term}^{in}$ nel motore, cosa che, appunto, è impossibile da ottenere.

Si può anche notare, inoltre, che il rendimento massimo di un motore termico è uguale all'inverso del rendimento massimo di una termopompa che opera fra le stesse temperature:

$$\eta_{rev} = \frac{1}{\omega_{TP,rev}} \quad (5.11)$$

Analogamente a quanto fatto con le pompe di calore, con l'**efficienza** ε è possibile esprimere la bontà della prestazione (ossia del rendimento) di un motore termico rispetto alla migliore prestazione possibile che, alle stesse condizioni di lavoro, avrebbe un motore ideale (reversibile). Risulta così che l'efficienza di un motore termico è data da

$$\varepsilon = \frac{\eta}{\eta_{rev}} \quad (5.12)$$

e risulta anch'esso sempre minore di 1, per cui viene solitamente espresso in percentuale.

È senz'altro utile far notare che l'efficienza (5.9) di un dispositivo equivale al *rapporto* tra l'energia che occorrerebbe fornire ad una macchina ideale per avere, a parità di condizioni d'impiego, la medesima prestazione e l'energia che occorre effettivamente fornire al dispositivo in questione, vale a dire⁶:

$$\varepsilon = \frac{I_{E,term}^{in} (ideale)}{I_{E,term}^{in} (reale)} \quad (5.13)$$

Il docente sa che spesso, riguardo alle macchine termiche, viene citato il Secondo Principio della termodinamica; oppure si fanno riferimenti agli enunciati di Kelvin-Planck e di Clausius. Un indiscutibile vantaggio della rappresentazione schematica usata in questo corso è quello di rendere familiare e concreto agli allievi il Secondo Principio grazie al fatto che nei processi irreversibili vi è sempre una *produzione di entropia*. Oppure di far comprendere meglio l'impossibilità anche teorica di raggiungere un rendimento del 100% grazie al fatto che il portatore entropia *non può* essere completamente "scaricato" di energia.⁷

⁶ M. D'Anna, Vol.1, par. 3.7.

⁷ M. D'Anna, Vol.1, cap. 3. M. D'Anna propone l'interessante rappresentazione grafica della corrente di energia termica in funzione della temperatura, che si rivela utile per interpretare correttamente i concetti di rendimento ed efficienza nelle macchine termiche.

In classe, analogamente a quanto fatto per la pompa di calore, è stato mostrato un'altro esempio di macchina termica: il motore Stirling, rappresentato nella Fig. (5.7)⁸. Con gli allievi si sono messi in evidenza l'ambiente caldo, dovuto alla spira incandescente alimentata da corrente elettrica (in alto nella figura), e quello freddo, costituito dall'acqua circolante nel sistema. Anche in questo caso non si sono voluti approfondire gli aspetti tecnici e teorici dell'apparato, ma piuttosto si è voluto far notare il fatto che da una differenza di temperatura fra due ambienti è possibile ricavare una potenza termica utile a mettere in movimento il pistone e mantenere in funzione un dispositivo meccanico.

Sostituendo la spira con un termometro è pure possibile mostrare come il dispositivo funzioni anche da pompa di calore. Infatti, azionando a mano (o con un motore elettrico) il rotore meccanico, l'aria contenuta nel pistone in movimento sottrae entropia dall'ambiente prima occupato dalla spira e la trasferisce all'acqua circolante. È così interessante far vedere agli allievi come la temperatura misurata dal termometro diminuisca lentamente. In questo modo, utilizzando una provetta con dell'acqua, è pure possibile formare del ghiaccio.



Fig. (5.7): Motore Stirling.

In Fig. (5.8)⁹ sono rappresentati tipici valori di rendimento di alcune macchine termiche in funzione della temperatura massima di esercizio T_c . La figura riporta anche, per confronto, il rendimento di una macchina termica ideale (detta anche macchina di Carnot) funzionante fra la temperatura minima $T_f = 300$ K e la temperatura massima T_c .

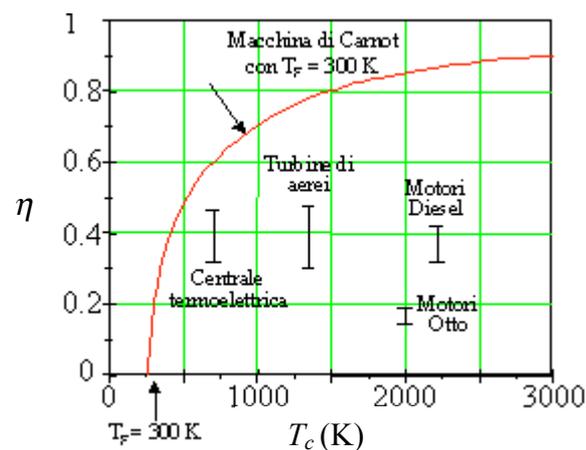


Fig. (5.8): Confronto fra i rendimenti di vari motori.

⁸ Immagine tratta da www.leybold-didactic.de.

⁹ Immagine tratta da www.science.unitn.it/~fisical/fisical/appunti/termo/cap_4/cap_4_3.htm.

5.3 Verifica delle conoscenze e competenze acquisite

Alla fine di questo capitolo agli allievi deve venir verificata l'acquisizione delle seguenti conoscenze e competenze:

- conoscere le proprietà delle macchine termiche, in particolare saper rappresentare e spiegare lo schema dell'energia delle pompe di calore e dei motori termici;
- saper spiegare la differenza fra il rendimento e l'efficienza nelle macchine termiche;
- saper risolvere problemi quantitativi proposti anche nei comuni manuali scolastici.

Una selezione delle verifiche scritte effettuate nelle varie classi (comprendenti anche argomenti trattati in altre parti del corso) è presente negli allegati digitali.

6. Applicazioni in chimica

Questo capitolo è costituito da tre moduli che possono essere affrontati in maniera del tutto indipendente. Nei primi due moduli (cap. 6.1, 6.2) vengono presentate delle applicazioni in chimica ambientale dell'equazione di bilancio (cap. 2), mentre nel terzo modulo (cap. 6.3) il concetto di potenziale chimico (cap. 4) viene applicato allo studio dell'equilibrio acido-base.

6.1 Emissioni antropiche e bilancio globale della CO₂

Prerequisiti

Equazione di bilancio (cap. 2). Idea di ciclo bio-geochimico ed aspetti fondamentali del ciclo del carbonio, come affrontati nel primo biennio di studio e nei comuni manuali liceali¹.

Obiettivi

Saper mettere qualitativamente in relazione, tramite lo strumento dell'equazione di bilancio, le variazioni della quantità di anidride carbonica presente nell'atmosfera con i più importanti processi naturali ed antropici (dissoluzione in acqua, fissazione tramite fotosintesi, emissione tramite respirazione, decomposizione, ed uso di combustibili fossili).

Strategia didattica

La durata di questo modulo è molto variabile a dipendenza del grado di approfondimento desiderato (indicativamente, da 4 ad 8 ore-lezione). Particolarmente importante è far comprendere agli allievi che le attuali previsioni sull'evoluzione dei livelli della CO₂ atmosferica si fondano sostanzialmente su modelli basati sull'equazione di bilancio. La modalità di svolgimento di queste lezioni consistono nella presentazione da parte del docente di dati e fatti che gli allievi sono chiamati a commentare. In certi casi è utile proporre in classe dei piccoli esercizi di calcolo per ripassare i fondamenti di stechiometria.

Punti essenziali e commenti

La tematica dei livelli atmosferici della CO₂ è affrontata in maniera molto differenziata nei comuni manuali liceali: purtroppo questo argomento è spesso trattato o in maniera troppo superficiale, o, al contrario, sviluppato con una pletora di dettagli che rende difficile agli allievi cogliere i punti salienti della questione. Un aspetto molto importante riguarda l'approccio quantitativo al problema: infatti sui manuali liceali² vengono spesso presentate figure che riportano la stima delle **quantità totali** di carbonio presenti nei vari compartimenti (atmosfera, oceani,...): spesso però in questi schemi mancano le stime delle **correnti** di carbonio in entrata ed uscita da questi compartimenti. L'approccio presentato in molti manuali è utile per un primo confronto con gli altri cicli bio-geochimici (azoto, fosforo, zolfo), ma, per quanto riguarda il problema del livello atmosferico della CO₂, il parametro essenziale da studiare non è solo la quantità X di CO₂ presente nell'atmosfera piuttosto che negli oceani, quanto l'intensità delle correnti di CO₂ (I_{in} , I_{out}) in entrata ed uscita dall'atmosfera. Da notare che il tasso di distruzione della CO₂ dovuto a reazioni chimiche che si svolgono nell'atmosfera stessa è trascurabile³, a differenza di quanto accade per altri ossidi (NO, SO₂) che costituiscono un grave problema ambientale (vedi cap. 6.2).

¹ Ad esempio H.Curtis, N.S.Barnes, Invito alla Biologia, sesta edizione, Zanichelli, 2009, cap. 40.4, pag. 690-693.

² Ibidem, pag. 691.

³ La CO₂ non può infatti essere ulteriormente ossidata, ed altre reazioni sono trascurabili, ad eccezione della dissoluzione in acqua con susseguente formazione di acido carbonico H₂CO₃. Si tratta di una reazione rapida e facilmente reversibile, di modo che si può considerare che una piccola ma costante frazione della CO₂ atmosferica sia presente in una forma "idratata". Si può altresì considerare come sistema esclusivamente la parte aeriforme dell'atmosfera: in questo caso ci si trova di fronte ad un regime stazionario con uguali correnti di CO₂ in entrata ed

La tabella (6.1), adattata da un contributo di A. Romer⁴, può essere usata per studiare i termini del problema da un punto di vista dell'equazione di bilancio. I valori si riferiscono ad una stima del ciclo annuale della CO₂ effettuata dal World Energy Council nel 1997. I valori sono riportati in Tkg di carbonio/anno. È utile ricordare (e far calcolare per esercizio agli allievi) che 3,76 kg di CO₂ sono l'equivalente stechiometrico di 1 kg di carbonio.

Tab. (6.1): Bilancio globale dell'anidride carbonica.

Sistema	Processo	I _{in} Tkg carbonio /anno	I _{out} Tkg carbonio /anno	Commenti
Biosfera terrestre	Respirazione e decomposizione	102		naturale
Biosfera terrestre	Fotosintesi		100	naturale
Biosfera terrestre	Deforestazione	2		antropico
Litosfera	Uso di combustibili fossili	6		antropico
Biosfera acquatica	Respirazione, decomposizione, altro	90		naturale
Biosfera acquatica	Fotosintesi, dissoluzione e altro		92	naturale
	Bilancio globale	200	192	

È molto interessante notare che, senza l'intervento dell'uomo, l'eccesso di immissioni di CO₂ proveniente dalla biosfera terrestre viene compensato dalla biosfera acquatica. In questa maniera il livello di anidride carbonica nell'atmosfera si manterrebbe costante. Però, a causa dell'intervento antropico, principalmente rappresentato dall'uso di combustibili fossili (carbone, petrolio, gas naturale) e dalla deforestazione (soprattutto nei paesi in via di sviluppo vi è l'eliminazione definitiva di ampie zone boschive) si arriva ad avere un costante aumento della CO₂ presente nell'atmosfera. Alcuni ricercatori reputano che l'intervento umano, sotto forma di deforestazioni, sia stato significativo già negli ultimi millenni⁵: se la questione rimane difficile da definire da un punto di vista quantitativo, è comunque utile ricordare che, senza l'intervento umano, gran parte dell'Europa sarebbe rimasta, come lo era al termine dell'ultima glaciazione, un immenso bosco!

Possibili approfondimenti

La tematica riguardante il livello della CO₂ atmosferica è vastissima: importanti lavori divulgativi, soprattutto legati a temi energetici, sono apparsi negli scorsi anni su tutte le riviste scientifiche^{6,7}. Particolarmente interessante da un punto di vista dell'equazione di bilancio sono i due articoli apparsi nel 2007⁸ dedicati ai possibili metodi per ridurre le emissioni di CO₂ con particolare riferimento alla problematica dei biocarburanti. Come esercizio di calcolo si può proporre agli allievi di stimare l'emissione di CO₂ di un'autovettura a partire dal consumo dichiarato di carburante (in L/100 km). Per i calcoli stechiometrici si può considerare la benzina come composta unicamente da ottano (C₈H₁₈), ed il gasolio da cetano (C₁₆H₃₄). Pure interessanti sono i confronti con carburanti alternativi quali il metano (CH₄). Si noti che attualmente viene definita "vettura a basso impatto ambientale" un modello che emetta meno di 120 g di CO₂/km. È però necessario partire dalla CO₂ emessa al momento della combustione del carburante ed estendere il discorso alla

uscita dalla fase gassosa (le altre fasi sono rappresentate dalle goccioline di acqua o dai cristalli di ghiaccio presenti nelle nubi o nelle precipitazioni).

⁴ A.Romer, Consumo energetico mondiale ed implicazioni ambientali, Proceedings de "L'effetto Serra", Giornata di studio per i docenti, Bellinzona, 15 ottobre.2003.

⁵ W.F.Ruddiman. Quando iniziammo ad alterare il clima, Le Scienze, maggio 2005, pp 46-53.

⁶ AA VV, Le risorse energetiche, Le scienze, Quaderni, N. 129, dicembre 2002.

⁷ AAVV, Le Scienze, N.459, Energia, la resa dei conti, novembre 2006.

⁸ B. MacKibben, National Geographic Italiana, ott. 2007 Lotta al CO₂, pp. 3-7, e J.K.Bourne, ibid., Sogni verdi, pp. 8-29.

CO₂ liberata per la produzione ed il trasporto del carburante stesso. Purtroppo, da questo punto di vista, i biocarburanti attuali sono ancora poco performanti: con l'etanolo prodotto da mais si ha solo il 22% di riduzione di gas a effetto serra rispetto alla benzina; questo valore sale al 56% con quello prodotto a partire dalla canna da zucchero. I futuri impianti, ancora in fase di studio, in cui si intende produrre etanolo a partire da scarti vegetali (costituiti in prevalenza soprattutto da cellulosa) dovrebbero invece garantire una riduzione delle emissioni stimata attorno al 91%. Da sottolineare ancora un aspetto importante riguardo alle possibili riduzioni delle emissioni di CO₂: come si vede nel modello proposto nella tabella precedente, ogni sia pur piccolo contributo antropico è in grado di far aumentare il livello di CO₂ atmosferico: diminuire le emissioni antropiche di CO₂ significa dunque solo **rallentare la progressione** del tasso di crescita della CO₂ nell'atmosfera, e **non diminuirla effettivamente**, cosa che purtroppo talvolta si legge sui giornali!

6.2 Equazione di bilancio e livello degli inquinanti atmosferici

Prerequisiti

Equazione di bilancio (cap. 2), concetti chimici di base (equazioni chimiche, basi di stechiometria).

Obiettivi

Saper costruire, tramite lo strumento dell'equazione di bilancio, dei modelli che possano rendere conto qualitativamente delle variazioni della quantità di sostanze inquinanti presenti nell'aria.

Strategia didattica

La durata di questo modulo è variabile a dipendenza del grado di approfondimento desiderato (indicativamente, da 4 ad 8 ore-lezione). Particolarmente importante è arrivare a far comprendere agli allievi che il tasso di variazione di un inquinante atmosferico può essere descritto grazie all'equazione di bilancio. In generale, a differenza di casi particolari come la CO₂ (cap. 6.1) oppure le polveri fini, il livello di una sostanza presente nell'aria non dipende unicamente dalle correnti in entrata ed in uscita (I_{in} , I_{out}), ma pure dal tasso di produzione e distruzione atmosferica (π^+ , π^-) delle sostanze stesse. A dipendenza dell'approccio didattico preferito, il docente può partire dallo studio di casi particolari divenuti ormai classici (ossidi di zolfo e di azoto) oppure cominciare col tentare di identificare i possibili parametri coinvolti nell'equazione di bilancio proponendo alla classe una serie di riflessioni a partire da uno schema simile della fig. (6.1)⁹, in cui i cerchietti bianchi indicano dei valori di immissione rispettati praticamente in tutta la Svizzera; i cerchietti grigi, rispettivamente neri indicano invece una situazione delle immissioni¹⁰ vieppiù problematica.

	Città	Agglomerato	Campagna
Diossido di zolfo (SO ₂)	○	○	○
Particelle fini (PM10)	●	◐	◐
Monossido di carbonio (CO)	○	○	○
Diossido d'azoto (NO ₂)	●	◐	◐
Ozono (O ₃)	◐	●	●

Fig. (6.1): Situazione delle immissioni di inquinanti gassosi in Svizzera.

⁹ Questo schema ed i seguenti sono tratti dal CD-ROM didattico A!R distribuito dal BUWAL/ UFAPF, Berna, 1999

¹⁰ In chimica ambientale si fa distinzione tra **emissioni** ed **immissioni**: l'uso rigoroso di questi termini genera parecchia confusione e difficoltà negli allievi. Si è rivelato utile concentrarsi sul termine immissioni, perché immediatamente associabile alle correnti I_{in} di sostanze che entrano nel sistema atmosfera.

Punti essenziali e commenti

Come punto di partenza può essere utile affrontare alcuni aspetti della circolazione atmosferica in prossimità del suolo, come le **inversioni termiche invernali** in cui vaste masse d'aria tendono a ristagnare in vicinanza del suolo. Per trattare questi argomenti si è rivelato particolarmente utile per il docente far riferimento ad un testo che, oltre ad essere molto accurato dal punto di vista scientifico, offre anche precise informazioni sulle condizioni meteorologiche dell'arco alpino¹¹.

È necessario che allievi acquisiscano qualche conoscenza di base in questo campo in modo da poter meglio comprendere come una data sostanza possa entrare e uscire dal **sistema di riferimento atmosferico** che è necessario considerare in questi casi (tipicamente, una fascia di alcune centinaia di metri che si trova immediatamente sopra al suolo di una certa regione). A questo proposito è assai utile far risaltare il problema della scelta del sistema di riferimento in casi problematici come questo: infatti le stazioni di misura degli inquinanti atmosferici devono essere poste ad una certa distanza (sia orizzontale che verticale) dal suolo e dalle grandi vie di traffico; in caso contrario, a causa della grossa turbolenza presente, i dati misurati mostrerebbe eccessive fluttuazioni e sarebbero del tutto inaffidabili. Il fatto è che però i bambini respirano uno strato d'aria che si trova molto più vicino al suolo rispetto a quello analizzato dalle sonde, strato in cui il livello degli inquinanti emessi dagli scarichi degli autoveicoli, posti appunto ad alcuni decimetri dal suolo, è spesso significativamente più elevato. Di particolare rilevanza è anche far notare la tipologia dei dati pubblicati: in certi casi di medie giornaliere (nel caso ad esempio degli ossidi di azoto) oppure di massimi orari (nel caso dell'ozono).

Precisate queste premesse di ordine più generale, è opportuno affrontare in classe la questione di come una sostanza esca o entra dal sistema di riferimento atmosferico scelto. Gli allievi devono arrivare a comprendere bene come sia indispensabile considerare non solo l'intensità delle immissioni (I_{in}) (determinate ad esempio dall'intensità del traffico) ma anche la facilità o meno con cui le sostanze stesse lasciano lo strato d'aria in prossimità del suolo: è dunque essenziale valutare anche l'intensità delle correnti in uscita (I_{out}).

Gli aspetti citati sono messi facilmente in evidenza discutendo di polveri fini¹²: infatti in giornate ventose o piovose, in cui le polveri fini tendono ad essere disperse in ampi strati atmosferici, rispettivamente dilavate al suolo, i livelli atmosferici di PM10 calano sensibilmente. Il caso delle polveri fini è interessante anche per il fatto che, sebbene esse possano adsorbire sostanze gassose presenti nell'atmosfera, non esiste nessun meccanismo di degradazione chimica delle stesse nell'aria. Esse non possono dunque che uscire o entrare nel sistema aria, essendo il loro tasso di distruzione (o creazione) del tutto trascurabile: questa cosa evidentemente non vale per altre sostanze come il monossido di carbonio (CO), che viene rapidamente ossidato a CO₂.

Dopo questo punto è utile affrontare con la classe la tematica divenuta ormai classica dell'immissione nell'aria degli ossidi di zolfo e di azoto (SO₂, NO), della loro ulteriore ossidazione a SO₃ ed NO₂, e della loro reazione con l'acqua per formare gli acidi nitroso, nitrico e solforico (HNO₂, HNO₃, H₂SO₄) responsabili dell'acidificazione delle precipitazioni. Un accenno a questi temi è di regola presente nella maggior parte dei testi di chimica e di biologia scritti per gli allievi liceali: a differenza di altri argomenti, per sviluppare in modo adeguato questa tematica in classe è indispensabile ricercare ulteriori informazioni provenienti da testi più specializzati¹³.

Di grande utilità didattica è la discussione delle variazioni delle emissioni di inquinanti atmosferici nel corso degli ultimi decenni. Ritornando all'equazione di bilancio, è utile ricordare in classe che il discorso fa riferimento alle correnti di inquinanti che entrano nell'atmosfera (I_{in}): precisato questo,

¹¹ G. Kappenberger, J. Kerkmann, Il tempo in montagna, ed. Zanichelli, 1997.

¹² B. Jordi et al, Le polveri fini fanno ammalare, opuscolo BUWAL/UFAPF, Berna, 2005.

¹³ C. Baird, Chimica ambientale, Zanichelli, 1997, cap 3 (la chimica e l'inquinamento dell'aria a livello del suolo).

il docente può passare a presentare dei grafici che concernono il nostro paese ¹⁴ e chiedere agli allievi di cercare di spiegare (in termini qualitativi) le variazioni osservate.

Come primo esempio si possono considerare le immissioni di ossidi di azoto (Fig. 6.2) ¹⁵: i dati in ordinata (in **tonnellate/anno**) rappresentano una stima a livello svizzero. Si notino in particolare a partire dalla metà degli anni ottanta le conseguenze positive dell'adozione della **marmitta catalitica** e dell'introduzione dei **controlli sistematici** della corretta regolazione degli impianti da riscaldamento e dei motori. Purtroppo l'incessante aumento del traffico riscontrato negli ultimi decenni ha vanificato fino ad oggi gli obiettivi che il Consiglio federale si era proposto di attuare entro il 1990 grazie alla SIAI (Strategia di lotta contro l'Inquinamento atmosferico).

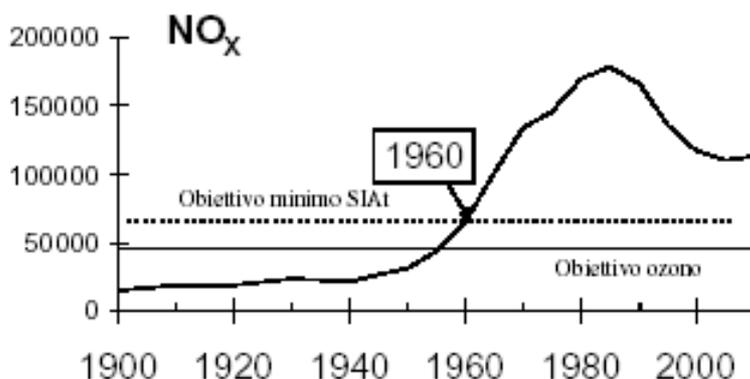


Fig. (6.2): Immissioni di ossidi di azoto in Svizzera (dati in ordinata in tonnellate/anno).

Come secondo esempio si può analizzare il successo registrato in Svizzera nella riduzione delle emissioni di SO₂, Fig (6.3): i dati in ordinata, in **tonnellate/anno**, rappresentano ancora una volta una stima delle immissioni annuali a livello svizzero)

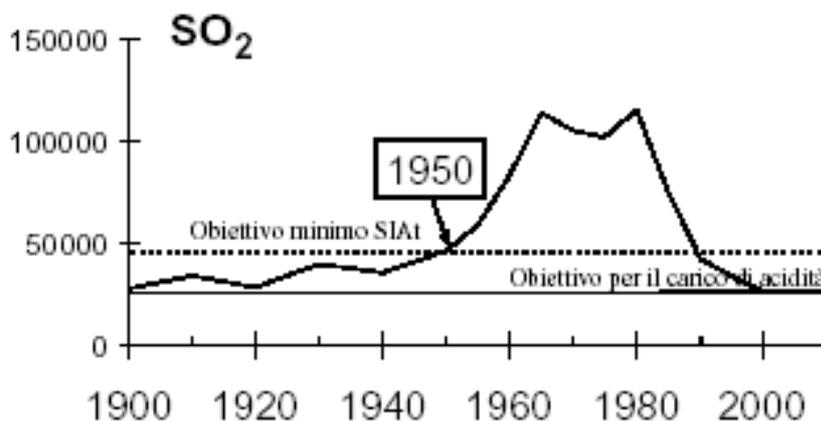


Fig. (6.3): Immissioni di ossidi di azoto in Svizzera (dati in ordinata in tonnellate/anno).

Con l'introduzione dell'obbligo di una sempre più estesa desolforazione dei combustibili e dei carburanti, cioè della parziale rimozione (a livello di processi di raffinazione) dei composti organici solforati presenti¹⁶, si è potuto ridurre drasticamente i livelli di SO₂ emessi dal traffico e dai

¹⁴ Questo grafico ed i seguenti sono tratti dal CD-ROM didattico A!R distribuito dal BUWAL/ UFAFP, Berna, 1999.

¹⁵ Il simbolo NO_x viene usato per indicare un miscuglio di ossidi d'azoto costituito principalmente da NO, NO₂.

Riguardo alla situazione in Ticino (dati del Dipartimento del Territorio riferiti all'anno 2000), si stima che il 77% degli NO_x provenga dal traffico, il 9% dai riscaldamenti, mentre il resto è dovuto ad un insieme di altre fonti.

¹⁶ E. Stocchi, Chimica organica, applicata e industriale, Masson Scuola, 1993, p.49.

riscaldamenti domestici. Da notare che oltre ai livelli di SO_2 si è arrivati a ridurre in modo decisivo pure il carico di acidità dovuto in maniera rilevante alla formazione nell'atmosfera di acido solforico (H_2SO_4) che, con le piogge, raggiunge il suolo assieme agli acidi nitrosi e nitrici derivati dagli ossidi d'azoto.

La questione degli alti livelli di ozono che si generano nel periodo estivo è molto più complessa dei casi affrontati in precedenza¹⁷. Vista la grande rilevanza della problematica si è deciso di affrontarla comunque in classe introducendo però alcune semplificazioni ed approssimazioni, come il fatto di considerare l'ozono come generato e distrutto da un unico tipo di reazione chimica che avviene solo su scala locale in un sistema atmosferico praticamente chiuso¹⁸. Il modello semplificato proposto agli allievi (vedi anche esercizio negli allegati digitali) si basa su quattro reazioni chimiche principali:

- 1) $\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}$ (all'interno dei motori e dei bruciatori degli impianti riscaldamento)
- 2) $2\text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}_2$ (nell'atmosfera)
- 3) $\text{NO}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{NO} + \text{O}_3$ (nell'atmosfera: reazione **reversibile** che produce **ozono (O_3) mediata** dai raggi ultravioletti (UV) e dai composti organici volatili(COV)).
- 4) $2\text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HNO}_2(\text{aq}) + \text{HNO}_3(\text{aq})$ (nell'atmosfera: produce un miscuglio di acido nitroso e nitrico che si deposita al suolo con pioggia e polveri)

Anche solo grazie alle semplici equazioni riportate sopra si può abbozzare una discussione di un sistema dinamico complesso, quale la concentrazione di inquinanti sopra una grande città partendo dai dati della Fig. 6.4:

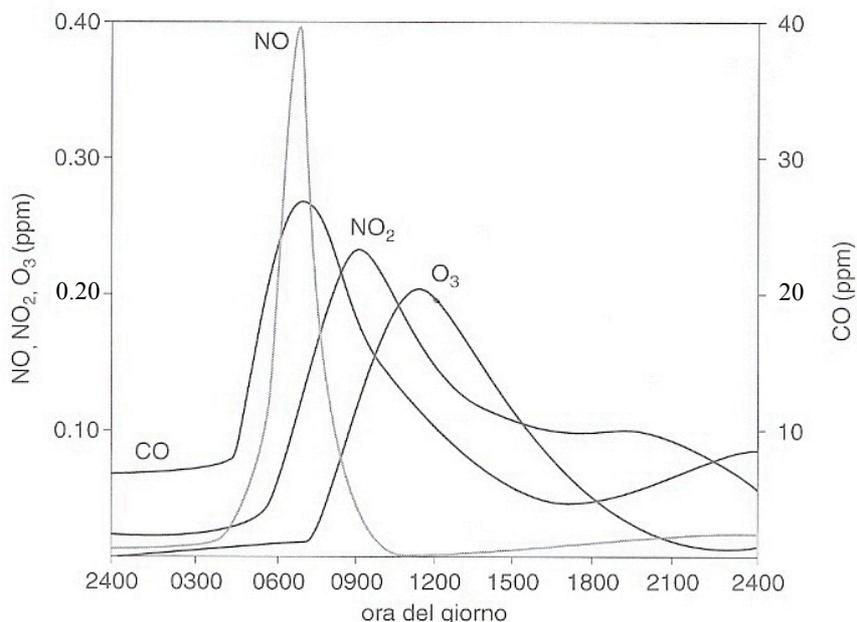


Fig. (6.4): Andamento giornaliero della concentrazione di inquinanti gassosi in una città¹⁹.

¹⁷ Per un approfondimento sulla tematica dell'ozono troposferico vedi: M. Giuliacci et al, Manuale di meteorologia, Alpha test 2010, pp105-108 e 147-151.

¹⁸ In realtà, nel caso dei forti carichi estivi di ozono, si stima che meno della metà degli stessi siano generati localmente, cioè in un raggio inferiore ai 50 km. Diverse e complesse reazioni chimiche radicaliche sono coinvolte nella formazione dell'ozono troposferico: alcune delle sostanze in gioco, come ad esempio il PAN (Perossiacetilnitrate), rappresentano esse stesse un problema per la salute degli esseri viventi.

¹⁹ Da M. Giuliacci et al, Manuale di meteorologia, Alpha Test 2010, pag. 149.

Il picco di NO misurato in prima mattina può essere motivato grazie all'inizio del traffico (eq. 1), mentre il picco di NO₂ risulta dall'ossidazione atmosferica di NO (eq. 2). Il picco di O₃ registrato nel primo pomeriggio può essere spiegato grazie alla terza equazione, mentre che il calo serale può essere interpretato grazie all'ultima equazione ed alla reversibilità della terza.

Possibili approfondimenti

Molto interessante è approfondire la problematica legata agli **effetti dell'ozono e delle piogge acide** a livello dei vegetali, ed in particolare i risultati ottenuti nelle campagne di studio sui boschi svizzeri che si sono susseguite negli ultimi decenni²⁰: anche in questo caso un approccio basato sull'equazione di bilancio è utile nell'affrontare il problema. Qui il sistema di riferimento è il suolo: un parametro importante oltre al cosiddetto carico acidificante (proveniente dalle precipitazioni) è la natura del suolo stesso. I suoli calcarei sono infatti in grado di neutralizzare (almeno in parte) gli acidi che vi penetrano con la pioggia: si tratta dunque di una "distruzione" di sostanza (π^-) che avviene all'interno del sistema, e che riduce sensibilmente il problema dell'acidificazione delle acque ad esempio nella parte meridionale del Cantone Ticino.

Anche la tematica legata alle **polveri fini** può essere ripresa ed ampliata nella parte biologica del corso: particolarmente interessanti sono gli approfondimenti legati alla meccanica respiratoria che consentono una ripresa del modello spinta-corrente-resistenza (differenza di pressione e di concentrazione come spinte, intensità delle correnti ai vari livelli del sistema, superficie totale di scambio alveolare e ruolo del cosiddetto surfattante polmonare²¹).

6.3 Il potenziale chimico e l'equilibrio acido – base

Prerequisiti

Definizione e proprietà del potenziale chimico (cap. 4.1, 4.2, 4.3), calcolo con i logaritmi, definizioni di acido e di base, concetto di pH.

Obiettivi

Saper interpretare i fenomeni legati all'equilibrio acido – base grazie all'uso del potenziale chimico. Saper stimare il pH di soluzioni di acidi forti e deboli.

Strategia didattica

Lo scopo di questo modulo (6-8 ore-lezione) consiste nell'applicare all'equilibrio acido-base quanto appreso in precedenza sul potenziale chimico. Prima di iniziare con il tema vero e proprio è necessario investire un buon lasso di tempo per riprendere i fondamenti della teoria acido-base.

Punti essenziali e commenti

Le definizioni di acido e di base sono già state proposte agli allievi nel corso del primo biennio. Come proposto dalla maggior parte dei manuali scolastici, nel presente corso si è scelto di riprendere **entrambe** le classiche definizioni di acido e di base²², e di non limitarsi alla definizione di Brønsted come preferito da taluni. L'esatta formulazione e la discussione di ambedue le definizioni riveste una notevole importanza didattica, come pure il confronto (anche temporale) tra le stesse. Tra le diverse varianti considerate, si è optato per le formulazione seguenti:

- **Arrhenius (1887): In soluzione acquosa un acido libera ioni H⁺, una base libera ioni OH⁻**

È importante far notare alla classe come questa prima definizione sia stata formulata dal suo autore innanzitutto per spiegare la buona conducibilità delle soluzioni di acidi e basi in acqua. Si noti come

²⁰ I. Ceschi, Il bosco del Cantone Ticino, Dadò, 2006, pp 188-196 (L'inquinamento ambientale e il deperimento delle foreste).

²¹ J.B. West, Fisiologia della respirazione: l'essenziale, Piccin, 2006.

²² Si è tralasciata la definizione di Lewis perché non utile nel contesto del tema trattato.

il termine “libera OH⁻” possa oggi venir inteso come “porta alla liberazione di OH⁻”, fatto che permette di applicare la definizione di Arrhenius non solo per gli idrossidi (come NaOH), ma anche per tutte le altre basi (come NH₃).

- **Brönsted e Lowry (1922): Un acido dona H⁺, una base accetta (cioè lega) ioni H⁺**

Considerando questa definizione è necessario ribadire in classe come essa non è affatto in contrapposizione con la precedente, ma che anzi la completa riuscendo in particolare a spiegare il meccanismo attraverso il quale in soluzione acquosa si vengono a formare H⁺(aq) ed OH⁻(aq). Lo ione H⁺ liberato dall'acido viene idratato formando H⁺(aq): con questo simbolo si intende in effetti lo ione H⁺ legato ad una molecola d'acqua, cioè lo ione idronio, H₃O⁺. A seconda del contesto didattico può essere più opportuno usare il simbolo H⁺(aq) piuttosto che H₃O⁺.

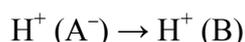
La formazione di OH⁻ si giustifica con il fatto che anche una molecola d'acqua può perdere un protone, visto che H⁺ può venir legato dalla base (ad esempio a partire da NH₃ si forma NH₄⁺).

Analogia con l'estrazione dello iodio

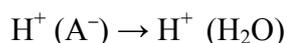
Anche se per ragioni di tempo in classe non è generalmente possibile sviluppare convenientemente l'argomento, è comunque utile domandare agli allievi di trovare un'analogia con la situazione dell'estrazione dello iodio presentata al momento dell'introduzione al concetto di potenziale chimico (cap 4.1). Per la maggior parte degli allievi i due fenomeni non sembrano avere alcun punto in comune, per cui è compito del docente cercare di guidare attivamente la discussione.

Nel primo caso occorre considerare che le molecole di iodio (I₂) lasciano la fase acquosa per andare verso la fase organica: esse lasciano dunque le molecole di acqua e si spostano verso le molecole del solvente: I₂(aq) → I₂(solv)

Nel secondo caso dobbiamo invece considerare singole molecole di acido ed di base. La molecola di acido HA libera uno ione H⁺: in questo modo lo ione H⁺ abbandona il legame con la molecola dell'acido deprotonato (A⁻) e si dirige verso la base (a cui verrà in seguito legata):



Se la base è una semplice molecola d'acqua si forma H₃O⁺:

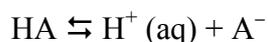


La propensione di un acido a cedere H⁺ all'acqua non è altro che una misura di quella che viene chiamata la “forza” di un acido: un acido viene detto debole quando l'insieme delle molecole che lo costituisce è in grado di dare alle molecole d'acqua solo una piccola parte degli H⁺ che potrebbero venire ceduti. Si dice anche la dissociazione di un acido debole in acqua è solo parziale.

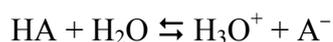
Acidi deboli

Per approfondire l'argomento è necessario riprendere le definizioni di acido proposte sopra.

- Secondo la definizione di Arrhenius un acido **debole** si dissocia solo in piccola parte in acqua:



- Secondo la definizione di Brönsted e Lowry solo una piccola parte degli H⁺ vengono donati dall'acido debole all'acqua:



La formulazione di Arrhenius è quella più semplice per effettuare dei calcoli in soluzioni acquose diluite, per cui viene adottata nel seguito della discussione.

Per **ogni acido debole** si può definire una cosiddetta **costante di dissociazione (K_a)** che può essere espressa come segue:

$$K_a = [\text{H}^+] \cdot [\text{A}^-] / [\text{HA}] \quad (6.1)$$

Sperimentalmente si può verificare come l'equazione sopra valga per un ampio intervallo di concentrazioni. Si noti come tra parentesi sono indicate concentrazioni relative, ossia adimensionali²³.

Di regola nelle pubblicazioni chimiche si trovano riportati i valori di K_a determinati a 298 K = 25°C. I tipici valori di K_a sono molto piccoli (per gli acidi carbossilici come l'acido acetico il valore è attorno a 10^{-5}). Al posto di K_a vengono spesso tabulati i valori di $\text{p}K_a$, dove $\text{p}K_a = -\log K_a$

Il potenziale chimico e la costante di dissociazione di un acido

Grazie all'uso del potenziale chimico si può arrivare a trovare spiegazione razionale al fatto che sia valida l'equazione discussa nel paragrafo precedente. Appare ragionevole che per il sistema



lo stato di equilibrio sia caratterizzato dalla seguente equazione dei potenziali chimici:

$$\mu_{\text{HA}} = \mu_{\text{H}^+} + \mu_{\text{A}^-} \quad (6.2)$$

Per giustificare l'espressione precedente occorre riflettere sull'analogia con una colonnina di mercurio che è in equilibrio idrostatico con un'altra colonnina costituita da uno strato di acqua sovrastato da uno di olio. Per la pressione p (cioè il **potenziale** idrostatico) vale la condizione:

$$p_{\text{Hg}} = p_{\text{acqua}} + p_{\text{olio}} \quad (6.3)$$

Grazie alla formula di dipendenza del potenziale chimico dalla concentrazione (vedi cap 4.3) l'equazione dei potenziali chimici esposta sopra diventa (da notare che $\mu_{\text{H}^+}^0 = 0$):

$$\mu_{\text{HA}}^0 + k \cdot \log [\text{HA}] = (0 + k \cdot \log [\text{H}^+]) + (\mu_{\text{A}^-}^0 + k \cdot \log [\text{A}^-]) \quad (6.4)$$

Questa equazione si può rappresentare anche nel modo seguente:

$$10^{\frac{\mu_{\text{HA}}^0 - \mu_{\text{A}^-}^0}{k}} = [\text{H}^+] \cdot [\text{A}^-] / [\text{HA}] \quad (6.5)$$

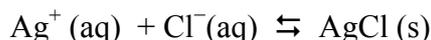
L'espressione a sinistra dell'uguaglianza non dipende dalla concentrazione, è infatti una costante che viene appunto chiamata K_a , per cui la formula può essere riscritta come vista sopra:

$$K_a = [\text{H}^+] \cdot [\text{A}^-] / [\text{HA}] \quad (6.6)$$

Si noti dunque che la validità della formula è in effetti una conseguenza diretta di un principio più generale, ovvero quello di uguaglianza dei potenziali chimici allo stato di equilibrio. È interessante

²³ per maggiori dettagli confronta cap 4.3.

notare che questo principio generale può essere applicato ad altri sistemi, come per esempio nel tipico caso di un equilibrio di solubilità:



In questo caso vale sperimentalmente la legge:

$$[\text{Ag}^+] \cdot [\text{Cl}^-] = K_s \quad (6.7)$$

dove K_s è nota come la costante di solubilità.

Analogamente al caso precedente, all'equilibrio per gli ioni in fase acquosa e per il solido insolubile deve valere la seguente condizione:

$$\mu_{\text{Ag}^+} + \mu_{\text{Cl}^-} = \mu_{\text{AgCl}} \quad (6.8)$$

Dato che AgCl è un solido possiamo supporre che $\mu_{\text{AgCl}} \approx \mu_{\text{AgCl}}^\circ$

Usando la dipendenza del potenziale chimico dalla concentrazione si ottiene:

$$(\mu_{\text{Ag}^+}^\circ + k \cdot \log [\text{Ag}^+]) + (\mu_{\text{Cl}^-}^\circ + k \cdot \log [\text{Cl}^-]) = \mu_{\text{AgCl}}^\circ \quad (6.9)$$

ovvero:

$$10^{\frac{\mu_{\text{Ag}^+}^\circ + \mu_{\text{Cl}^-}^\circ - \mu_{\text{AgCl}}^\circ}{k}} = \text{costante} = [\text{Ag}^+] \cdot [\text{Cl}^-] = K_s \quad (6.10)$$

pH di una soluzione e forma molecolare di un acido debole

La trattazione di questo argomento segue i canoni classici per la dimostrazione della cosiddetta equazione di Henderson-Hasselbach²⁴. È utile far immaginare agli allievi di avere una piccola quantità di acido debole²⁵ disciolto in una soluzione tamponata (in cui il pH sia praticamente costante). Ragionando con gli allievi si arriva alla conclusione che la maggior parte delle molecole dell'acido debole saranno presenti:

- come HA in soluzione molto acide (A^- lega gli H^+ presenti in abbondanza)
- come A^- in soluzione molto basiche (HA^- dona H^+ agli ioni OH^- presenti in abbondanza)

A partire dall'equazione (6.6), matematicamente si può vedere che deve valere:

$$\text{p}K_a = \text{pH} + \log [\text{HA}] / [\text{A}^-] \quad (6.11)$$

che è appunto l'equazione di Henderson-Hasselbach .

Quando $\text{pH} = \text{p}K_a$, si deve avere $\log ([\text{HA}] / [\text{A}^-]) = 0$, cioè $[\text{HA}] / [\text{A}^-] = 1$.

Ad un valore di pH corrispondente al $\text{p}K_a$ l'acido debole è dunque dissociato al 50%.

²⁴ vedi ad esempio P. Atkins, L. Jones, Principi di chimica, Zanichelli, 2002, pag. 550.

²⁵ per un esempio quantitativo si può usare l'aspirina, ovvero l'acido acetilsalicilico, $K_a = 3.236 \cdot 10^{-4}$.

Approfondimenti

L'ultimo risultato ha delle interessanti applicazioni in fisiologia e soprattutto farmacologia.²⁶ Visto che spesso solo la forma HA (ma non quella A^-) è in grado di oltrepassare facilmente la barriera lipofila rappresentata dalle membrane cellulari, l'assorbimento di un farmaco che chimicamente è un acido debole si avrà in situazioni per cui $pH < pK_a$.

Questo tipo di risultato è preso in considerazione anche nei trattamenti d'emergenza con sostanze in grado di acidificare o alcalinizzare l'urina: infatti tramite l'inibizione del riassorbimento a livello dei tubuli renali è possibile favorire l'escrezione di farmaci usati nei tentativo di suicidio come il fenobarbital²⁷.

6.4 Verifica delle conoscenze e competenze acquisite

Alla fine di questo capitolo agli allievi deve venir verificata l'acquisizione delle seguenti conoscenze e competenze:

- saper interpretare il ciclo del carbonio ed i problemi legati alle emissioni antropiche di CO_2 in termini di equazione di bilancio;
- saper effettuare calcoli stechiometrici su reazioni di combustione tenendo conto degli aspetti energetici;
- saper interpretare immissione, trasformazione e deposizione di inquinanti gassosi in termini di equazione di bilancio;
- conoscere le principali caratteristiche degli inquinati atmosferici (ossidi di azoto, ossidi di zolfo, ozono) e saper metterli in relazione con le misure di protezione dell'ambiente;
- saper interpretare le reazioni acido-base secondo i modelli di Arrhenius di Bronsted-Lowry;
- saper effettuare calcoli del pH di soluzioni di acidi deboli grazie alla costante di dissociazione K_a ;
- saper giustificare un equilibrio chimico grazie all'uso del potenziale chimico.

²⁶ vedi ad es. R.D. Howland, M.J. Mycek, Le basi della farmacologia, ed. Zanichelli, 2007, pp. 5-7.

²⁷ ibidem, pag.17.

7. Applicazioni in biologia

Questo capitolo è costituito da due moduli didattici (7.1 e 7.2) che possono essere svolti in maniera indipendente. Gli obiettivi generali sono di tre tipi:

- conoscitivo: bilancio idrico dei viventi (cap. 7.1), potenziale di membrana, potenziale d'azione in un neurone (cap. 7.2);
- euristico: equazione di bilancio (cap.7.1) e modello spinta-corrente-resistenza (cap. 7.2);
- metodologico: formulazione e verifica di ipotesi.

7.1 Bilancio idrico dei viventi

Prerequisiti

Conoscenze di base della fisiologia animale e vegetale¹ (concetti di fotosintesi, respirazione cellulare, assorbimento, traspirazione, escrezione, omeostasi), concetto di equilibrio e di regime stazionario (vedi anche cap.2).

Obiettivi

L'allievo dovrebbe arrivare ad interpretare in modo coerente una serie variegata di fenomeni in ambito biologico utilizzando lo strumento dell'equazione di bilancio (cap.2).

Strategia didattica

Partendo da una serie di situazioni (un laghetto, un vegetale e un animale) l'allievo è chiamato a individuare il sistema, le grandezze coinvolte ed i vari termini dell'equazione di bilancio (X ; I_{in} , I_{out} , π^+ , π^-), a comprendere quali tra questi termini siano rilevanti e a verificare le condizioni necessarie per un regime stazionario, riconoscendovi le basi fisico-chimiche dell'omeostasi. Mentre nel primo caso di studio si effettua un vero e proprio bilancio utilizzando dei dati di una ricerca legata alla sostenibilità di prelievi antropici in due laghi del Lazio (Medici, 2007)², negli altri due casi l'equazione di bilancio serve come spunto per individuare i possibili meccanismi per il mantenimento dell'omeostasi. In particolare si cerca di valutare l'importanza generale di questi processi (es. regolazione dell'apertura degli stomi) e gli adattamenti evolutivi (es. piante CAM) necessari per sopravvivere in un determinato ambiente. Secondo il livello di approfondimento desiderato questa unità didattica può richiedere da 8 a 10 ore-lezione.

Primo caso di studio: “laghetto”

La proposta didattica parte da una situazione già nota agli studenti in quanto utilizzata come spunto di riflessione introduttivo nel capitolo 2. In questo caso si intende discutere da un punto di vista quantitativo una situazione concreta tratta da uno studio effettivamente condotto. Questo permette di rendere esplicito per gli studenti il fatto che l'equazione di bilancio non è solo uno strumento teorico a scopi didattici, ma che ha una sua funzione in situazioni concrete, oggetti di studio, in vari campi scientifici.

Il percorso didattico scelto consiste nel riprendere in sessione plenaria l'equazione di bilancio 2.6 presentata nel capitolo 2:

$$\dot{X} = (I_X^{in} + I_X^{out}) + (\pi_X^+ + \pi_X^-) \quad (7.1)$$

¹ Il livello richiesto è paragonabile a quello proposto nelle UD 17,18,19 di “Invito alla biologia”, Curtis & Barnes (2003). Zanichelli, 2003; argomenti introdotti nel primo biennio di studi liceali.

² F. Medici –“Laghi Albano e di Bracciano: bilancio idrico e valutazione dei prelievi”, Geologia dell'ambiente, Vol. 15 (2007), N.2, pag. 2-5.

ricordando che per poterla applicare è necessario definire in primo luogo la grandezza di studio e riconoscere i confini del sistema: in seguito si può riflettere sugli scambi con l'esterno e valutare se vi siano produzione e distruzione interni.

A questo punto agli allievi viene distribuito il documento di lavoro che illustra la situazione di due laghi nel Lazio (Albano e Bracciano), documento riassunto qui di seguito per meglio comprendere l'attività proposta.

“I due laghi costituiscono una risorsa fondamentale d'acqua potabile e d'irrigazione, ma rivestono anche una notevole importanza naturalistica e turistica. Il lago di Bracciano ha come immissari varie sorgenti sotterranee, e due emissari: l'Arrone, con portata però nulla, e l'acquedotto Paolo, che porta a Roma l'acqua omonima alimentando anche fontane e giardini della Città del Vaticano. Il lago Albano, invece, è alimentato da polle subacquee ed ha un emissario artificiale di epoca romana dal quale dal 1992 non fluisce più l'acqua di esubero del lago. L'obiettivo della ricerca è quello di valutare, in condizioni stazionarie e d'abbassamento del livello idrometrico di riferimento del lago pari a zero ($\Delta h = 0$), i prelievi diretti d'acqua dai due laghi compatibili con il bilancio di massa”³.

I dati necessari per allestire un'equazione di bilancio, riassunti nella Tab. (7.1) sono pure messi a disposizione degli allievi: per scopi didattici sono però stati omessi sia i calcoli che le conclusioni del ricercatore, così da poter essere utilizzate come confronto con i risultati degli allievi.

Tab. (7.1): Dati necessari per effettuare il bilancio idrico dei due laghetti.

		lago Albano (6 km ²)	Lago di Bracciano (57 km ²)
		$\cdot 10^6$ m ³ /a	$\cdot 10^6$ m ³ /a
Precipitazioni annuali (P) + ruscellamento (R) ⁴	$P+R$	7,044	86,013
Bilancio tra afflussi sotterranei (S_e) e deflussi sotterranei (S_u)	$\Delta S = S_e - S_u$	2,428	18,761
Evap. dalla superficie lacustre e dal bacino imbrifero (E_v)	E_v	10,146	90,117
<i>Prelievo antropico sopportabile *(calcolato)</i>	P_{rel}	-0,674	14,657
*Valori non presentati nella Tab. a disposizione degli allievi			

Dopo una lettura individuale per contestualizzare la situazione segue un lavoro a gruppi di tre persone con delle consegne che spingono gli allievi a definire il sistema e i possibili interscambi di acqua con l'ambiente e a modellizzare la situazione a livello schematico come riassunto nella Fig. (7.1) (Medici, 2007).

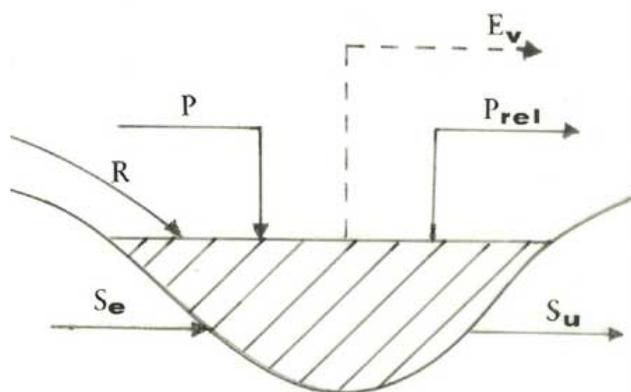


Fig. (7.1): Sistema di riferimento, con correnti in entrata ed uscita secondo la descrizione incontrata nel testo.

³ Adattato da: Medici, F. (2007). Laghi Albano e Bracciano: bilancio idrico e valutazione dei prelievi. *Geologia dell'ambiente*, 15 (2), 2-5.

⁴ In idrologia, il ruscellamento è il fenomeno di scorrimento delle acque piovane sulla superficie del terreno.

In seguito si devono correlare le grandezze indicate nel documento con quelle dell'equazione di bilancio semplificata giungendo così ad allestire la Tab. (7.2).

Tab. (7.2): Individuazione da parte degli allievi dei parametri da introdurre nell'equazione di bilancio.

Grandezza	descrizione
\dot{V}	$\Delta V/\text{anno} = 0$ (ipotesi di lavoro: il livello del lago deve rimanere costante)
I_V^{in}	$P + R + \Delta S$ (somma di tutti gli apporti di acqua indicati nel testo)
I_V^{out}	$E_V + P_{rel}$ (somma di tutte le perdite di acqua indicate nel testo)
π_V	In questo esempio si assume che non vi sia né distruzione né produzione di acqua ($\pi = 0$) ⁵

La discussione plenaria che segue prende spunto dal lavoro che alcuni gruppi presentato alla classe, in modo da giungere a delle constatazioni simili a quelle riportate di seguito.

Il sistema di riferimento “laghetto” è un sistema aperto dove si possono trascurare produzione e distruzione interna di acqua (es. legata alla dinamica della popolazione delle alghe), riducendo così l'equazione di bilancio alla forma:

$$\dot{X} = (I_V^{in} + I_V^{out}) \quad (7.2)$$

La risoluzione dell'equazione di bilancio valida nelle condizioni esposte dal documento, che infatti si riduce a delle somme e sottrazioni, permette in primo luogo di calcolare la portata dei prelievi diretti effettuabili per non alterare il livello idrometrico di riferimento.

Il bilancio negativo per il lago di Albano ($-6,74 \cdot 10^5 \text{ m}^3/\text{anno}$) indica che il volume d'acqua nel lago tende naturalmente a diminuire e che l'effetto dei prelievi non fa quindi che aggravare questo processo. Per il lago di Bracciano risulta invece un bilancio positivo ($1,466 \cdot 10^7 \text{ m}^3/\text{anno}$) che corrisponde al volume massimo di acqua prelevabile per mantenere lo *status quo* lacustre. La discussione diventa ulteriormente interessante al momento dell'interpretazione dei risultati e delle possibili conseguenze ecologiche (variazioni di temperatura, della massa di fitoplancton, ...).

È oltremodo importante concludere l'attività con il confronto tra i risultati degli allievi con le conclusioni a cui giunge l'esperto alla fine del suo studio: emerge così la reale applicabilità dello strumento usato nell'affrontare problemi concreti in ambito ecologico.

Rimanendo nel contesto dell'esercizio si può ancora riflettere sulle implicazioni derivanti dal fatto di aver considerato solo le variazioni del volume medio annuale, quindi senza aver considerato le possibili oscillazioni stagionali. Tali oscillazioni potrebbero avere un ruolo importante per quanto riguarda il fabbisogno idrico per l'agricoltura e per gli utenti della città di Roma, e quindi lo scenario potrebbe modificarsi ulteriormente.

Il problema del bilancio idrico e delle sue ripercussioni a livello ecologico e socioeconomico è di grandissima attualità nel contesto del surriscaldamento terrestre e dell'utilizzo indiscriminato della risorsa idrica per fini antropici, come i casi eclatanti del lago Ciad e del lago Aral⁶ ben esemplificano.

⁵ Per acqua è intesa la sostanza; risulta così, per il bilancio idrico, irrilevante l'aspetto legato allo stato di aggregazione.

⁶ Vedi: Micklin, P., & Aladin, N. V. (2008). Risanare il mare d'Aral. *Le Scienze* (p. 478).

Secondo caso di studio: un vegetale

Questo ed il prossimo caso di studio sono affrontati in modo prevalentemente qualitativo. L'equazione di bilancio può essere usata anche in questo modo: infatti essa esplicita chiaramente quali parametri determinano il bilancio idrico di un organismo, facilitando così l'identificazione di quegli accorgimenti anatomici e fisiologici che permettono la sopravvivenza in condizioni ambientali specifiche. Prima di iniziare l'attività vera e propria è necessario riprendere in classe alcuni concetti fondamentali di fisiologia vegetale.

L'acqua gioca un ruolo cruciale nella vita dei vegetali, costituendo più del 90% della massa della maggior parte dei loro tessuti. Il fabbisogno di diossido di carbonio da parte del processo fotosintetico espone le piante ad una perdita di acqua che deve essere regolata controllando l'apertura degli stomi. In una pianta vi è una corrente di acqua in entrata (necessaria anche per l'**assorbimento** minerale radicali) ed una in uscita (**traspirazione** fogliare, indispensabile per la termoregolazione). L'acqua è il **costituente più abbondante** del citoplasma, ed è un fondamentale fattore per la crescita della pianta: le nuove cellule devono infatti essere letteralmente riempite di acqua (fenomeno della turgidità). Oltre ad essere il **solvente universale** in ambito biologico, l'acqua è anche un **reagente limitante** per la fotosintesi, e partecipa, sempre come reagente, alle reazioni di idrolisi e idratazione. D'altro canto essa è un **prodotto** della respirazione cellulare e delle reazioni di condensazione.

Alcuni dati quantitativi permettono di meglio inquadrare il problema. Per ogni grammo di sostanza organica formata da una pianta devono essere assorbiti circa 500 g di acqua. Indicativamente possiamo considerare che la maggior parte dell'acqua assorbita dalle radici (ca. 97%) è persa nel processo di traspirazione mentre solo una piccola parte rimane nella pianta per sostenere l'accrescimento (ca. 2%) o serve come reagente per la fotosintesi e altri processi metabolici (ca. 1%). Una foglia esposta alla radiazione solare incidente perde al giorno una quantità di acqua pari a circa 10 volte la sua massa, e una pianta di grandi dimensioni può arrivare a traspirare dai 100 L ai 1'000 L di acqua al giorno, acqua che deve essere evidentemente assorbita dalle radici. Il mantenimento del bilancio idrico risulta quindi essere un processo delicato e rappresenta una vera e propria sfida per le piante terrestri.

Anche in questa attività in classe, svolta però in modo qualitativo, gli allievi devono iniziare col rappresentare schematicamente il sistema pianta ed a riflettere sui fattori da considerare vedi Fig. (7.2); in seguito devono associare questi fenomeni alle grandezze presenti nell'equazione di bilancio, vedi Tab. (7.3).

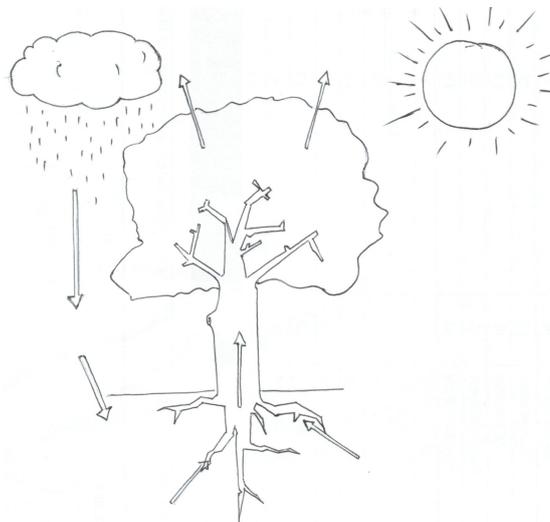


Fig. (7.2): Rappresentazione schematica del sistema pianta, nella quale sono evidenziati i principali scambi d'acqua con l'ambiente. (Le frecce rappresentano le correnti di acqua.)

Tab. (7.3): Processi principali idrico di un vegetale, e loro associazione alle variabili dell'equazione di bilancio.

Grandezza	descrizione
\dot{V}	Variazione giornaliera del volume d'acqua contenuto nella pianta. Visto che la pianta cresce deve valere $\dot{V} > 0$.
I_V^{in}	Volume d'acqua assorbito giornalmente dalle radici.
I_V^{out}	Volume d'acqua perso giornalmente attraverso la traspirazione.
π^+	Acqua che si forma giornalmente a seguito della respirazione cellulare e altri processi metabolici.
π^-	Acqua utilizzata giornalmente per la fotosintesi e altri processi metabolici.

Essendo l'acqua coinvolte in diverse reazioni chimiche, sarebbe di principio necessario includere nel bilancio idrico complessivo i termini di produzione e distruzione ($\pi_x^+ + \pi_x^-$); tuttavia per una tipica pianta l'entità di quest'ultimi termini rispetto ai flussi d'acqua in entrata ed uscita è trascurabile.

Per l'equazione di bilancio è anche importante considerare che una parte dell'acqua deve essere accumulata come tale nei tessuti in formazione: questo significa che, per avere una crescita, il bilancio idrico delle piante deve essere necessariamente positivo.

Possibili approfondimenti

Queste riflessioni permettono di aprire delle discussioni interessanti riguardo agli adattamenti anatomici (posizione degli stomi, ...) e fisiologici (piante CAM) delle piante ad ambienti con disponibilità idrica diversa⁷.

Si può anche entrare in discussioni di tipo socioeconomico ed ecologico, riflettendo sul bisogno di irrigazione delle colture (es.: *Zea mais*, *cotone*, ...) e ciò che questo comporta a livello ambientale globale.

Con classi più avanzate il discorso potrebbe essere ampliato anche studiando i meccanismi che governano il flusso dell'acqua⁸, utilizzando il modello spinta-corrente-resistenza, o approfondendo i problemi legati all'osmosi.

Terzo caso di studio: un animale

Come nel caso precedente l'attività degli allievi inizia con l'individuare le diverse componenti del bilancio idrico, prosegue con l'identificazione delle variabili presenti nell'equazione di bilancio, Tab. (7.4), e termina discutendo le diverse vie scelte dagli animali per sopravvivere in ambienti con disponibilità idrica completamente diversa.

Da un punto di vista didattico è efficace partire dall'essere umano per arrivare in un secondo tempo ad una generalizzazione. In questo modo emergono abbastanza facilmente le modalità di assunzione e perdita di acqua, come pure il concetto di acqua metabolica; vi è inoltre la possibilità di reperire più facilmente dei dati così da poter abbozzare un bilancio quantitativo, Tab. (7.5).

⁷ Per un approfondimento si veda: Venturelli, F., & Virli, L. (1995). *Invito alla botanica* (prima edizione ed.). Zanichelli, Tab.6.1, p.169.

⁸ Per approfondire vedi: Pupillo, P., Cervone, F., Cresti, M., & Rascio, N. *Biologia vegetale*. Zanichelli, p. 201-202.

Tab. (7.4): Processi principali coinvolti nel bilancio idrico di un animale, e loro associazione alle variabili dell'equazione di bilancio.

Grandezza	descrizione
\dot{V}	Variazione giornaliera del volume d'acqua nel corpo dell'animale adulto. (Non vi è più crescita, quindi: $\dot{V} = 0$.)
I_V^{in}	Somma dei volumi d'acqua assunta giornalmente con i liquidi e gli alimenti (cosiddetta acqua preconstituita).
I_V^{out}	Somma dei volumi d'acqua che è traspirata ogni giorno, eliminata con le urine, con le feci e con l'espiazione.
π^+	Acqua metabolica ⁹ prodotta giornalmente dall'ossidazione degli alimenti (respirazione cellulare).
π^-	Acqua utilizzata giornalmente per l'idrolisi di macromolecole e altre reazioni chimiche.

Tab. (7.5): Bilancio idrico giornaliero medio in un individuo maschio adulto di taglia media. Fonte: J.M. Orten. O.W. Neuhaus, 1982 (modificata).

Acqua assunta	g	Acqua eliminata	g
Acqua bevuta	450	Traspirazione	500
Altre bevande	600	Espiazione	350
Con cibi solidi	730	Urina	1100
Acqua metabolica	320	Feci	150
Totale	2100	Totale	2100

Una visione d'insieme sulle diverse vie metaboliche e modalità di scambio di acqua può essere discussa in classe grazie alla Fig. (7.3) (Willmer, Stone, & Johnston, 2003)¹⁰.

Si possono inoltre toccare alcuni aspetti fisiologici legati al bilancio idrico in situazioni estreme, come per esempio il guadagno netto di acqua metabolica nel ratto canguro (adattato alla vita nel deserto) e confrontarli con la situazione di un ratto normale, vedi Tab. (7.6) (Hill, Wyse, & Anderson, 2006)¹¹.

Tab. (7.6) Ricavi e perdite d'acqua (approssimati) nel catabolismo di ratti canguro (*Dipodomys*) in cattività e di ratti di laboratorio (*Rattus*), nutriti con orzo essiccato all'aria e privati di acqua da bere. Condizioni ambientali: 25°C e 33% di umidità relativa.

Tipo di ricavo o di perdita idrica	Ratti canguro	Ratti di laboratorio
Produzione lorda di acqua metabolica	0,54 g/d	0,54 g/d
Perdite idriche obbligate		
Respiratorie	0,33	3,33
Urinarie	0,14	0,24
Fecali	<u>0,00</u>	<u>0,03</u>
Perdite idriche obbligate totali	0,47	0,60
Guadagno netto di acqua metabolica	+0,07	-0,06

⁹ Per il bilancio dell'acqua metabolica è da considerare la produzione di acqua metabolica da parte di un certo processo, sottratte le perdite idriche necessarie allo svolgimento del processo stesso.

¹⁰ Willmer P. et al., *Fisiologia ambientale degli animali*, ed. Zanichelli 2003 (cap.5, p.81).

¹¹ Allegato tratto da: R. Hill et al., *Fisiologia animale*, ed. Zanichelli 2006, p.751.

Dai dati presentati sopra si capisce facilmente che è limitando le perdite d'acqua il ratto canguro, perfettamente adattato alla vita nel deserto riesce ad avere un bilancio idrico positivo, e quindi a sopravvivere in condizioni particolarmente ostiche.

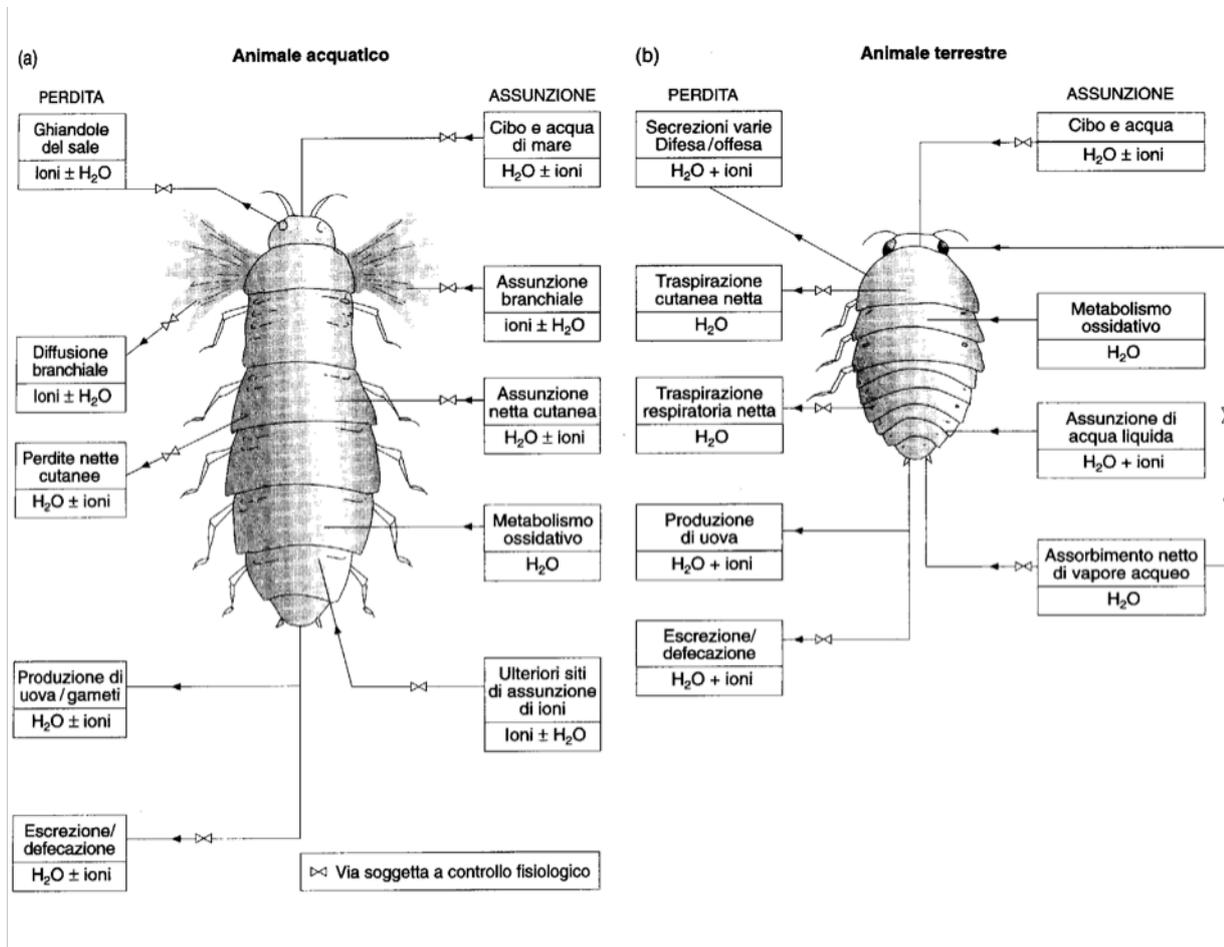


Fig. (7.3): Le vie attraverso le quali si ha la perdita o l'assunzione di acqua e ioni negli animali acquatici (a) e negli animali terrestri (b).

Possibili approfondimenti

Spunto di riflessione per aprire il discorso della osmoregolazione potrebbero essere: il celebre verso del poeta Coleridge (tratto da *The Rime of the Ancient Mariner*: "Acqua, acqua, ovunque, e non una goccia da bere"), oppure il volantino della campagna di sensibilizzazione dell'UNICEF sull'uso dei sacchetti ORT (Oral Rehydration Therapy).

Si può pure approfondire l'aspetto stechiometrico del ricavo metabolico di acqua da diversi alimenti ricchi di carboidrati, proteine oppure grassi. Il catabolismo proteico produce composti azotati di rifiuto che per essere eliminati richiedono quantità di acqua che dipendono dal tipo di sostanza azotata da eliminare (ammoniaca, urea, acido urico, ...) (Curtis & Barnes, 2003)¹², a questo proposito si rimanda agli esercizi 2.6 e 2.7 negli allegati digitali.

¹² Curtis & Barnes (2003). *Invito alla biologia*, Zanichelli, cap. 28 (gli animali devono eliminare le sostanze azotate di rifiuto).

7.2 Il potenziale di membrana ed il potenziale d'azione

Prerequisiti

Conoscenze di base sulla struttura cellulare e sulla comunicazione tra cellula e ambiente¹³ (struttura della membrana cellulare, proteine di trasporto, diffusione, trasporto attivo, ambiente ionico intracellulare ed extracellulare). Conoscenze di base sul neurone¹⁴ (concetto di potenziale di membrana¹⁵, concetto di potenziale d'azione), modello spinta-corrente-resistenza (cap. 3.6; cap. 4.1), concetto di equilibrio e di regime stazionario (cap. 2.1.4).

Obiettivi

L'allievo sa interpretare in modo coerente alcuni processi di trasporto attraverso le membrane cellulari utilizzando il modello spinta-corrente-resistenza. Grazie alle analogie che emergono con situazioni simili a quelle già presentate in ambito chimico e fisico (cap. 3-6), l'allievo arriva a riconoscere appieno l'utilità e la versatilità del modello proposto.

Strategia didattica

Il potenziale di membrana è tanto fondamentale per la cellula e le sue attività come difficile da comprendere per allievi di terza liceo. In quest'approccio si è scelto di affrontare l'argomento in due fasi. In quella preliminare l'allievo si familiarizza con i fenomeni legati al potenziale di membrana e d'azione grazie ad un'introduzione simile a quella degli usuali libri di testo (quattro ore-lezione). Questa conoscenza del campo di studio è essenziale affinché nell'allievo sorgano curiosità e interesse per ulteriori approfondimenti. In una seconda fase, le due attività che seguono, presentate in questo capitolo, permettono allo studente di comprendere qualitativamente questa situazione biologica complessa.

La prima attività, grazie ad una semplificazione del fenomeno da studiare, pone l'accento sul come esso possa realizzarsi (7.2.1), permettendo all'allievo di impadronirsi degli elementi che nella seconda attività utilizza per giustificare l'esistenza del potenziale di membrana attraverso lo strumento spinta-corrente-resistenza (7.2.2). A dipendenza del livello di approfondimento desiderato l'intera unità didattica può richiedere da 12 a 14 ore-lezione.

Basi teoriche

In questo paragrafo si riprendono quelle nozioni essenziali che gli allievi devono conoscere a questo punto della loro formazione, e che sono appunto necessarie per lo sviluppo del modulo.

Una membrana biologica è costituita da un doppio strato di fosfolipidi dello spessore di 7-10 nm, nel quale si trovano inserite delle proteine che ne specificano la funzionalità. Il doppio strato di fosfolipidi, con una parte centrale idrofoba e ai lati le teste idrofile, forma una barriera invalicabile per molte specie chimiche, vedi Fig. (7.4)-(a) (Hill et al., 2006)¹⁶, tra cui gli ioni che possono attraversare il doppio strato fosfolipidico in modo significativo solo grazie a specifiche proteine. Il movimento di soluti carichi, oltre a risentire di gradienti di concentrazione, è influenzato da forze di attrazione o repulsione elettrica generate dal movimento stesso di questi soluti. Una specie ionica è

¹³ Il livello richiesto è paragonabile a quello proposto in Curtis & Barnes (2003), cap.5 pp.58-59 e cap. 6, pp. 72-79; si tratta di argomenti già trattati nel primo biennio.

¹⁴ Il livello richiesto è paragonabile a quello proposto in Curtis & Barnes (2003), cap. 32 pp. 454-457; questo argomento con un'introduzione più generale al sistema nervoso, viene trattato durante questo corso nel contesto del modulo "luce e visione".

¹⁵ Il docente interessato troverà una trattazione rigorosa e completa in Chang, R. (2000). *Physical Chemistry for the chemical and biological sciences*. University Science Books. pp.381-385 o un breve riassunto in Koolman, J., & Röhm, K.-H. (1997). *Testo atlante di biochimica*. Zanichelli, p.312.

¹⁶ Tratto da: Hill, R., Wyse, G., & Anderson, M. (2006). *Fisiologia animale* (prima ed.). Zanichelli.

spinta ad attraversare la membrana fino al momento in cui la spinta causata dal gradiente di concentrazione¹⁷ uguaglia quella dovuta a una distribuzione eterogenea della carica; si instaura così un equilibrio elettrochimico¹⁸. Il potenziale elettrico misurato in queste condizioni tra le due facce della membrana è definito potenziale di membrana Fig. (7.4)-(b).

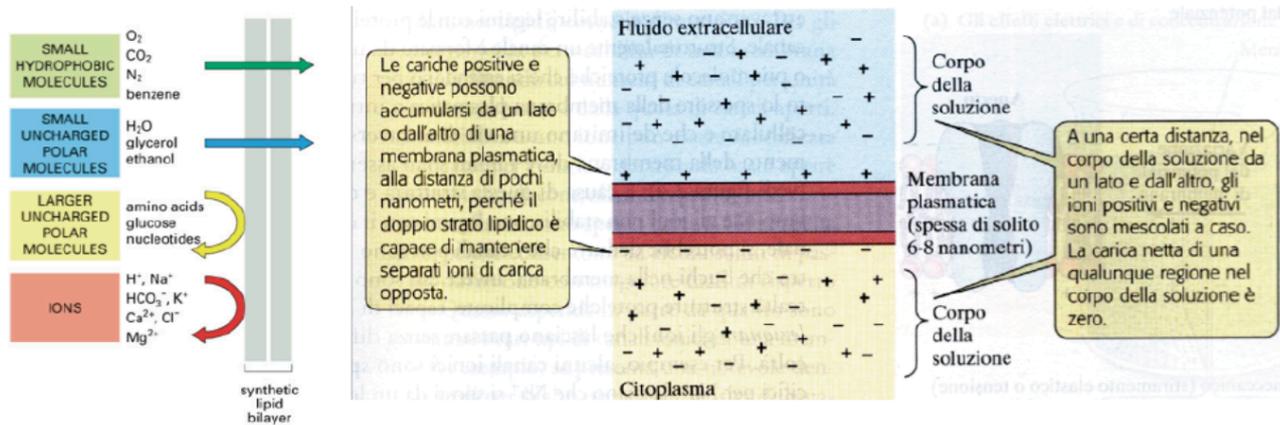


Fig.(7.4): a) Permeabilità attraverso il doppio strato fosfolipidico.

b) Separazione di carica ai due lati della membrana.

Le proteine determinanti per il potenziale di membrana sono dei canali selettivi per gli ioni potassio e sodio (voltage non-dipendenti) e la pompa specifica per questi ioni Fig. (7.5) (Curtis & Barnes, 2003)¹⁹. La distribuzione asimmetrica degli ioni tra le due facce della membrana (Tab. (7.7)) garantisce il mantenimento di una differenza di potenziale elettrico, di circa -60 mV, che può essere misurato come si vede in Fig. (7.6) (Chang, 2000).

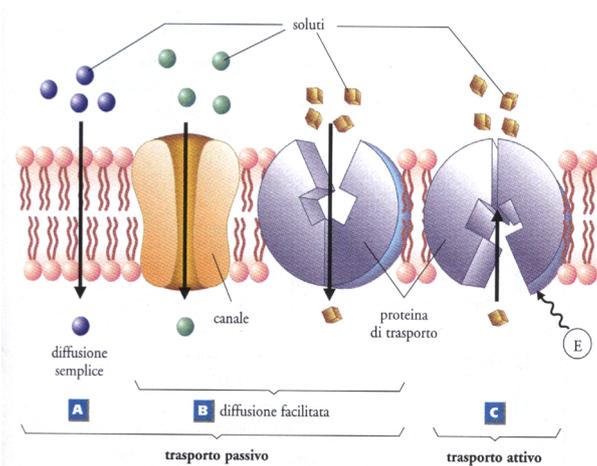


Fig. (7.5): Modalità di passaggio dei soluti attraverso la membrana.

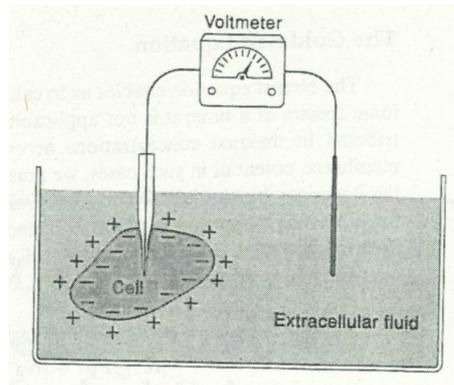
¹⁷ Per una trattazione rigorosa occorrerebbe considerare subito la differenza di potenziale chimico, approccio che sarà utilizzato più in là nel modulo didattico.

¹⁸ Vale la pena ricordare che il numero di ioni che devono spostarsi affinché si instauri l'equilibrio elettrochimico è trascurabile rispetto alle concentrazioni ioniche dei due compartimenti. (Chang, 2000, p. 383).

¹⁹ Tratto da: Curtis & Barnes (2003). *Invito alla biologia* (quinta ed.). Zanichelli. È importante notare che i canali permettono il passaggio selettivo di ioni grazie ad un processo passivo (diffusione), mentre la pompa effettua un processo di trasporto attivo che richiede quindi un apporto energetico.

Tab. (7.7): Distribuzione degli ioni principali alle facce opposte di una tipica cellula nervosa (Chang (2000), p.382).

ione	concentrazione / mmol/L	
	intracellulare	extracellulare
Na ⁺	15	150
K ⁺	150	5
Cl ⁻	10	110

**Fig. (7.6):** Apparecchiatura sperimentale per la misura della differenza di potenziale tra i due lati della membrana.

Per quanto riguarda il potenziale d'azione, proprietà caratteristica delle cellule eccitabili, entrano in gioco dei canali a controllo di potenziale per gli ioni sodio e potassio in grado di aprirsi e chiudersi in risposta ad uno stimolo, così da modificare momentaneamente il potenziale di membrana, Fig. (7.7) (Curtis & Barnes (2003))²⁰

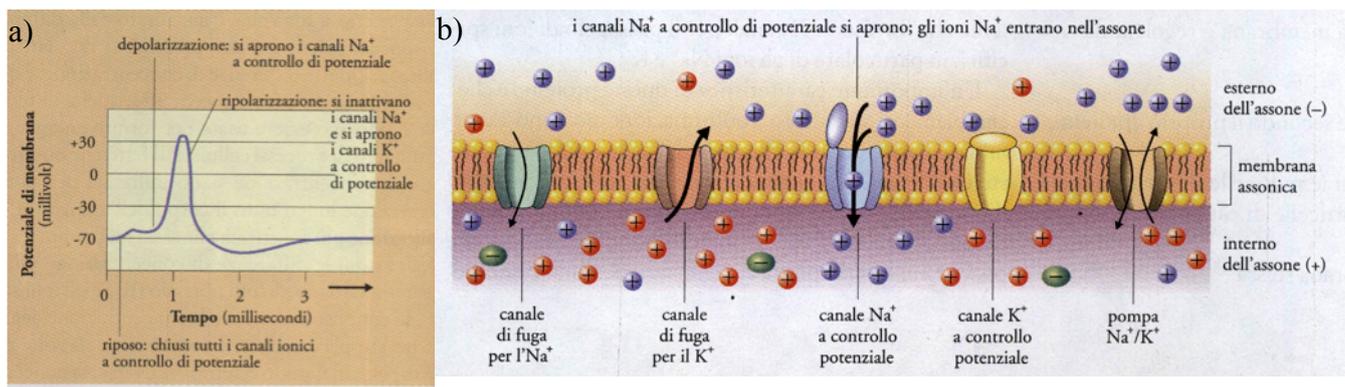


Fig. (7.7): a) Grafico di un potenziale d'azione e dei flussi ionici associati.
 b) Potenziale d'azione: i canali del sodio a controllo di potenziale si aprono e gli ioni Na⁺ penetrano all'interno dell'assone; la polarità della membrana momentaneamente si inverte.

²⁰ Curtis & Barnes (2003). *Invito alla biologia*: Zanichelli. p.456. Il docente interessato, ad una trattazione più rigorosa e completa può trovare ulteriori informazioni in: Koolman et al. (1997). *Testo atlante di biochimica*: Zanichelli; Chang (2000). *Physical Chemistry for the chemical and biological sciences*. University Science Books; Lodish et al. (2002). *Biologia molecolare della cellula*: Zanichelli.; Voet et al. (2001). *Fondamenti di biochimica*: Zanichelli.

7.2.1 Costruzione di un modello cellulare di riferimento.

La prima ora-lezione di questo modulo è dedicata alla ripresa del concetto di potenziale di membrana²¹ utilizzando il percorso proposto da Lodish (Lodish et al., 2002)²².

La comprensione di come si forma un potenziale di membrana partendo da un semplice sistema chimico (Fig. (7.8)) permette di estrapolare alla situazione cellulare. Gli allievi prendono coscienza di tre aspetti rilevanti quali: il ruolo della membrana e dei canali ionici, la diffusione di ioni attraverso la membrana secondo il gradiente di concentrazione e, connesso a ciò, il potenziale elettrico che si forma ai due lati della membrana selettivamente permeabile. L'allievo deve ripassare i prerequisiti biologici, identificare il sistema di studio con i suoi confini e iniziare a visualizzare i possibili flussi di ioni e le conseguenze ad essi legate²³.

Attività didattica

Nella scheda di lavoro 1 (vedi allegato) distribuita agli allievi, è richiesto loro di:

- ripassare le nozioni di base legate alla composizione e struttura cellulare (citosol, plasma²⁴ e membrana);
- semplificare la composizione di citosol e plasma (ambiente extracellulare), tenendo in considerazione solo gli ioni sodio, potassio e cloruro. La situazione citosolica può essere rappresentata da una soluzione 15 mM di Na^+ , 150 mM K^+ e 165 mM Cl^- mentre quella plasmatica da una soluzione 150 mM di Na^+ , 15 mM K^+ e 165 mM Cl^- ;
- studiare l'effetto della corrente di ioni attraverso dei modelli di membrane (impermeabile o permeabile ad una sola specie ionica).

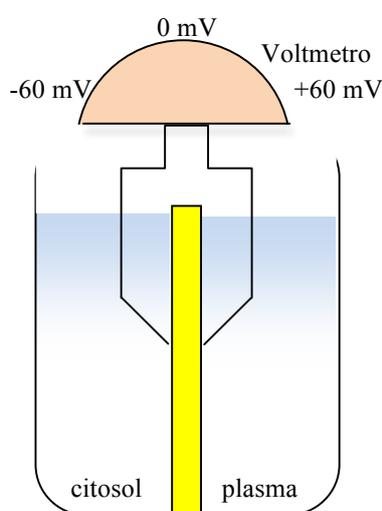


Fig. (7.8): Schema muto che rappresenta l'apparato sperimentale per generare un potenziale elettrico attraverso una membrana che separa due soluzioni rappresentanti rispettivamente il citosol e il plasma. L'allievo è tenuto a completarlo in relazione alle tre situazioni proposte durante l'attività didattica.

²¹ Il potenziale di membrana è definito come il potenziale elettrico fondato dalla differenza delle concentrazioni ioniche ai lati della membrana. (Chang, 2000, p. 382).

²² Lodish, H., Berk, A., Zipursky, L., Matsudaira, P., Baltimore, D., & Darnell, J. E. (2002). *Biologia molecolare della cellula*: Zanichelli. Cap. 15, p. 676f.

²³ Se si auspica un maggior livello di approfondimento, è possibile lavorare anche quantitativamente sui concetti di potenziale chimico, potenziale elettrico e potenziale elettrochimico. Spunti in: Özkaya et al., JCE Vol.83 No. 11 November 2006, in particolare negli allegati digitali digitali Online p.16-17, e in Voet, D., Voet, J. G., & Pratt, C. W. (2001). *Fondamenti di biochimica*: Zanichelli, p. 303.

²⁴ Inteso come mezzo extracellulare.

La scheda propone uno schema muto (Fig. (7.8)) che rappresenta l'apparato sperimentale per generare un potenziale elettrico attraverso una membrana che separa le due soluzioni che simulano il citosol e il plasma.

L'ipotetico apparato sperimentale è costituito da due compartimenti separati da una membrana: vi sono quindi due sistemi ed un'interfaccia. In ogni compartimento vi è una soluzione salina; in un caso essa rappresenta l'ambiente extracellulare (compartimento di destra) e nell'altro quello intracellulare (compartimento di sinistra). Un voltmetro è connesso alle due soluzioni così da misurare la differenza di potenziale elettrico attraverso la membrana: si determina in questo modo il cosiddetto potenziale di membrana. Le tre situazioni sperimentali proposte si differenziano le une dalle altre per una diversa permeabilità della rispettiva membrana.

In Fig. (7.9)²⁵, "cellula_{L1}", la membrana è impermeabile: non vi è possibilità di scambio tra i due compartimenti, le soluzioni sono come tali neutre, si deduce che non possa esserci una differenza di potenziale elettrico²⁶.

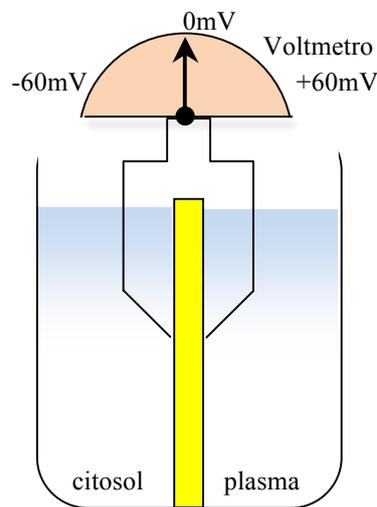


Fig. (7.9): Membrana impermeabile agli ioni Na^+ , K^+ e Cl^- .

Lo schema rappresenta il risultato della situazione sperimentale con una membrana impermeabile: la differenza di potenziale elettrico misurata è nulla.

²⁵ Modificato da Lodish, et al. (2002). *Biologia molecolare della cellula*: Zanichelli.

²⁶ Come approfondimento si può lavorare direttamente sul potenziale chimico, sfruttando così le competenze acquisite nel cap.4. Utilizzando infatti la relazione 4.5 si giunge a

$$\Delta\mu = RT \ln\left(\frac{[\text{Na}^+]_2 [\text{K}^+]_2}{[\text{Na}^+]_1 [\text{K}^+]_1}\right).$$

Essendo uguali i prodotti delle concentrazioni degli ioni coinvolti nei due compartimenti si nota che $\Delta\mu = 0$. Bisogna però prestare attenzione al fatto che in questo approccio si sono utilizzati i valori della concentrazione e non quelli dell'attività: dunque si conclude che la differenza di potenziale chimico è approssimativamente 0.

In Fig. (7.10)²⁷, "cellula_{L2}", la membrana è selettivamente permeabile per gli ioni sodio, che risultano quindi essere gli unici che possono attraversarla.

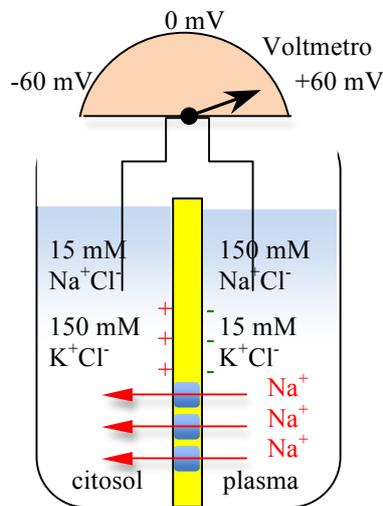


Fig. (7.10): Membrana permeabile solo agli ioni Na^+ .

Lo schema rappresenta il risultato della situazione sperimentale con una membrana permeabile agli ioni sodio. All'equilibrio elettrochimico la differenza di potenziale elettrico misurata è +59 mV, con il lato destro negativo rispetto al sinistro.

■ = canale per Na^+

La riflessione si focalizza sull'effetto della differente concentrazione ionica ai due lati della membrana e sugli effetti del conseguente flusso di particelle cariche²⁸: la separazione di carica fornisce la possibilità di misurare una differenza di potenziale elettrico tra i due compartimenti. Nel caso specifico si nota come il flusso di ioni sodio porti ad avere un eccesso di cariche negative all'interno del compartimento rappresentante il liquido extracellulare, cariche che si addensano nei pressi della membrana, richiamando così cariche positive al lato citosolico. S'instaura un equilibrio elettrochimico per lo ione sodio, con le due spinte causate rispettivamente dal gradiente di concentrazione (e dunque differenza di potenziale chimico, $\Delta\mu$) e dalla distribuzione eterogenea delle cariche (e dunque differenza di potenziale elettrico, $\Delta\phi$) che saranno uguali e opposte, impedendo un'ulteriore diffusione degli ioni sodio verso il comparto a sinistra. La differenza di potenziale elettrico misurato dal voltmetro è di +59mV.

Mostrando agli allievi la soluzione proposta in Lodish, ci si sofferma sul fatto che le concentrazioni finali sono praticamente quelle iniziali; se ne deduce che solo una piccola frazione degli ioni sodio partecipa alla formazione del potenziale di membrana, non alterando così le concentrazioni ioniche nei due comparti!²⁹

²⁷ Modificato da Lodish, et al. (2002). *Biologia molecolare della cellula*: Zanichelli.

²⁸ Il modello spinta-corrente-resistenza non viene ancora richiesto in modo esplicito nell'interpretazione del sistema: si lavora unicamente con le concentrazioni e non con il potenziale chimico.

²⁹ Questo fatto è evidenziato sia in Lodish et al. (2002) (p. 676) che in Chang (2000) (p. 383, Fig.10.14).

Nella Fig. (7.11)³⁰, "cellula_{L3}", la membrana è permeabile ai soli ioni potassio. Analogamente al caso appena discusso si arriva a prevedere una situazione finale di equilibrio elettrochimico; questa volta è coinvolto lo ione potassio, con un eccesso di cariche negative nel compartimento che rappresenta il citosol. Il Voltmetro misura una differenza di potenziale elettrico negativa (nell'esempio: -59 mV).

Confrontando la distribuzione di cariche ai due lati della membrana cellulare come esposta nel manuale (Curtis & Barnes (2003)) e le situazioni appena descritte, risulta che il terzo modello, denominato "cellula_{L3}" e rappresentato in Fig.(7.11), è quello che meglio si adatta alla situazione biologica con il lato citosolico della membrana negativo. Gli allievi giungono così a ipotizzare che il potenziale di membrana a riposo è determinato in modo preponderante dalla permeabilità della membrana agli ioni potassio³¹.

A questo punto gli allievi confrontano il modello "cellula_{L3}" appena studiato con una cellula di un organismo, riassunta in Fig. (7.12) (Hill et al., 2006).

La discussione verte in primo luogo sulla differenza di permeabilità nei confronti degli ioni che contraddistinguono la membrana della "cellula_{L3}" e quella di una cellula di un organismo:

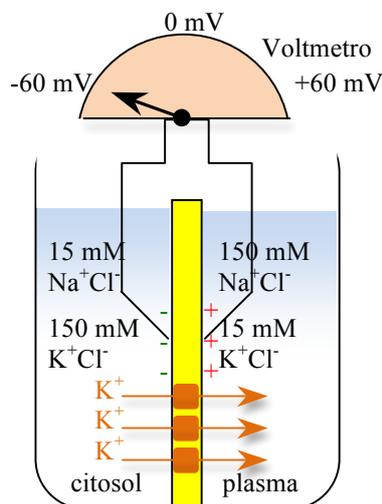


Fig. (7.11): Membrana permeabile solo agli ioni K^+ .

Lo schema rappresenta il risultato della situazione sperimentale con una membrana permeabile agli ioni potassio. All'equilibrio elettrochimico la differenza di potenziale elettrico misurata è -59 mV, con il lato destro positivo rispetto al sinistro.

■ = canale per K^+

- la "cellula_{L3}" è dotata di una membrana permeabile solo agli ioni potassio che porta all'instaurarsi dell'equilibrio elettrochimico con il relativo potenziale di membrana;
- la membrana di una cellula di un organismo, dal canto suo, è permeabile sia agli ioni sodio che potassio: ci si aspetta quindi una distribuzione ionica uguale ai due lati con relativo azzeramento del potenziale di membrana.

³⁰ Modificato da Lodish, H., Berk, A., Zipursky, L., Matsudaira, P., Baltimore, D., & Darnell, J. E. (2002). *Biologia molecolare della cellula* (seconda ed.). Zanichelli.

³¹ Un approfondimento a livello superiore lo si trova in Lodish et al. (2002), pp. 676-7.

In seguito occorrerà inoltre riflettere sul ruolo assunto nella cellula dalla pompa sodio-potassio. Il modello "cellula_{L3}" risulta quindi incompleto e non pienamente soddisfacente per lo studio dei processi di nostro interesse che avvengono in una cellula di un organismo. Grazie all'analogia con un sistema idraulico (situazione 2: il regime stazionario, p. 20), presentata in questo lavoro, si intende dare agli allievi gli strumenti necessari per poter interpretare qualitativamente questo fenomeno utilizzando un modello di cellula più completo.

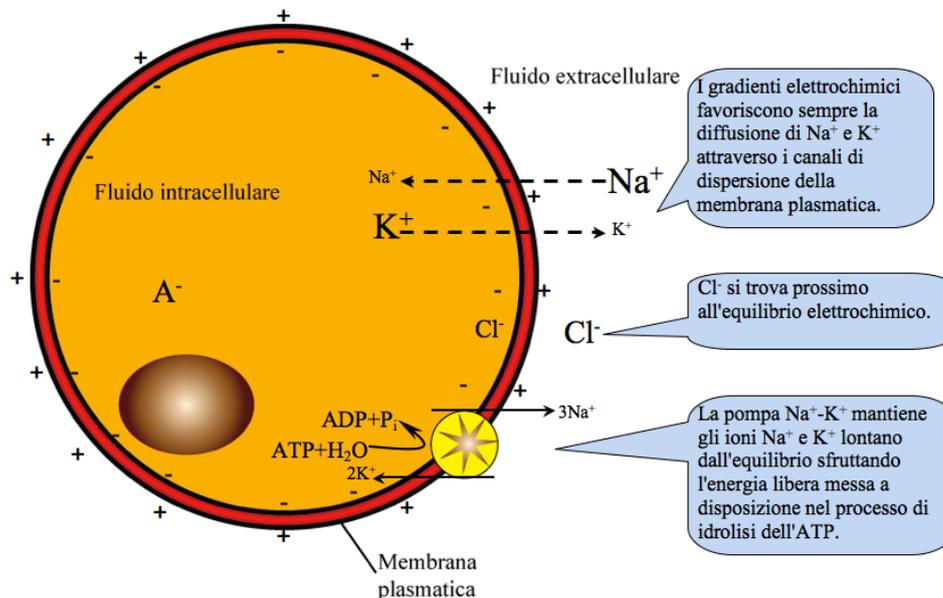


Fig.(7.12): Schema riassuntivo del trasporto attivo e passivo tipici della cellula animale. Le proteine, che nel complesso sono anioniche e hanno simbolo A^- , sono intrappolate nella cellula.

7.2.2 Equilibrio e regime stazionario

La sequenza di attività didattiche che seguono si servono dello strumento spinta-corrente-resistenza per interpretare il tipo di situazioni biologiche illustrate in precedenza con una logica plausibile e coerente.

Gli allievi incontrano nuovamente le grandezze introdotte con l'equazione di bilancio (vedi cap. 2) e con il modello di spinta-corrente-resistenza (vedi cap. 3). Le situazioni atte ad approfondire i concetti di equilibrio e regime stazionario³² sono verificate sperimentalmente in classe utilizzando un sistema idraulico³³ costituito da due vasi comunicanti. L'apparecchio può essere realizzato unendo tra loro due recipienti tramite un tubo di plastica a metà del quale è stato inserito un evidenziatore di flusso e un piccolo rubinetto di vetro o un altro dispositivo che permette di alterare la corrente d'acqua³⁴.

³² Vedi anche cap. 2.1.4.

³³ Per semplicità si parla di **sistema** facendo riferimento all'intero apparecchio costituito dai **due vasi** comunicanti. Per interpretare i fenomeni osservati è però meglio considerare l'apparecchiatura come costituita da **due sistemi** distinti che vengono messi a contatto tra loro.

³⁴ Materiale per la costruzione dell'apparecchiatura:

- una pompa per acquari da 12V,
- due bottiglie da 1,5L di PET (vasi)
- tubo (sezione = ca. 1cm), dotato di un evidenziatore di flusso e di un rubinetto regolabile
- alimentatore.

Il sistema idraulico ha i seguenti vantaggi:

- è già conosciuto (cap. 2 e cap. 4) con le grandezze fisiche necessarie per descriverlo;
- gli esperimenti sono di facile e veloce esecuzione;
- è flessibile nell'adattarsi alle richieste che si aggiungono passando da una situazione alla successiva richieste dall'unità didattica;
- porta a risultati chiari ed eloquenti.

Definite le grandezze in gioco in questo sistema ($\Delta p, I_V, R$) l'allievo identifica le grandezze analoghe nella "cellula_{L3}" ($\Delta\mu, I_n, R$) per poi traslarle al sistema cellula come chiave per l'interpretazione del potenziale di membrana e del potenziale d'azione.

Gli allievi hanno a disposizione una scheda con degli schemi muti da completare che riassumono i tre esperimenti proposti in seguito. La scelta didattica adottata consiste nell'affrontare sempre nel medesimo modo le situazioni descritte nella scheda, infatti:

- gli allievi elaborano una previsione;
- in classe si esegue l'esperimento e si constata il risultato;
- si procede ad un confronto tra il risultato atteso e quello ottenuto;
- si individua un'analogia a livello del modello di spinta corrente e resistenza;
- si discute la coerenza delle conclusioni a cui si giunge.

A guidare gli allievi in questo percorso vi sono tre richieste, riprese con i rispettivi obiettivi nella tab. (7.8).

L'attenzione è posta su tre momenti ben precisi: la situazione di partenza dell'esperimento ("inizio"), il regime variabile ("durante") e la situazione finale ("fine").

Tab. (7.8): Richieste presenti negli schemi muti distribuiti agli allievi con i relativi obiettivi.	
richiesta:	obiettivo:
Dai un titolo alla situazione.	Far riconoscere la situazione (es. equilibrio).
Descrivi l'andamento di \dot{V} , I^{in} , I^{out} per ciascun vaso in funzione del tempo.	Indicare agli allievi cosa considerare come parametri da osservare per il bilancio.
Motiva sempre le tue scelte con un breve commento.	Far utilizzare il modello spinta-corrente-resistenza per interpretare il fenomeno rappresentato.

Per ottenere un risultato soddisfacente è importante verificare che gli allievi sappiano descrivere con precisione l'impianto sperimentale, riconoscere i due sistemi in gioco e capire come e dove possano avvenire scambi tra di essi. Questa fase preliminare è molto importante: è necessario discutere le ipotesi proposte dagli allievi in modo accurato prima di eseguire la verifica sperimentale. Infatti già in questa fase introduttiva gli allievi modificano la loro previsione sulla base di osservazioni emerse dal confronto con i compagni.

Di seguito sono prese in esame ad una ad una le tre situazioni proposte nella scheda didattica.

Situazione 1: Lo stato di equilibrio

Lo studio di un sistema idraulico

La "situazione 1" è fondamentalmente simile a quella proposta nel cap. 4.1 (Situazione A); l'introduzione all'attività ed il suo svolgimento richiedono due ore-lezione. Gli allievi tendono generalmente a definire la situazione finale come di "equilibrio"; l'accento nell'intervento del docente deve essere posto sull'identificazione dei due sistemi comunicanti, sui punti tra i quali si misura la spinta e sulla fase di regime variabile.

L'esecuzione di questa esperienza, come delle successive, richiede poco tempo, da permettere di ripeterla, e discutere di volta in volta gli aspetti particolari emersi durante l'osservazione³⁵.

Ad esempio si può discutere:

- cosa comporta avere diametri diversi dei due vasi (vedi anche cap. 4.1);
- l'effetto del flusso che si ottiene variando l'apertura del rubinetto (resistenza). In merito è utile far notare che la modifica della resistenza influisce sul tempo richiesto per raggiungere l'equilibrio ma non ha effetto alcuno sull'equilibrio stesso;
- la variazione del livello d'acqua in un recipiente o direttamente la variazione del flusso, in funzione del tempo. In merito, per esempio con l'ausilio di un grafico, si cerca la relazione tra la variazione e la spinta³⁶.

In Fig. (7.13) è illustrata la scheda completata da parte degli studenti per la situazione 1.

Analogie tra il sistema idraulico e il modello di cellula

I fenomeni studiati nell'ambito del sistema idraulico grazie al modello spinta-corrente-resistenza aiutano l'allievo ad interpretare qualitativamente processi biochimici che avvengono ai lati di una membrana semipermeabile.

La discussione iniziale pone l'accento su aspetti metodologici, quali:

- l'identificazione di grandezze analoghe per la spinta (differenza di potenziale idrico), alla corrente (del volume di acqua) e alla resistenza (tubi);
- lo studio della variazione di grandezze in un sistema semplificato ("cellula_{L3}"³⁷) così da poterne dedurre i rispettivi effetti.

A questo punto risulta utile il lavoro di attenta descrizione del sistema idraulico. Nell'apparato idraulico vi sono due vasi con dell'acqua collegati da un tubo, attraverso il quale il liquido può passare. Analogamente nel sistema "cellula_{L3}" vi sono due ambienti (citosol e plasma) collegati da una membrana che permette lo scambio di ioni.

Nel modello idraulico la spinta è data dalla differenza di pressione che esiste alla base dei due vasi comunicanti. Per quanto riguarda il modello chimico, le particelle che possono fluire sono gli ioni potassio e la spinta è inizialmente attribuita alla differenza di potenziale chimico (in questo caso riconducibile alla differenza di concentrazione) tra i due compartimenti. Per quanto riguarda il concetto di spinta chimica alcuni allievi si riferiscono al "secondo caso di studio: diffusione di un colorante" discusso nella parte di chimica (cap. 4).

Alla luce di queste riflessioni si può asserire che il recipiente 1 rappresenta il citosol mentre il recipiente 2 rappresenta l'ambiente extracellulare. Il tubo rappresenta il canale per gli ioni potassio. La pressione dell'acqua rappresenta l'analogo della concentrazione (c_{K^+}) di ioni potassio, vedi Tab. (7.9).

³⁵ Ad esempio è possibile riallacciarsi al cap.2.4, Fig.2.7 (svuotamento di un recipiente).

³⁶ Per uno studio quantitativo sarebbe meglio utilizzare dell'olio, riducendo così problemi legati alla turbolenza dell'acqua.

³⁷ È il sistema che si avvicinava ad un potenziale elettrico simile al potenziale di membrana della cellula.

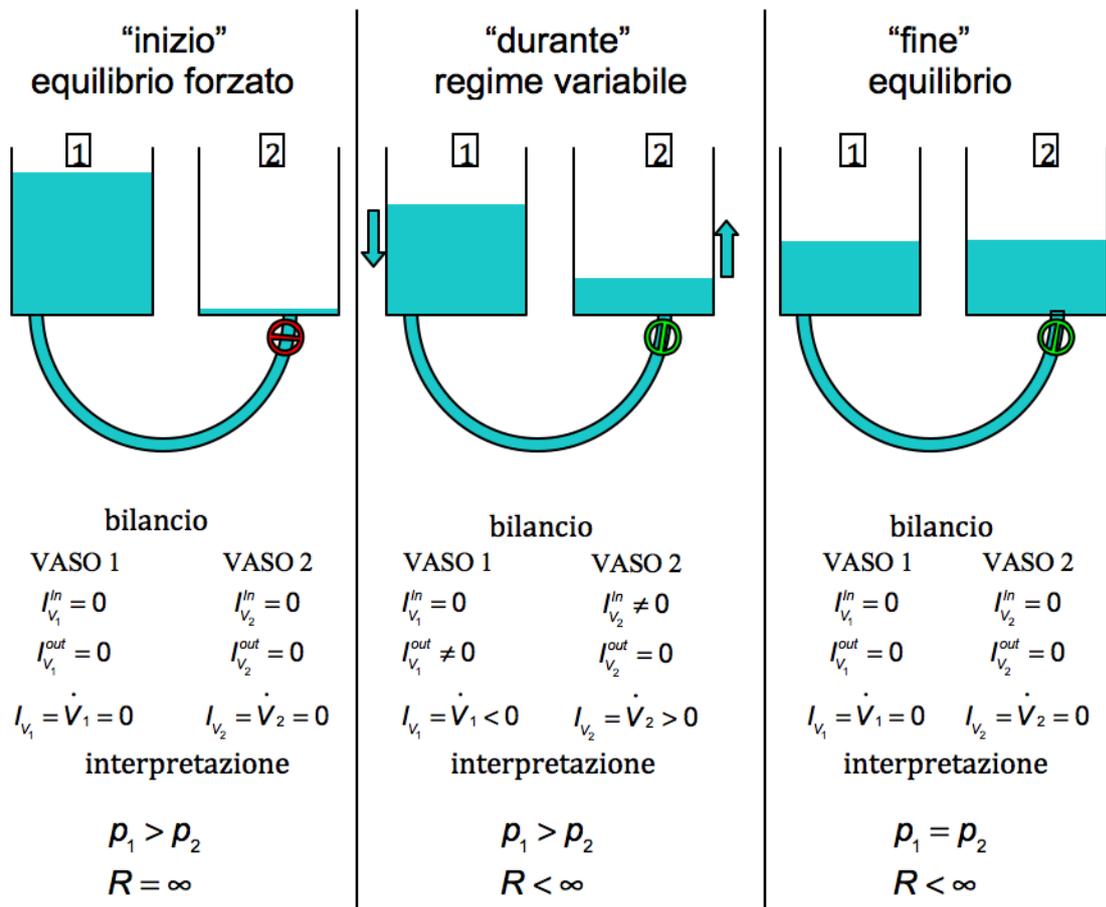


Fig. (7.13): “Situazione 1”: l’immagine rappresenta la scheda al termine dell’attività, discussa e completata dagli allievi.

“inizio”: equilibrio (i due vasi sono uniti da due tubi momentaneamente chiusi).

“durante”: regime variabile (un rubinetto viene aperto, la differenza di pressione (Δp) permette un flusso, il sistema è in evoluzione).

“fine”: equilibrio (il rubinetto rimane aperto, ma senza una differenza di pressione non vi è alcun flusso, si ha una situazione di equilibrio).

Tab. (7.9): Riassunto dell’analogia sistema idraulico - “cellula_{L3}”.

	vasi comunicanti	“cellula _{L3} ”
sistemi	vaso 1 e vaso 2	citosol e plasma
interfaccia	tubo di collegamento	canali ionici della membrana per gli ioni potassio
spinta	differenza di pressione: Δp	differenza di concentrazione: Δc^{38}
corrente	volume di acqua ogni unità di tempo (m^3/s): I_V^{39}	quantità chimica di ioni trasferiti ogni unità di tempo (mol/s): I_n
resistenza dipende da	sezione complessiva del tubo di collegamento	numero di canali ionici presenti sulla membrana ⁴⁰ e grado di apertura.

³⁸ Solo più avanti si discutono le conseguenze di aver trascurato la carica degli ioni.

³⁹ A resistenza costante l’intensità di corrente dipende dalla differenza di potenziale come introdotto dall’equazione generica della spinta-corrente-resistenza (cap. 3). Questo fenomeno si può osservare utilizzando un cilindro graduato in sostituzione del recipiente 2 e controllando ad intervalli regolari (unità di tempo) il volume trasferito.

⁴⁰ Il grado di apertura dei canali è importante per l’interpretazione del potenziale d’azione, fenomeno legato alla modifica temporale della permeabilità della membrana.

Una discrepanza che emerge facilmente dal confronto tra queste il sistema idraulico e quello della "cellula_{L3}" (Fig. (7.14)), è che mentre nel caso del sistema idraulico la pressione finale alla base dei due vasi è uguale (e quindi la spinta Δp è nulla), nel sistema "cellula_{L3}" permane invece una differenza di concentrazione degli ioni potassio ($c_{K^+_{citosol}} > c_{K^+_{plasma}}$) e, rispettivamente di potenziale chimico ($\mu_{K^+_{citosol}} > \mu_{K^+_{plasma}}$).

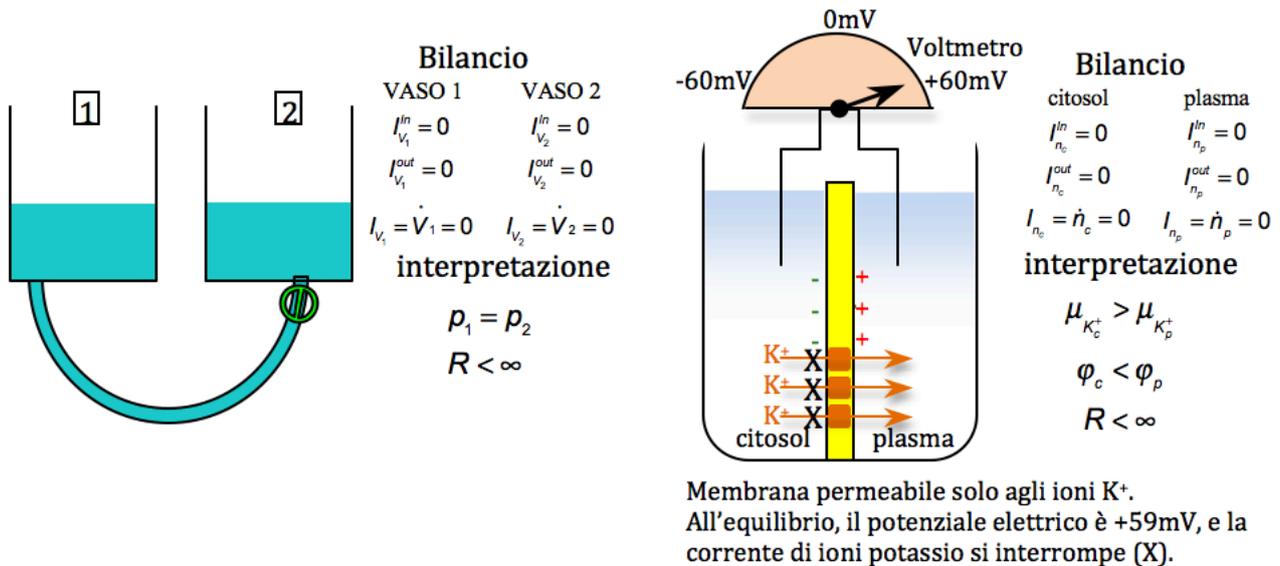


Fig. (7.14): Confronto tra il sistema idraulico e l'ipotetico sistema sperimentale "cellula_{L3}" proposto da Lodish.

Alcuni allievi suggeriscono che, come visto nella situazione 7.2.1, per valutare correttamente le conseguenze della corrente di ioni bisogna considerare sia la corrente di quantità chimica che la corrente di carica elettrica ad essi associate. Per spiegare come mai il flusso di ioni si arresti malgrado la presenza di una spinta chimica bisogna tener conto anche della differenza di potenziale elettrico. La differenza sia di potenziale chimico che quella di potenziale elettrico contribuiscono alla spinta alla trasformazione, anche se in senso opposto. All'equilibrio elettrochimico la spinta complessiva è nulla, poiché le due spinte opposte si eguagliano. Considerando solo la differenza di concentrazione (e dunque di potenziale chimico), gli ioni potassio dovrebbero ancora fluire dal citosol verso l'ambiente extracellulare: mentre, tenendo conto solo della differenza di potenziale elettrico, ci si aspetterebbe un flusso in direzione opposta. La spinta effettiva considera tutti e due questi aspetti.

Situazione 2: Il regime stazionario

Un nuovo elemento viene inserito nell'apparecchiatura sperimentale studiata nella situazione precedente, e cioè una pompa idraulica che collega i due sistemi Fig. (7.15) (vedi allegati digitali: scheda di lavoro 2: "Situazione 2"). Con questo accorgimento si vuole studiare un regime stazionario⁴¹ idraulico e, per analogia, comprendere il ruolo della pompa sodio-potassio nelle cellule degli organismi.

Studio di un sistema idraulico

Gli allievi fanno le loro previsioni riguardo all'effetto della pompa sul sistema all'equilibrio ("inizio") ed in seguito viene eseguito l'esperimento. In questo secondo caso, la descrizione del sistema si riduce a quella del nuovo elemento: in particolare si mostra come la pompa sia connessa alla rete elettrica, quindi come sia in atto un trasferimento di energia. In questo modo si ha quindi l'opportunità di riprendere aspetti introdotti dal cap. 2.6⁴².

La pompa viene regolata in modo da mantenere costante il flusso ed il sistema evolve verso il raggiungimento di un regime stazionario (vedi Fig. (7.15)). Si noti che:

- il livello dell'acqua nei due recipienti non è uguale, vi è quindi una differenza di pressione (Δp) alla base dei due recipienti;
- per il recipiente 1 vi è un flusso di acqua in entrata dovuto all'azione della pompa ed uno uguale, ma in uscita, attraverso il tubo dovuto a Δp tra i due recipienti.
- per il recipiente 2 vi è un flusso di acqua in uscita dovuto all'azione della pompa ed uno uguale, ma in entrata, attraverso il tubo dovuto a Δp tra i due recipienti.

Mentre nelle proposte di molti allievi la situazione "durante" è descritta correttamente, la situazione "fine" non coincide affatto con il risultato sperimentale. Le proposte più gettonate coincidono o con un ritorno alla situazione "inizio" o con il trasferimento completo dell'acqua dal vaso 2 al vaso 1. In fase di discussione emerge come le previsioni errate sono spesso da ricondurre ad un uso improprio degli strumenti concettuali a disposizione. Anche se l'equazione di bilancio è spesso impostata correttamente, al momento di passare alle conclusioni vi sono delle incoerenze che portano al risultato errato. Di seguito vengono proposte le modalità attraverso le quali si portano gli allievi ad una correzione delle ipotesi sbagliate.

Chi si attende lo svuotamento completo del vaso 2 non tiene in considerazione che l'azione della pompa provoca una differenza di pressione tra i due vasi, così da generare una corrente spontanea tra il vaso 1 ed il vaso 2. La correzione dell'ipotesi deve essere indirizzata sull'analisi delle correnti in entrata ed in uscita dal sistema 1, tenendo conto della potenza della pompa e della resistenza dei tubi.

Nel ripetere l'esperimento si invitano gli allievi ad individuare le correnti presenti e le loro intensità. La riflessione si concentra sull'aspetto della crescente pressione nel vaso 1, che a parità di resistenza provoca una corrente via via maggiore, corrente la quale andrà ad eguagliare quella in entrata generata dalla pompa: a questo punto il sistema sarà arrivato ad un regime stazionario.

Durante la discussione riguardo alla possibilità di un ritorno alla situazione "inizio" gli allievi che hanno interpretato correttamente la situazione a porre delle domande precise che possano indirizzare i compagni verso l'identificazione di quegli aspetti che sono loro sfuggiti.

In alternativa è il docente a proporre delle operazioni quali:

⁴¹ Un regime stazionario è caratterizzato dal fatto che il sistema mantiene costante nel tempo una differenza di potenziale (Vol 1, cap.4, p. 47). L'equilibrio è invece caratterizzato dal fatto che il sistema permane costante nel tempo e vi è una differenza del potenziale nulla.

⁴² Possibile approfondimento: aspetti energetici e diagramma di flusso dell'energia (vedi cap. 3).

- identificare le differenze nel sistema tra i momenti “inizio” “durante” e “fine”, sottolineando che una volta attivata la pompa nella fase “durante”, essa non viene più disattivata.
- aiutare gli allievi a capire che azionando la pompa si introduce una perturbazione dell’equilibrio: il sistema evolve quindi verso una nuova situazione, che sarà diversa da quella iniziale.

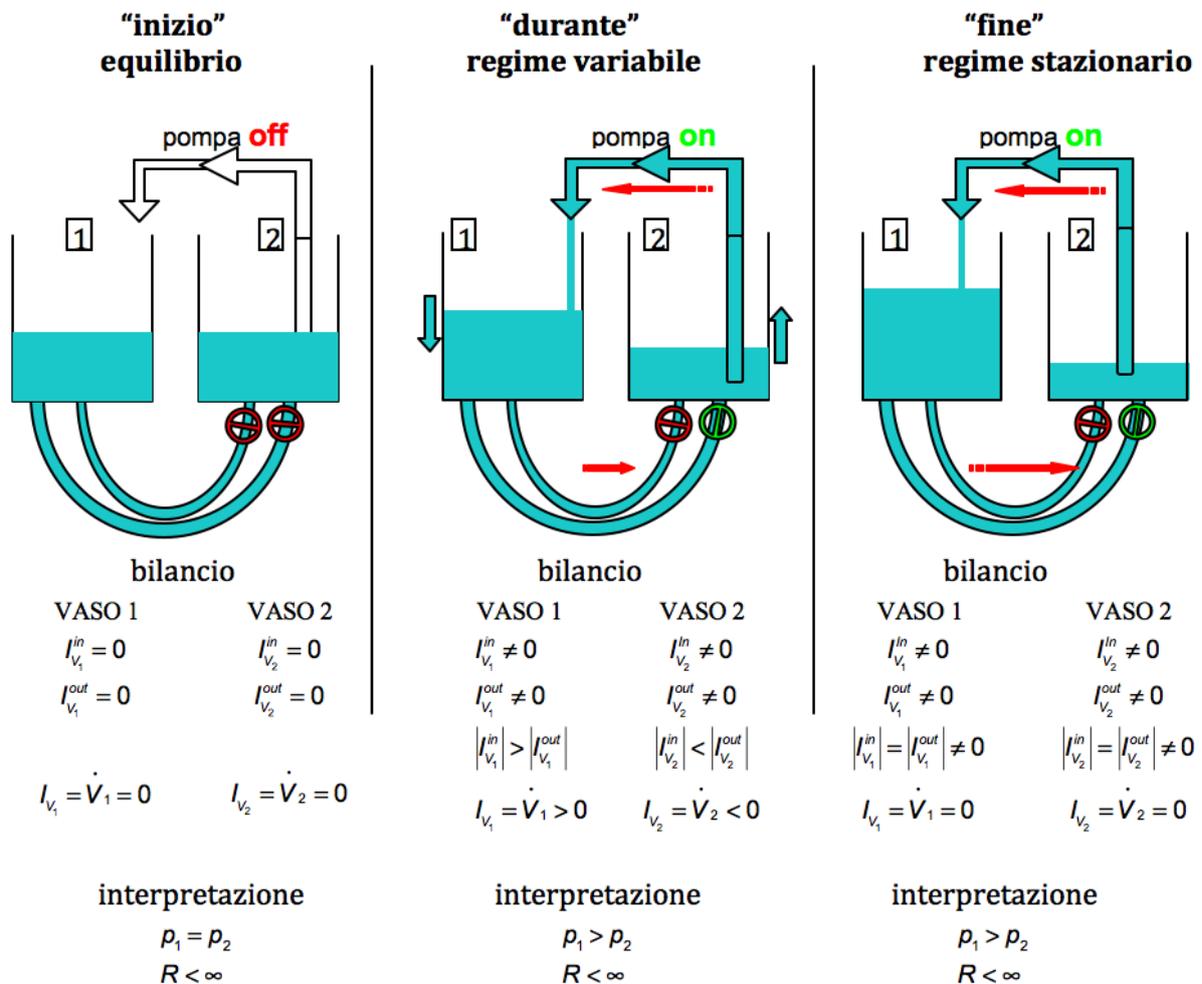


Fig. (7.15): Scheda situazione 2 completata ed interpretata: si arriva ad un regime stazionario.

In questo modo gli allievi vengono incoraggiati ad utilizzare il modello spinta-corrente-resistenza e lo strumento equazione di bilancio in modo coerente così da poter spiegare la situazione che si viene a creare.

Per il vaso 1 la situazione “fine” può essere descritta come una situazione stabile caratterizzata da una corrente in entrata (la pompa è attiva). Applicando l’equazione di bilancio si nota che, affinché non vi siano cambiamenti di volume ($\dot{V} = 0$), il valore assoluto della corrente in uscita deve coincidere con quello della corrente in entrata determinato dalla pompa in funzione. Questa uguaglianza caratterizza il regime stazionario che si instaura (vedi cap. 2).

Si può quindi ricapitolare la situazione studiata come segue:

- la corrente in entrata (I_{V-in}) è garantita dalla pompa, che può agire contro il gradiente di pressione, poiché alimentata dalla corrente elettrica.
- La pompa agisce da trasformatore di energia (vedi cap. 2.6-7).

- La spinta per garantire la corrente in uscita (I_{V-out}) dal recipiente 1 è di natura pressoria: vi è quindi una differenza di pressione (Δp) tra l'uscita del vaso 1 e l'entrata del vaso 2.
- Alla “fine” si instaura un regime stazionario: la $\Delta p \neq 0$ è mantenuta costante grazie all'azione della pompa.

Analogie tra il sistema idraulico e il "modello cellula"

Il passo successivo è lo studio del modello “cellula_{L3}” comprensivo anche di una pompa per gli ioni potassio, che chiameremo semplicemente "modello cellula": l’analogia, riassunta di seguito, è individuata abbastanza velocemente dagli allievi.

La pompa per gli ioni potassio spinge questi ioni contro il loro gradiente di concentrazione, andando a perturbare l’equilibrio elettrochimico. Inizialmente si instaura un flusso di ioni potassio dall’ambiente extracellulare al citosol (come nell'anaalogia idraulica: dal vaso 2 al vaso1) con conseguente aumento della quantità chimica degli stessi ioni potassio nel citosol e parziale neutralizzazione della carica negativa intracellulare. Tra i due sistemi (citosol e plasma) il $\Delta\mu$ aumenta mentre il $\Delta\phi$ diminuisce. Di conseguenza le due differenze di potenziale opposte non si annullano più: questa situazione genera una spinta complessiva con conseguente flusso degli ioni potassio dal citosol verso il plasma. Si instaura un regime stazionario dal momento in cui le due correnti di ioni potassio, quella in entrata e quella in uscita, sono identiche e la differenza di potenziale elettrochimico assume un valore costante nel tempo (Fig. (7.16)).

A livello cellulare, la pompa garantisce in realtà un flusso sia di ioni sodio che di ioni potassio: anche in questo caso si instaurerà un regime stazionario, dato che la membrana cellulare è permeabile per le due specie.

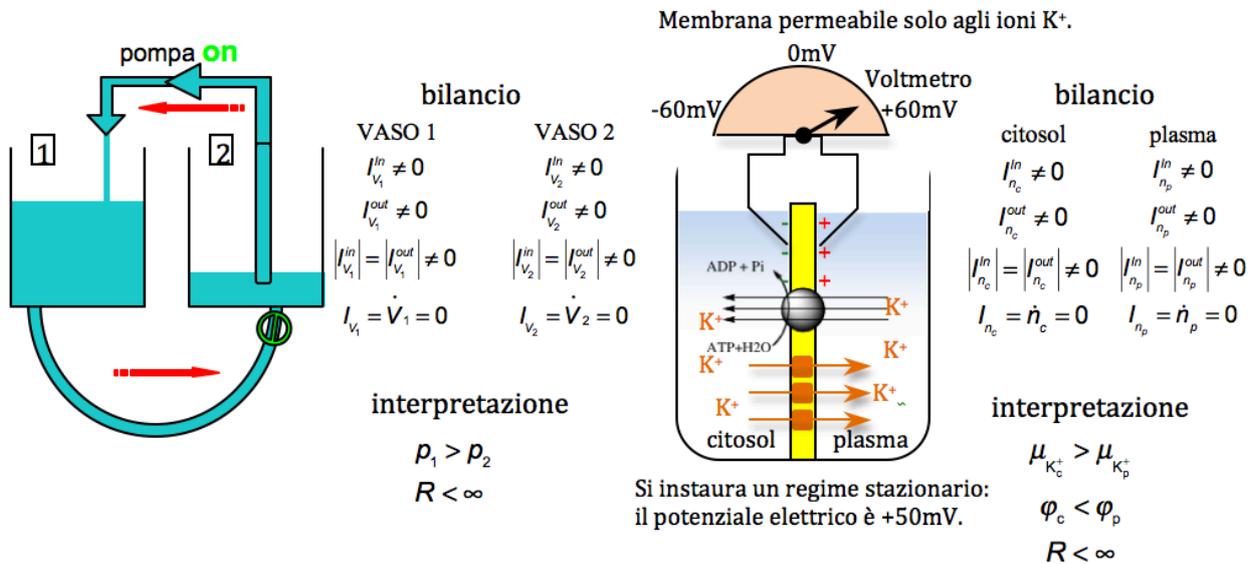


Fig. (7.16): Soluzione situazione 2, si arriva ad un regime stazionario.

A questo punto della trattazione è doveroso effettuare un confronto con la situazione in una cellula schematizzata come in Fig. (7.12) dal quale si osserva che la pompa:

- sfrutta l'idrolisi dell'ATP per trasferire ioni sodio e potassio contro il rispettivo gradiente ionico;
- garantisce il mantenimento della differenza di concentrazione degli ioni sodio e potassio ai due lati della membrana e dunque il potenziale di membrana;
- permette l'instaurarsi di un regime stazionario.

7.2.3 Il potenziale d'azione

Situazione 3: perturbazione del regime stazionario

Come ultimo caso di studio si vuole simulare la situazione che si riscontra nelle cellule eccitabili, cioè la capacità di modificare il potenziale di membrana grazie a degli appositi canali voltaggio-dipendenti, generando così un potenziale d'azione. L'analogia sfrutta la possibilità di modificare la resistenza opposta dai tubi di collegamento alla corrente di acqua per studiare l'effetto sul regime stazionario instauratosi nella situazione precedente. Si noti che la potenza della pompa non viene invece modificata.

Studio del sistema idraulico

Si modifica il regime stazionario della "Situazione 2", diminuendo la resistenza (aprendo anche il secondo tubo). Nella situazione 1 gli allievi hanno già studiato l'effetto della modifica della resistenza sul sistema all'equilibrio e sanno che non ha alcun effetto sullo stato di equilibrio finale; con questa attività si vuole invece comprendere l'effetto di tale modifica su di un regime stazionario.

Inizialmente, grazie alla riduzione della resistenza, la corrente in uscita aumenta. L'effetto è la riduzione della differenza di pressione tra i due sistemi, sempre a vantaggio del recipiente 1. Il sistema risulta stabile al momento in cui la corrente in uscita ed in entrata si equivalgono e la differenza di potenziale è costante nel tempo: si raggiunge un nuovo regime stazionario, Fig. (7.17).

In genere le previsioni degli allievi coincidono con il risultato sperimentale: l'errore che a volte emerge è la previsione che alla "fine" risulti un livello dell'acqua più alto nel recipiente 2. Per il recipiente 1 è evidente che alla fine I_{in} debba essere uguale a I_{out} ; I_{in} è determinato dalla pompa, mentre I_{out} è garantito dalla spinta dovuta alla differenza di pressione a vantaggio del primo recipiente. Vista la diminuita resistenza, anche la differenza di pressione tra i due recipienti si riduce.

Vi è quindi una relazione tra corrente, resistenza e spinta, che può essere descritto matematicamente come segue⁴³: $\Delta\phi = I \cdot R$ o $I = \Delta\phi / R$ (vedi paragrafo 3.8). Ci si trova di fronte ad una situazione stabile (regime stazionario) quando il rapporto tra $\Delta\phi$ e R dà un dato valore I uguale I_{in} della pompa. Si noti che la corrente generata dalla pompa non viene modificata, $I_{in} =$ costante.

Analogie tra il sistema idraulico e il modello di cellula

Il "modello cellula" si amplia aggiungendo la possibilità di modificare la permeabilità della membrana per gli ioni potassio: ciò significa avere dei canali per questo ione che si possono aprire "su comando", chiameremo questo modello: "modello cellula eccitabile".

Il "modello cellula eccitabile" è quindi caratterizzato da una distribuzione asimmetrica degli ioni ai lati della membrana, da una pompa a potenza costante che garantisce il mantenimento di un regime stazionario e da un certo numero di canali per il potassio. L'apertura di ulteriori canali per il potassio (così da ridurre la resistenza) genera una maggiore corrente di questi ioni verso l'esterno (I_{out}), corrente contrastata dalla separazione di carica. Quando i flussi in entrata ed in uscita dalla cellula degli ioni potassio sono uguali ($I_{in} = I_{out}$), si ottiene un nuovo regime stazionario e quindi un nuovo potenziale di membrana, questa volta più negativo di quello precedente.

⁴³ $\Delta\phi$ = spinta; R = resistenza e I = corrente.

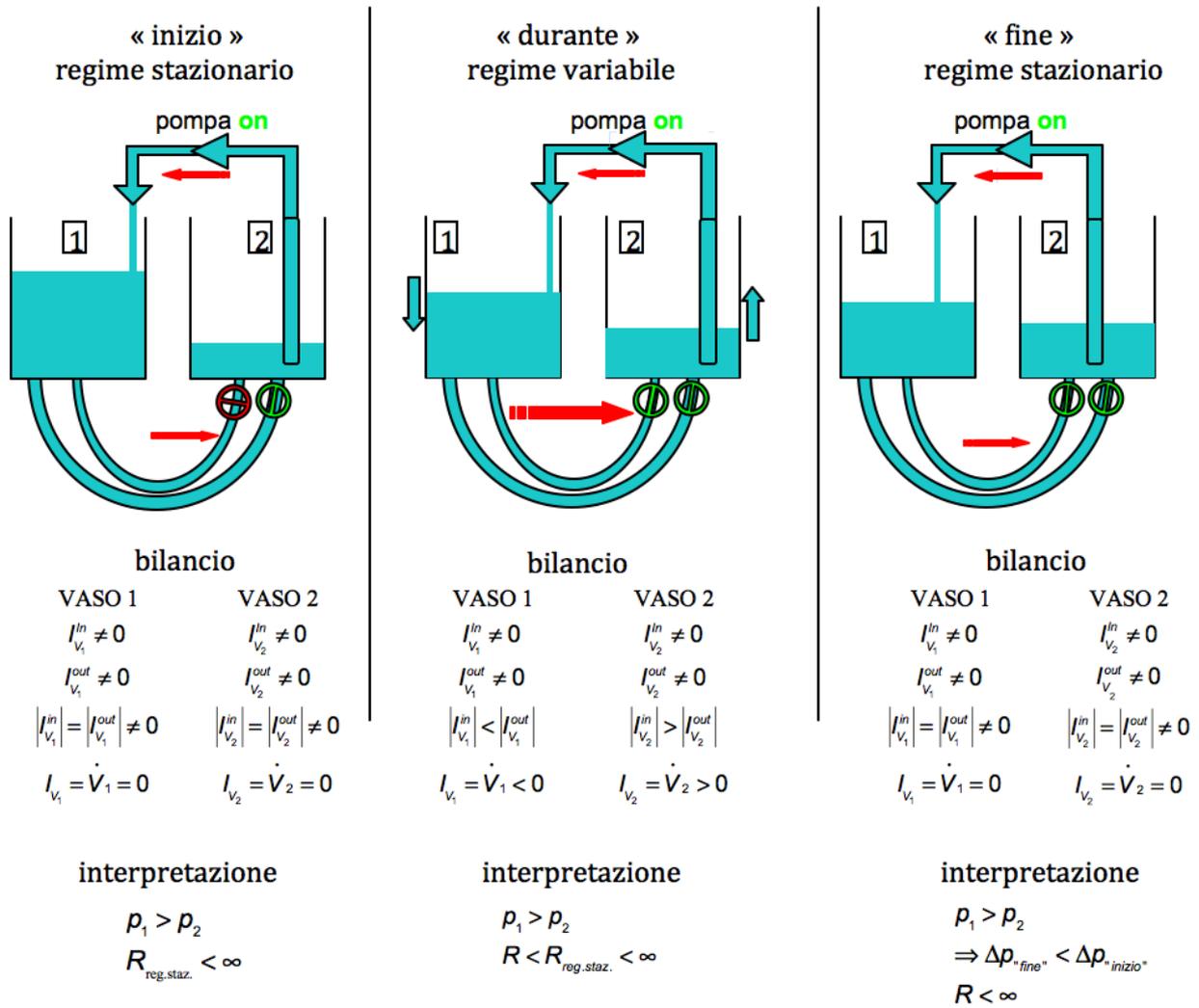


Fig. (7.17): Soluzione situazione 3 con il raggiungimento di un nuovo regime stazionario.

Conclusione del modulo

Gli allievi dispongono ora di tutti gli elementi per comprendere il meccanismo legato ad un potenziale d'azione. Grazie al modello spinta-corrente-resistenza e all'analogia con il sistema idraulico, è possibile comprendere il perché delle variazioni del potenziale di membrana associato all'apertura e chiusura sequenziale di canali voltaggio-dipendenti per il sodio e per il potassio come presentato nella Fig. (7.18) (Curtis & Barnes (2003)).

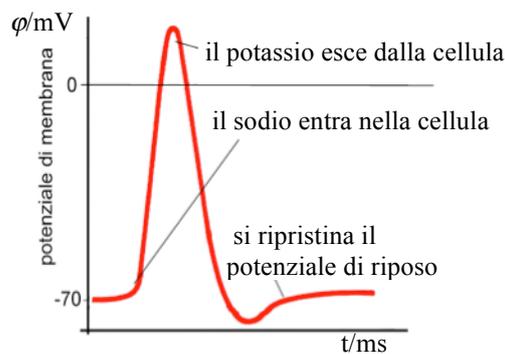


Fig. (7.18) : Il potenziale d'azione: variazione del potenziale di membrana nel tempo e relazione con le correnti di ioni attraverso la membrana.

Per ottenere delle indicazioni utili sulle competenze effettivamente acquisite agli stessi allievi, e cioè essere in grado di utilizzare il modello per interpretare una situazione biologica è prevista un'attività individuale, seguita da una discussione delle proposte scaturite, per terminare con una interpretazione condivisa del fenomeno biologico.

La consegna data agli allievi richiede:

- la rilettura delle informazioni presenti nel libro di testo (Curtis & Barnes (2003): pp: 78-9, pp: 454-8), seguita
- la reinterpretazione di questo testo grazie al modello spinta-corrente-resistenza.

Il potenziale d'azione, come descritto nel libro di testo, è caratterizzato da una variazione locale e temporale (alcuni millisecondi) del potenziale di membrana provocato da una sequenza di eventi riassunti nelle figure (7.19) e (7.20) (Curtis & Barnes (2003)).

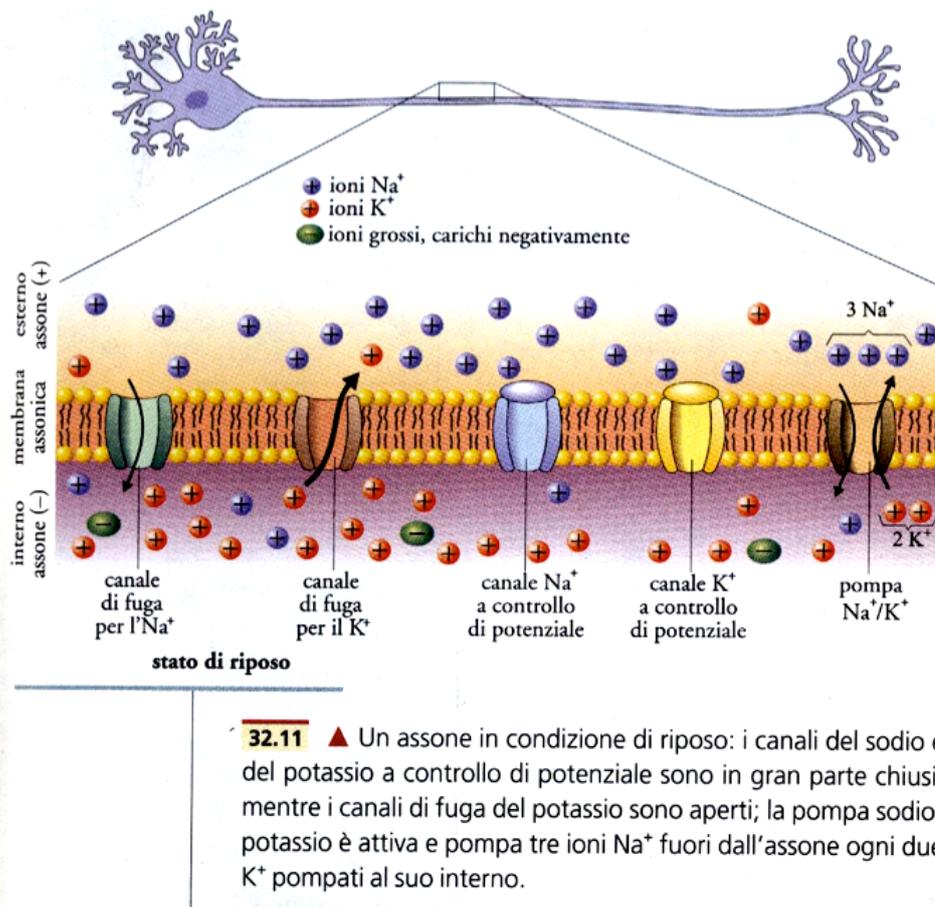


Fig. (7.19): Assone in condizione di riposo così come presentato nel libro di testo (Curtis & Barnes (2003)).

Un modello interpretativo, con delle informazioni ad uso del docente, viene proposto nelle Tab. (7.10-12) costituite da tre colonne con i seguenti contenuti:

- brano di riferimento dal libro di testo (prima colonna)
- esplicitazione delle correnti ed delle resistenze in gioco (seconda colonna)
- riflessioni sul concetto di spinta nel contesto biologico dato (terza colonna).

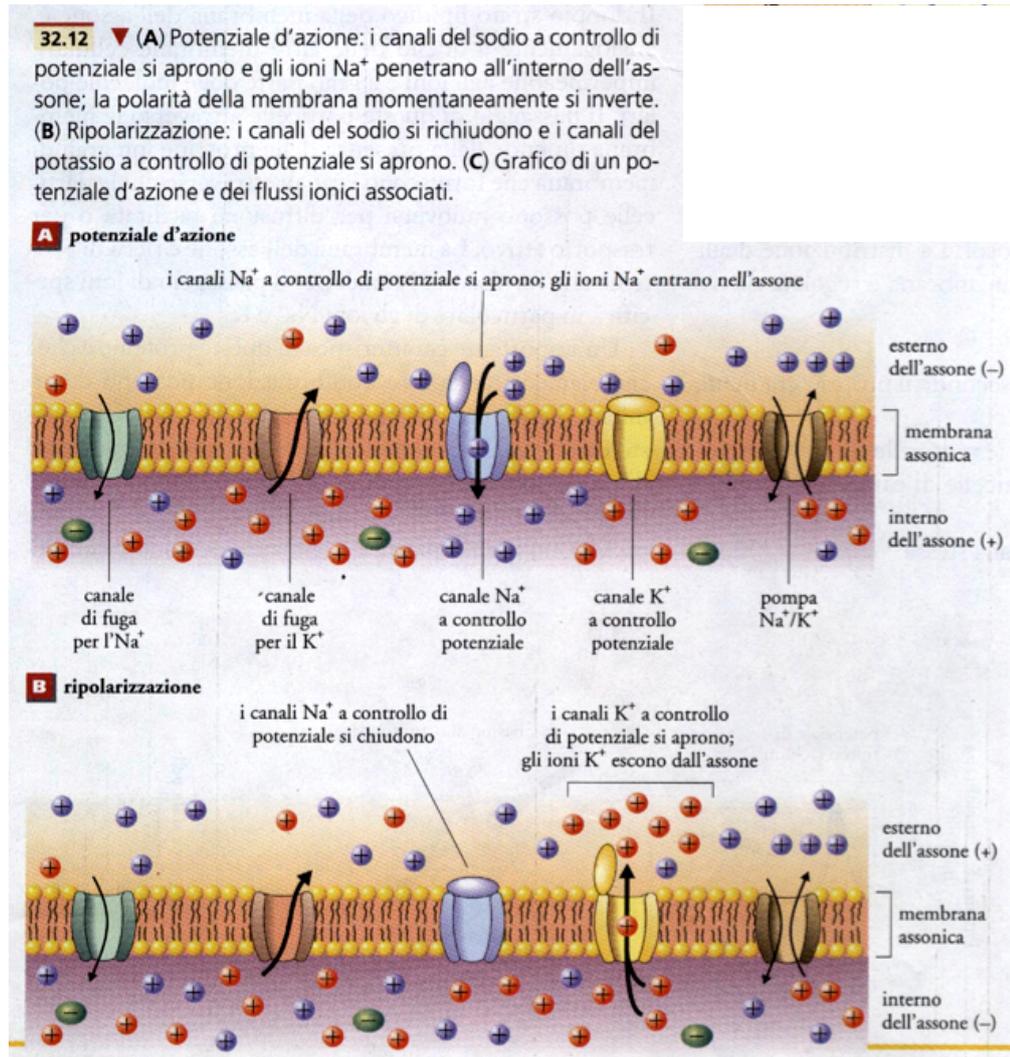


Fig. (7.20): Potenziale d'azione e ripolarizzazione così come presentati nel libro di testo (Curtis & Barnes (2003)).

Tab. (7.10): Interpretazione del potenziale d'azione grazie al modello spinta-corrente-resistenza. Assone in condizioni di riposo: Fig. (7.19).

Meccanismo ⁴⁴	corrente e resistenza	spinta
I canali del sodio e del potassio a controllo di potenziale sono in gran parte chiusi, mentre i canali di fuga per il potassio sono aperti; la pompa sodio-potassio è attiva e pompa tre ioni Na^+ fuori dall'assone ogni due K^+ pompate al suo interno. (Didascalìa Fig. 32.11, (Curtis & Barnes, 2003))	La membrana è permeabile per gli ioni potassio e sodio. La pompa sodio-potassio garantisce il raggiungimento del regime stazionario compensando le correnti spontanee in entrata (Na^+) ed uscita (K^+). L'intensità delle correnti spontanee di Na^+ è maggiore rispetto a quella di K^+ . La resistenza è quindi maggiore per K^+ rispetto a Na^+ .	Vi è una spinta che causa l'uscita di K^+ dalla cellula ed una che causa l'entrata di Na^+ . La spinta è data sia dalla differenza di potenziale chimico ($\Delta\mu$) che dalla differenza di potenziale elettrico ($\Delta\phi$). Le due spinte sono parallele per Na^+ e opposte per K^+ . La pompa sfrutta l'energia liberata associata dall'idrolisi dell'ATP per trasferire Na^+ e K^+ contro il rispettivo gradiente di concentrazione.

⁴⁴ Tratta dal libro dal libro di testo adottato per gli allievi: Curtis & Barnes (2003). Invito alla Biologia, Zanichelli, 5a ediz. fig. 32.11 e 32.12. L'allievo dispone anche della descrizione completa proposta nel manuale alle pp. 456-457.

Tab. (7.11): Potenziale d'azione: Fig. (7.20).

Meccanismo ⁴⁵	corrente e resistenza	spinta
I canali del sodio a controllo di potenziale si aprono e gli ioni Na ⁺ penetrano all'interno dell'assone; la polarità della membrana momentaneamente si inverte. (Didascalìa Fig. 32.12(A) (Curtis & Barnes (2003)))	L'apertura dei canali del sodio comporta una riduzione della resistenza per gli ioni Na ⁺ . Vi è inizialmente un'umentata corrente chimica di Na ⁺ verso l'interno della cellula (si assume che la pompa continui a funzionare a regime costante) (vedi situazione 3). Importando cariche positive all'interno della cellula vi è una depolarizzazione della membrana (diminuisce $\Delta\phi$).	Il regime stazionario è perturbato, cambia infatti il rapporto spinta-resistenza. La riduzione della resistenza è tale da permettere, a parità di spinta, una corrente maggiore in entrata di Na ⁺ rispetto al regime stazionario di partenza. Vi è una modifica della distribuzione delle cariche ai lati della membrana (di conseguenza di $\Delta\phi$) come pure una diminuzione della differenza di concentrazione per gli ioni Na ⁺ (di conseguenza di $\Delta\mu$) tra dentro e fuori l'assone la spinta diminuirà progressivamente.

Tab. (7.12): Interpretazione del potenziale d'azione grazie al modello spinta-corrente-resistenza. Ripolarizzazione: Fig. (7.20).

Meccanismo ⁴⁶	corrente e resistenza	spinta
I canali del sodio si richiudono ed i canali a controllo di potenziale del potassio si aprono. (Didascalìa Fig. 32.12(B), (Curtis & Barnes (2003)))	La corrente di Na ⁺ diminuisce per l'aumentata resistenza, il sistema evolve verso il regime stazionario con un'intensità di corrente pari a quella della pompa sodio-potassio. La nuova situazione a livello di potenziale chimico, potenziale elettrico in concomitanza con l'apertura dei canali per gli ioni K ⁺ (la resistenza diminuisce) favoriscono un aumento della corrente di questi ioni verso l'esterno. Il sistema evolve verso il regime stazionario iniziale.	Vi è un nuovo cambiamento del rapporto tra spinta e resistenza. La spinta chimica ed elettrica favoriscono la fuoriuscita di ioni K ⁺ dall'assone. Vi è una ridistribuzione delle cariche così da tornare al potenziale di riposo. L'azione della pompa sodio potassio garantisce il mantenimento di un regime stazionario, impedendo il raggiungimento dell'equilibrio elettrochimico.

Per verificare se gli allievi hanno interpretato correttamente l'esercizio proposto, occorre prestare particolare attenzione ai seguenti punti:

- l'allievo individua correttamente i parametri che determinano la spinta e la resistenza;
- l'allievo deduce correttamente la variazione della corrente degli ioni coinvolti;
- l'allievo prevede le variazioni del potenziale di membrana.

⁴⁵ Tratta dal libro dal libro di testo adottato per gli allievi: Curtis & Barnes (2003). Invito alla Biologia, Zanichelli, 5a ediz. fig. 32.11 e 32.12. . L'allievo dispone anche della descrizione completa proposta nel manuale alle pp. 456-457.

⁴⁶ Tratta dal libro dal libro di testo adottato per gli allievi: Curtis & Barnes (2003). Invito alla Biologia, Zanichelli, 5a ediz. fig. 32.11 e 32.12. . L'allievo dispone anche della descrizione completa proposta nel manuale alle pp. 456-457.

7.2.4 Verifica delle competenze e conoscenze acquisite

La verifica sommativa del grado di acquisizione di conoscenze e competenze da parte degli allievi si svolge con un test nel quale viene loro sottoposta un'altra situazione biologica (vedi allegato) da descrivere attraverso il modello elaborato in classe. In questo caso si tratta dell'assorbimento di glucosio e delle proteine e altri soluti coinvolti nel processo.

Le conoscenze e competenze testate sono:

- conoscere la distribuzione di ioni tra cellula e ambiente extracellulare;
- conoscere le modalità del trasporto attivo, risp. passivo;
- conoscere i parametri presenti in un'equazione di bilancio;
- conoscere il modello spinta-corrente-resistenza;
- saper riconoscere i parametri rilevanti presenti in uno schema che rappresenta una situazione biologica a livello cellulare e molecolare;
- saper costruire un'analogia tra un sistema biologico ed un sistema idraulico;
- saper utilizzare il modello spinta-corrente-resistenza e l'analogia ad un sistema idraulico per interpretare (giustificare) una situazione biologica.

Una selezione di esercizi (comprendenti anche argomenti trattati in altre parti del corso) è presente negli allegati digitali.

BIBLIOGRAFIA**Bibliografia Cap 2**

- M. D'Anna, U. Kocher, P. Lubini, S. Sciarini, *L'equazione di bilancio dell'energia e dell'entropia*, ASP Locarno, 2005.
- F. Herrmann, *Der Karlsruher Physikkurs*, Aulis, Köln, 2000.
- E. Tonti, E. Nuzzo, *Gradiente, rotore divergenza*, Pitagora Editrice Bologna, 2007.

Bibliografia Cap 3

- M. D'Anna, F. Herrmann, *Un Atto di Fisica o l'Entropia Giocosa* al XLI° congresso nazionale AIF.
- M. D'Anna, A. Merletti, *Il ruolo dell'energia nei fenomeni naturali*, XLVI Congresso dell'Associazione per l'Insegnamento della Fisica (AIF), *Energia e Ambiente*, Montesilvano, 17–20 ottobre 2007.
- G. Falk et al. *Diverse forme di energia o portatori di energia?*, didattica KPK, traduzione di Annamaria Fichera, 1983.
- H.U. Fuchs, *the dynamics of heat*, Springer, 1996.
- F. Herrmann, *Simple examples of the theorem of minimum entropy production*, Eur. J. Phys 7, 1986, 130-131.
- F. Herrmann, *Der Karlsruher Physikkurs*, Aulis, Köln, 2000.
- F. Herrmann, *Was ist Wärmestrahlung?*, Praxis-Magazin, 2005.
- F. Herrmann, *Was ist eine mengenartige Grösse?*, Praxis-Magazin, 2006.
- F. Herrmann, *Ding und Mass*, Praxis-Magazin, 2008.
- G. Job, *Wie schädlich ist der erste Hauptsatz?*, Institut für Physikalische Chemie, Universität Hamburg, ungekürzte Fassung 2002, überarbeitet 2005.
- J. Leisen, *Energie und Entropie*, Handreichung zum neuen Lehrplan Physik in der S II, Pädagogisches Zentrum Rheinland-Pfalz (PZ), Bad Kreuznach 1999.
- A. Thess, *Das Entropieprinzip, Thermodynamik für Unzufriedene*, Oldenbourg Verlag, 2007.
- E. Tonti, E. Nuzzo, *Gradiente, rotore divergenza*, Pitagora Editrice Bologna, 2007.

Bibliografia Cap 5

- H.U. Fuchs, *The Dynamics of Heat*, Seconda edizione, Springer, 2010.
- D. Halliday et al. *Fondamenti di fisica*, Seconda edizione, Zanichelli, 2007.
- F. Herrmann, *Der Karlsruher Physikkurs*, Aulis, Köln, 2000.
- W. Känzig, *Wärmelehre*, Physik II, 2 Teil, 4 Auflage, vdf (ETH Zürich), 1992.

Bibliografia Cap 6

- AA VV, *Le risorse energetiche*, Le scienze, Quaderni, N. 129, dicembre 2002.
- AAVV, *A!R*, CD-ROM didattico distribuito dal BUWAL/ UFAFP, Berna, 1999.
- AAVV, *Energia, la resa dei conti*, Le Scienze, N.459, novembre 2006.
- P. Atkins, L.Jones, *Principi di chimica*, Zanichelli, 2002.

- C. Baird, *Chimica ambientale*, Zanichelli, 1997, cap 3 (la chimica e l'inquinamento dell'aria a livello del suolo).
- J.K.Bourne, *Sogni verdi*, National Geographic Italiana, ott. 2007, pp. 8-29.
- I. Ceschi, *Il bosco del Cantone Ticino*, Dadò, 2006, pp 188-196 (L'inquinamento ambientale e il deperimento delle foreste).
- H.Curtis, N.S.Barnes, *Invito alla Biologia*, sesta edizione, Zanichelli, 2009.
- M. Giuliacci et al, *Manuale di meteorologia*, Alpha test 2010.
- R.D. Howland, M.J.Mycek, *Le basi della farmacologia*, ed. Zanichelli, 2007.
- G. Kappenberger, J. Kerkmann, *Il tempo in montagna*, ed. Zanichelli, 1997.
- B. Jordi et al, *Le polveri fini fanno ammalare*, opuscolo BUWAL/UFAFP, Berna, 2005.
- B. MacKibben, *Lotta al CO₂*, National Geographic Italiana, ott. 2007 pp. 3-7.
- A. Romer, *Consumo energetico mondiale ed implicazioni ambientali*, Proceedings de "L'effetto Serra", Giornata di studio per i docenti, Bellinzona, 15 ottobre 2003.
- W.F. Ruddiman, *Quando iniziammo ad alterare il clima*, Le Scienze, maggio 2005, pp 46-53.
- E. Stocchi, *Chimica organica, applicata e industriale*, Masson Scuola, 1993.
- J.B.West, *Fisiologia della respirazione: l'essenziale*, Piccin, 2006.

Bibliografia Cap 7

- R. Chang. *Physical Chemistry for the chemical and biological sciences*. University Science Books, 2000.
- H. Curtis, S. N. Barnes, *Invito alla biologia*, Zanichelli, 2003.
- R. Hill, G. Wyse, M. Anderson *Fisiologia animale*, Zanichelli, 2006.
- J. Koolman, K. H. Röhm. *Testo atlante di biochimica*, Zanichelli, 1997.
- H. Lodish et al. *Biologia molecolare della cellula*, Zanichelli, 2002.
- F. Medici, Laghi Albano e Bracciano: bilancio idrico e valutazione dei prelievi. *Geologia dell'ambiente*, 15 (2), 2-5, 2007.
- P. Micklin, N. V. Aladin, *Risanare il mare d'Aral*. Le Scienze (478), 2008.
- P. Pupillo et al. *Biologia vegetale*, Zanichelli, 2003.
- L. Taiz, E. Zeiger, *Fisiologia vegetale*, Piccin, 2009.
- F. Venturelli, L. Virli. *Invito alla botanica*, Zanichelli, 1995.
- D. Voet et al. *Fondamenti di biochimica*, Zanichelli, 2001.
- P. Willmer et al. *Fisiologia ambientale degli animali*, Zanichelli, 2003.