

L'ossigeno in acqua

Questo percorso didattico è centrato sullo studio della presenza dell'ossigeno disciolto in acqua, sulla misura della sua **concentrazione** e sulle variabili che l'influenzano.

La presenza di ossigeno in acqua è estremamente importante in quanto rende possibile l'esistenza della vita animale e vegetale negli ambienti acquatici. Gli organismi animali, però, possono sopravvivere solo in presenza di una determinata quantità di ossigeno che può variare in un intervallo alquanto ristretto. Pertanto risulta determinante poterne misurare la **concentrazione** e conoscere quali fattori possono farne variare le condizioni.

Le attività di laboratorio previste sono centrate sulla misura della **concentrazione** di ossigeno in campioni di acqua e sulla variazione della **concentrazione** in funzione di due variabili la pressione e la temperatura.

1. Concentrazione e solubilità

L'acqua ha un elevato potere solvente sia nei confronti dei solidi ionici sia dei liquidi polari. I gas sono generalmente meno solubili dei liquidi e la loro concentrazione in soluzione dipende da numerosi fattori.

La **concentrazione** indica quanto soluto è sciolto in una determinata quantità di solvente o di soluzione ed è espressa sempre come rapporto tra una grandezza, che indica la quantità di sostanza disciolta, ed un'altra grandezza, che indica o la quantità di soluzione o la quantità di acqua in cui si trova disciolta la quantità di sostanza presente al numeratore del rapporto. Anche la **solubilità** indica una **concentrazione**, ma indica la concentrazione massima che si può realizzare. La soluzione, in cui la concentrazione del soluto è uguale alla solubilità, si chiama soluzione satura.

La **solubilità** dei diversi gas in acqua assume valori molto diversi tra loro, e dipende, a parità di altre grandezze, dalla maggiore o minore interazione tra le molecole di acqua e di gas. I gas formati da **molecole polari** come HCl o NH₃ sono molto solubili in acqua, mentre quelli formati da molecole non polari come H₂ o He sono quasi insolubili in acqua..

La molecola di ossigeno, come tutte le molecole non polari, subisce l'“influenza” delle molecole di acqua, polari, che possono indurre un temporaneo spostamento della **densità elettronica** della molecola di O₂ (fig. 1). La distribuzione di carica elettrica di O₂ non è più simmetrica ed il baricentro delle cariche negative non coincide più con il baricentro delle cariche positive. Questa asimmetria di carica determina un **momento dipolare** indotto nella molecola di ossigeno. Se questo processo si estende ad un grande numero di molecole, si possono formare legami di tipo elettrostatico tra le molecole di acqua, polari, e le molecole di O₂, così polarizzate. La **solubilità** dell'ossigeno nell'acqua può assumere anche valori di circa 10 mg/L.

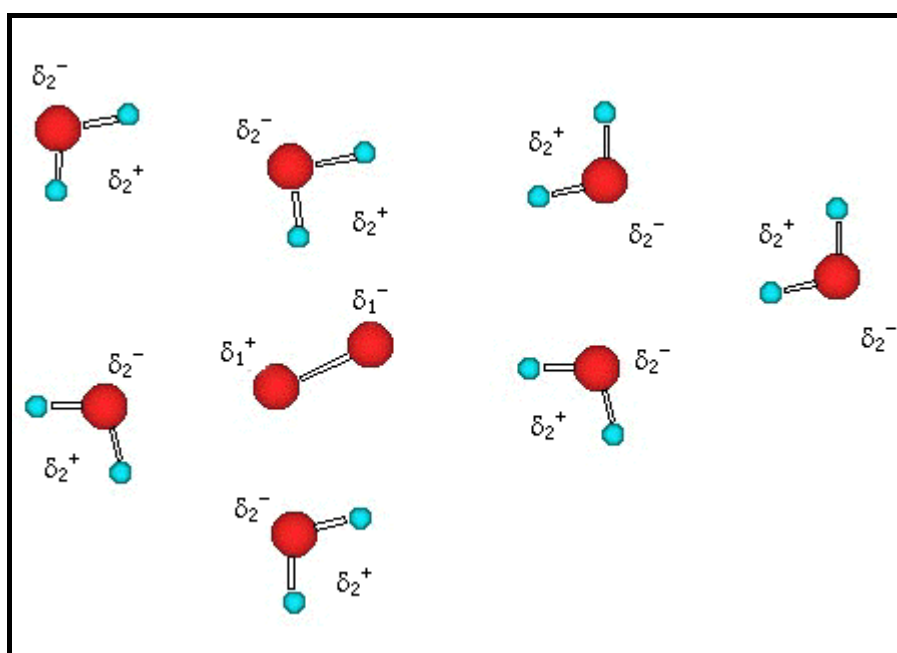


Fig. 1 Dipolo-indotto nella molecola di O₂ in presenza di H₂O. L'ossigeno è rappresentato in rosso e l'idrogeno in azzurro. I simboli δ_1^+ , δ_2^+ , δ_1^- , δ_2^- indicano le parziali cariche positive e negative e dove $\delta_2 \gg \delta_1$.

Negli ambienti acquatici, l'ossigeno, oltre ad essere prodotto dalle piante acquatiche nella fotosintesi, viene scambiato con l'aria sovrastante all'acqua. (l'aria contiene sempre circa il 20% in volume di ossigeno). Lo scambio di ossigeno tra l'aria e la soluzione acquosa è un **processo reversibile** ossia lo scambio avviene sia tra l'ossigeno dell'aria che passa in soluzione acquosa, sia tra l'ossigeno presente nell'acqua che passa nuovamente nell'aria. Quando le velocità con cui avvengono questi processi, (quella con cui l'ossigeno si solubilizza e quella con cui si desolubilizza), diventano uguali si raggiunge una condizione di **equilibrio**. In questo caso, pur passando continuamente ossigeno dall'acqua all'aria e viceversa, la **concentrazione** dell'ossigeno

nell'acqua non cambia più. In queste condizioni di **equilibrio**, la soluzione sarà satura e quindi la **concentrazione** di ossigeno è la massima possibile ed è pari alla **solubilità** in quelle condizioni.

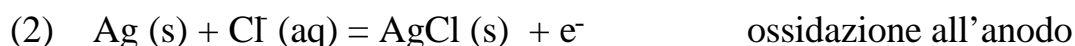
Entrambe le velocità di cui si è detto dipendono dall'ampiezza della superficie di contatto delle due fasi, liquida (soluzione acquosa) e gassosa (aria), e pertanto rapidi movimenti dell'*acqua* (è chiaro che si tratta di una soluzione acquosa) come onde marine o fiumi tumultuosi, aumentando tale superficie, possono aumentare sia la velocità di solubilizzazione sia quella di desolubilizzazione.

Negli ambienti acquatici l'ossigeno presente in soluzione è consumato dagli organismi animali marini durante la respirazione e dai batteri nei processi di decomposizione di materiale organico quindi la **concentrazione** di ossigeno potrà essere minore della **solubilità**, quando la velocità di consumo è maggiore di quella di solubilizzazione.

Particolare attenzione dovrebbe essere posta nel far comprendere allo studente la differenza tra la **solubilità** e la **concentrazione**. Infatti, nel caso dell'ossigeno disciolto in acqua, essendo l'*acqua* sempre a contatto con l'ossigeno dell'aria, in condizioni di **equilibrio**, la soluzione è sempre satura di ossigeno e quindi la **concentrazione** è sempre pari alla **solubilità**. Ma poiché queste condizioni di **equilibrio** non sussistono sempre, non solo è bene puntualizzare la differenza, ma è necessario chiarire, per ogni esperienza, se il sistema è in condizioni di equilibrio e, se non lo è, come potrebbe raggiungere tale condizione.

2. La misura della concentrazione di ossigeno in acqua

Per misurare la **concentrazione** di ossigeno in acqua $[O_2]$ si può utilizzare un elettrodo polarografico (Vernier Dissolved Oxygen Probe, fig. 2) collegato ad un'interfaccia. L'elettrodo non è altro che una cella elettrochimica, al cui interno avvengono le seguenti reazioni di ossidazione e di riduzione:



Il catodo di platino, dove avviene la reazione di riduzione (1), è separato da una membrana gas permeabile dalla soluzione in esame ed è collegato all'anodo di riferimento dove avviene

l'ossidazione (2). Questo elettrodo è costituito da argento metallico immerso in una soluzione satura di AgCl in presenza di corpo di fondo.

Il potenziale dell'anodo non cambia durante il passaggio di corrente poiché la soluzione di AgCl è satura e quindi la concentrazione di ioni Ag^+ , che determina il valore del potenziale anodico non cambierà anche se si producono ioni Ag^+ . Il potenziale catodico invece è funzione sia della concentrazione di $\text{O}_{2(\text{aq})}$ [O_2] sia del pH (e quindi della concentrazione di OH^-)

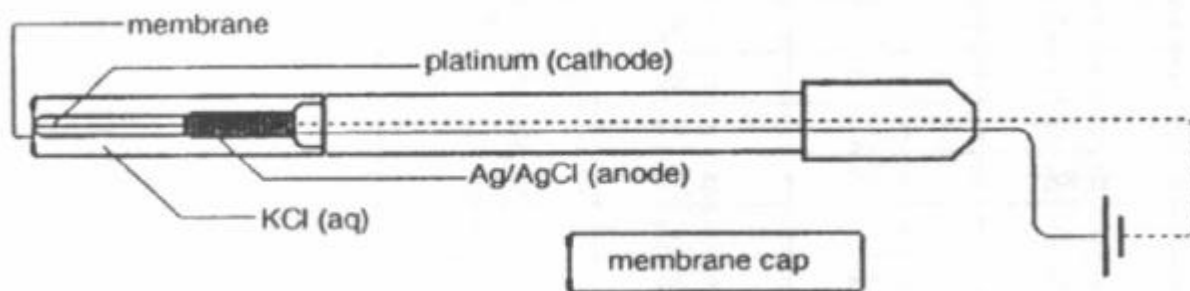


Fig. 2. Vernier Dissolved Oxygen Probe

Quando la sonda viene immersa nella soluzione da esaminare, l'ossigeno diffonde attraverso la membrana verso il catodo, e la differenza di potenziale tra i due elettrodi è proporzionale alla [O_2]. L'interfaccia converte il valore della differenza di potenziale misurata direttamente nel valore della **concentrazione** di ossigeno nella soluzione in esame.

Il principio di funzionamento della sonda può costituire uno spunto per la discussione del processo di precipitazione, delle reazioni redox, del loro utilizzo, della scala dei potenziali e dell'equazione di Nernst.

Attraverso un computer, cui si può collegare lo strumento, è possibile leggere, in tempo reale, il valore delle concentrazioni di O_2 nelle soluzioni che si stanno esaminando. Il software permette anche di elaborare grafici, della dipendenza della concentrazione di ossigeno da altri parametri che possono essere contemporaneamente misurati p.es. temperatura, pressione, tempo.

Come altri tipi di trasduttori anche questo deve essere calibrato, per ottimizzare la misura, cioè bisogna effettuare due misure in soluzioni a **concentrazione** nota e confrontabile a quella che si misurerà. La prima calibrazione si effettua in una soluzione di solfito di sodio, in cui la presenza di ossigeno è nulla. Il solfito di sodio, infatti, riduce tutto l'ossigeno eventualmente presente nella soluzione:



La seconda calibrazione si effettua in una soluzione certamente satura di ossigeno, nelle condizioni di lavoro, per cui il valore della **concentrazione** che si misura con il trasduttore deve necessariamente essere uguale al valore della solubilità in quelle condizioni. Tali valori possono essere letti nelle tabelle di **solubilità** (tabella 1).

Nell'utilizzare la sonda, sarebbe opportuno far effettuare agli allievi la procedura di calibrazione per stimolare l'attitudine ad operare professionalmente coi metodi propri della ricerca, mostrando quali sono i problemi relativi a misure fatte in maniera impropria e soprattutto quali sono gli errori, valutati numericamente, che si commetterebbero.

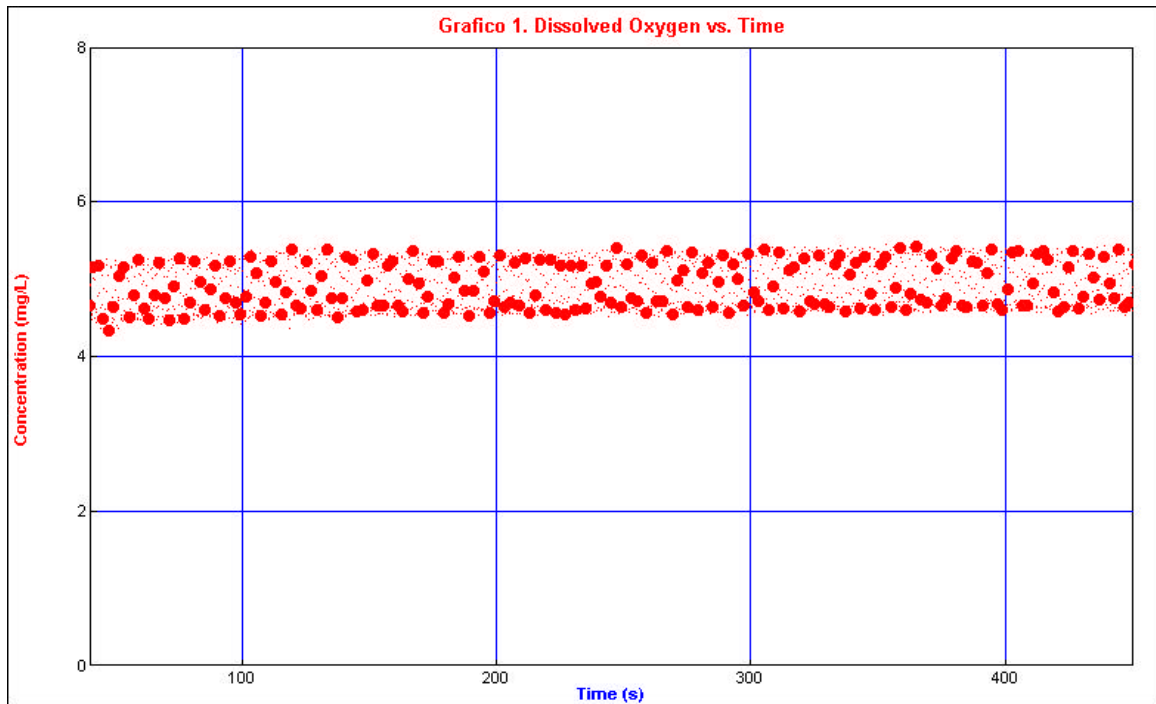
Tabella 1. **Solubilità** dell'ossigeno (mg/L) a diversa temperatura e pressione atmosferica

	770 mm	760 mm	750 mm	740 mm	730 mm	720 mm	710 mm	700 mm	690 mm	680 mm	670 mm	660 mm
0°C	14.76	14.57	14.38	14.19	13.99	13.80	13.61	13.42	13.23	13.04	12.84	12.65
1°C	14.38	14.19	14.00	13.82	13.63	13.44	13.26	13.07	12.88	12.70	12.51	12.32
2°C	14.01	13.82	13.64	13.46	13.28	13.10	12.92	12.73	12.55	12.37	12.19	12.01
3°C	13.65	13.47	13.29	13.12	12.94	12.76	12.59	12.41	12.23	12.05	11.88	11.70
4°C	13.31	13.13	12.96	12.79	12.61	12.44	12.27	12.10	11.92	11.75	11.58	11.40
5°C	12.97	12.81	12.64	12.47	12.30	12.13	11.96	11.80	11.63	11.46	11.29	11.12
6°C	12.66	12.49	12.33	12.16	12.00	11.83	11.67	11.51	11.34	11.18	11.01	10.85
7°C	12.35	12.19	12.03	11.87	11.71	11.55	11.39	11.23	11.07	10.91	10.75	10.59
8°C	12.05	11.90	11.74	11.58	11.43	11.27	11.11	10.96	10.80	10.65	10.49	10.33
9°C	11.77	11.62	11.46	11.31	11.16	11.01	10.85	10.70	10.55	10.39	10.24	10.09
10°C	11.50	11.35	11.20	11.05	10.90	10.75	10.60	10.45	10.30	10.15	10.00	9.86
11°C	11.24	11.09	10.94	10.80	10.65	10.51	10.36	10.21	10.07	9.92	9.78	9.63
12°C	10.98	10.84	10.70	10.56	10.41	10.27	10.13	9.99	9.84	9.70	9.56	9.41
13°C	10.74	10.60	10.46	10.32	10.18	10.04	9.90	9.77	9.63	9.49	9.35	9.21
14°C	10.51	10.37	10.24	10.10	9.96	9.83	9.69	9.55	9.42	9.28	9.14	9.01
15°C	10.29	10.15	10.02	9.88	9.75	9.62	9.48	9.35	9.22	9.08	8.95	8.82
16°C	10.07	9.94	9.81	9.68	9.55	9.42	9.29	9.15	9.02	8.89	8.76	8.63
17°C	9.86	9.74	9.61	9.48	9.35	9.22	9.10	8.97	8.84	8.71	8.58	8.45
18°C	9.67	9.54	9.41	9.29	9.16	9.04	8.91	8.79	8.66	8.54	8.41	8.28
19°C	9.47	9.35	9.23	9.11	8.98	8.86	8.74	8.61	8.49	8.37	8.24	8.12
20°C	9.29	9.17	9.05	8.93	8.81	8.69	8.57	8.45	8.33	8.20	8.08	7.96
21°C	9.11	9.00	8.88	8.76	8.64	8.52	8.40	8.28	8.17	8.05	7.93	7.81
22°C	8.94	8.83	8.71	8.59	8.48	8.36	8.25	8.13	8.01	7.90	7.78	7.67
23°C	8.78	8.66	8.55	8.44	8.32	8.21	8.09	7.98	7.87	7.75	7.64	7.52
24°C	8.62	8.51	8.40	8.28	8.17	8.06	7.95	7.84	7.72	7.61	7.50	7.39
25°C	8.47	8.36	8.25	8.14	8.03	7.92	7.81	7.70	7.59	7.48	7.37	7.26
26°C	8.32	8.21	8.10	7.99	7.89	7.78	7.67	7.56	7.45	7.35	7.24	7.13
27°C	8.17	8.07	7.96	7.86	7.75	7.64	7.54	7.43	7.33	7.22	7.11	7.01
28°C	8.04	7.93	7.83	7.72	7.62	7.51	7.41	7.30	7.20	7.10	6.99	6.89
29°C	7.90	7.80	7.69	7.59	7.49	7.39	7.28	7.18	7.08	6.98	6.87	6.77
30°C	7.77	7.67	7.57	7.47	7.36	7.26	7.16	7.06	6.96	6.86	6.76	6.66
31°C	7.64	7.54	7.44	7.34	7.24	7.14	7.04	6.94	6.85	6.75	6.65	6.55

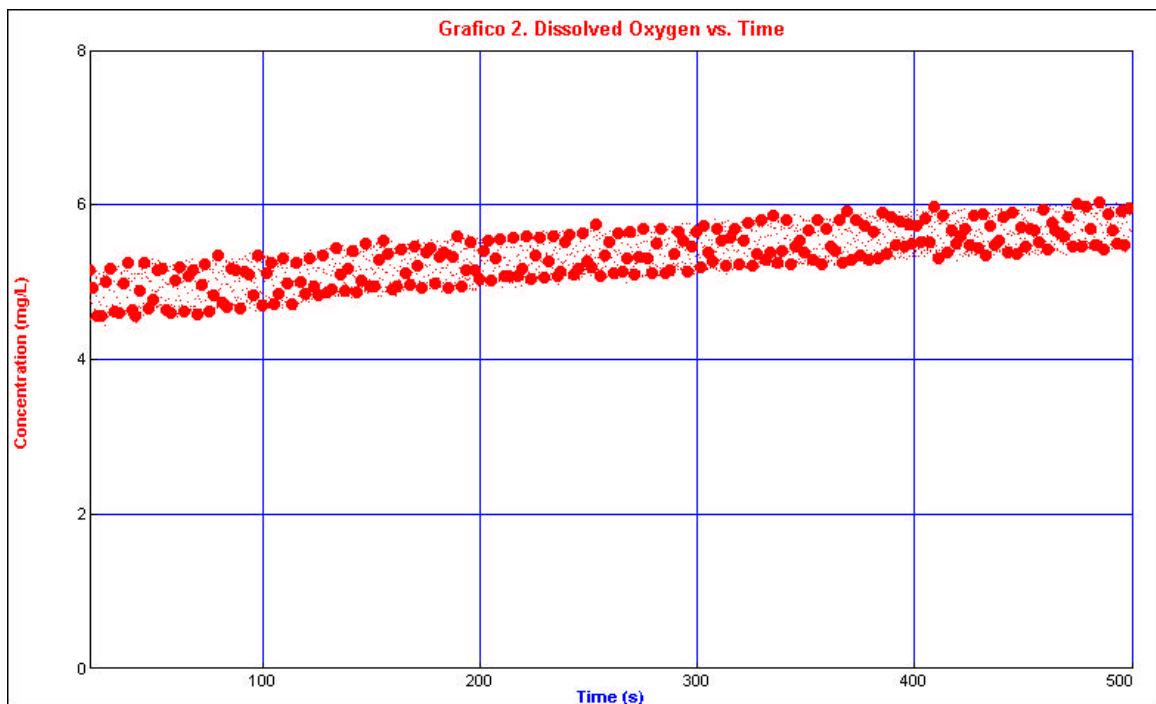
3. Variazioni della concentrazione

Per evidenziare lo scambio di ossigeno tra l'aria e l'acqua, si può effettuare una misura della variazione della **concentrazione** di ossigeno nel tempo di un campione di *acqua* "degassata". L'*acqua* (soluzione acquosa) in cui la concentrazione di ossigeno è minore della solubilità si trova in una condizione di non equilibrio rispetto alla soluzione satura, quindi, in presenza dell'ossigeno dell'aria cercherà di raggiungere la condizione di equilibrio, ossia la concentrazione di ossigeno aumenterà fino a raggiungere il valore della solubilità.

L'*acqua* in parte degassata si ottiene facendo bollire l'acqua per qualche minuto, in questo modo si allontana la maggior parte dell'ossigeno disciolto. E' necessario ricordare che la solubilità dell'ossigeno, nell'acqua, aumenta al diminuire della temperatura, quindi un campione di acqua degassata calda scioglie meno ossigeno dello stesso campione di acqua fredda. Se si vuole effettuare la misura a temperatura ambiente, bisogna impedire che l'ossigeno si sciolga di nuovo durante il raffreddamento, quindi è utile impedire il contatto della soluzione con l'aria, p.es. riempiendo un recipiente (barattolo per conserve alimentari) fino all'orlo e tappandolo immediatamente. Per lo stesso motivo, è necessario, una volta raffreddata l'*acqua*, e aperto il recipiente, procedere immediatamente alla misura della **concentrazione** di ossigeno. Il software della Vernier raccoglie i dati relativi alla **concentrazione** in funzione del tempo. La velocità di solubilizzazione dell'ossigeno dipende dalla superficie di contatto aria-acqua, dalla temperatura e dalla pressione parziale di ossigeno. Poiché il processo è abbastanza lento, è bene aumentare la superficie con una moderata agitazione (con agitatore magnetico). Nel grafico 1, sono stati utilizzati 500 mL di acqua con una superficie di contatto di circa 40 cm² e come si può notare l'aumento della **concentrazione** di ossigeno è molto lento, nonostante si sia utilizzata l'agitazione.



Diminuendo invece la quantità d'acqua (50 mL), e aumentando la superficie di contatto (110cm^2), la variazione della **concentrazione** di ossigeno è molto maggiore (grafico 2).



4. Variazione della solubilità: effetto della temperatura e della pressione

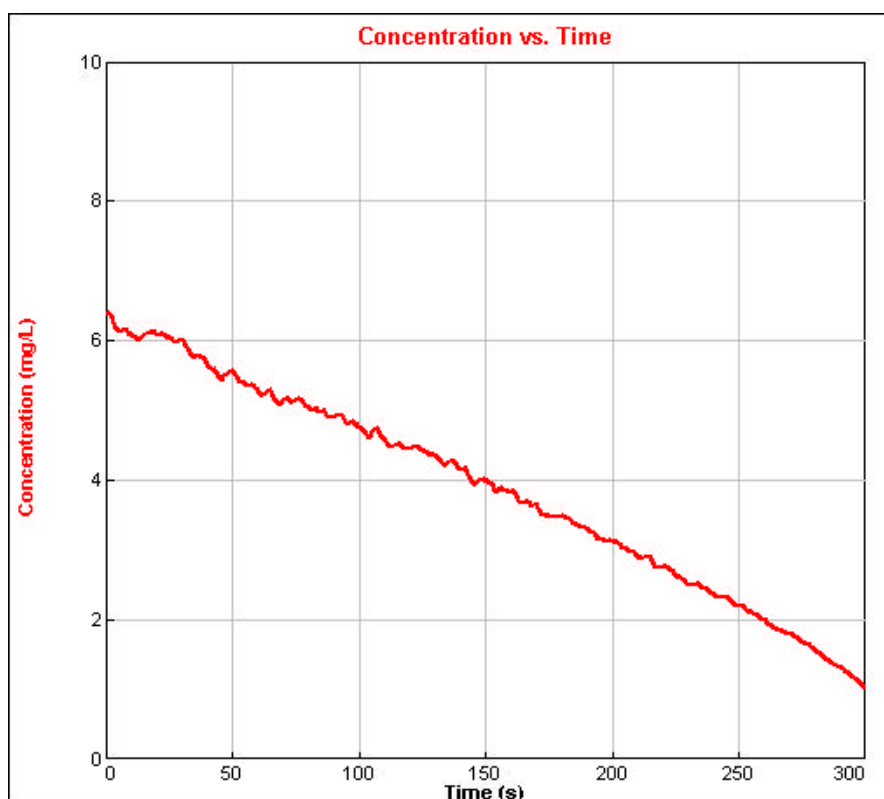
La **solubilità** di un gas è influenzata sia dalla temperatura sia dalla pressione.

La **solubilità** dell'ossigeno in acqua, come quella di altri gas, diminuisce all'aumentare della temperatura. Questo andamento rispecchia il fatto che il processo di dissoluzione è un processo esotermico. In conformità con il principio dell'**equilibrio** mobile, la soluzione satura reagisce all'aumento della temperatura trasformando parte del soluto in soluzione in soluto allo stato puro, che si allontana, assorbendo parte del calore fornito dall'esterno.

La velocità di dissoluzione, avendo una piccola **energia di attivazione**, non è influenzata dalla variazione di temperatura, mentre la velocità di desolubilizzazione, essendo questo processo endotermico e quindi avendo un'**energia di attivazione** più alta, aumenterà all'aumentare della temperatura. Il risultato di queste variazioni delle velocità è che la **solubilità**, o la **concentrazione**, diminuisce all'aumentare della temperatura, in quanto si favorisce la desolubilizzazione.

Con la sonda dell'ossigeno e il software Vernier è possibile misurare la variazione di **concentrazione** di ossigeno al variare della temperatura. Scaldando, infatti, una soluzione satura di ossigeno e monitorando la **concentrazione** nel tempo si può notare la diminuzione della **concentrazione** (grafico 3).

Grafico 3. Variazione della concentrazione di ossigeno per riscaldamento



Se invece si utilizza, contemporaneamente alla sonda dell'ossigeno, anche una che misura la temperatura, il software è in grado di fornire i dati relativi alla variazione della **concentrazione** di ossigeno in funzione della variazione della temperatura.

La **solubilità** di un gas invece aumenta sempre all'aumentare della pressione.

L'influenza della pressione sulla **solubilità** di un gas in un liquido è stabilita dalla legge di Henry:

$$p = H x$$

dove H è la costante di Henry, x è la **frazione molare** del gas disciolto, e p è la **pressione parziale** del gas.

Questa legge è una legge ideale e pertanto viene seguita soltanto dai gas a **solubilità** molto limitata, come il caso dell'ossigeno, per valori della pressione non eccessivamente elevati, e temperature relativamente alte.

Con la sonda dell'ossigeno e una sonda che misura la pressione (od un semplice manometro) si può misurare la **concentrazione** di ossigeno al variare della pressione. (Figura 3)

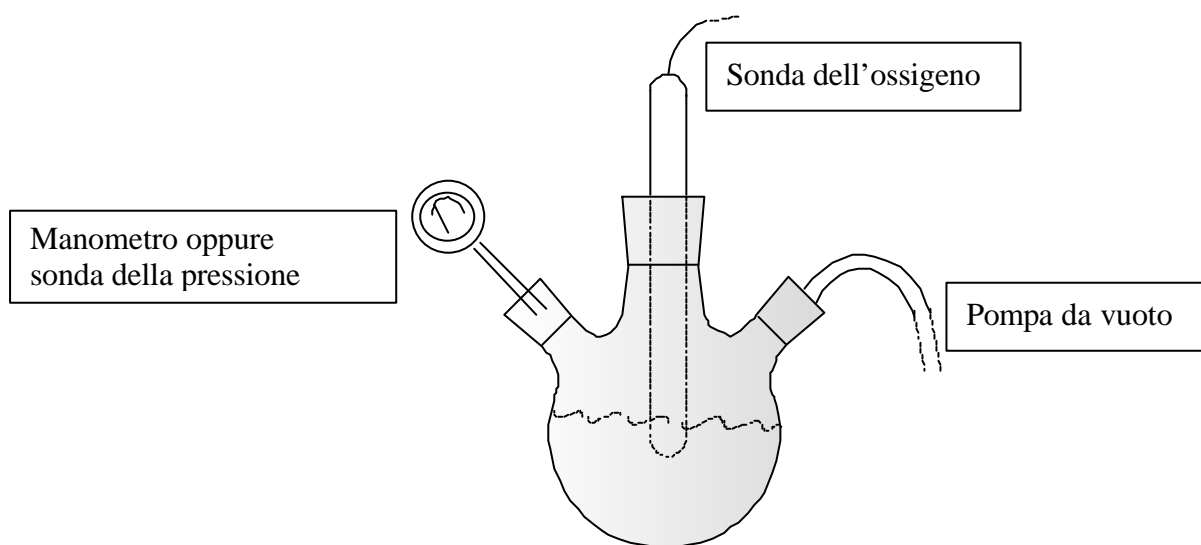
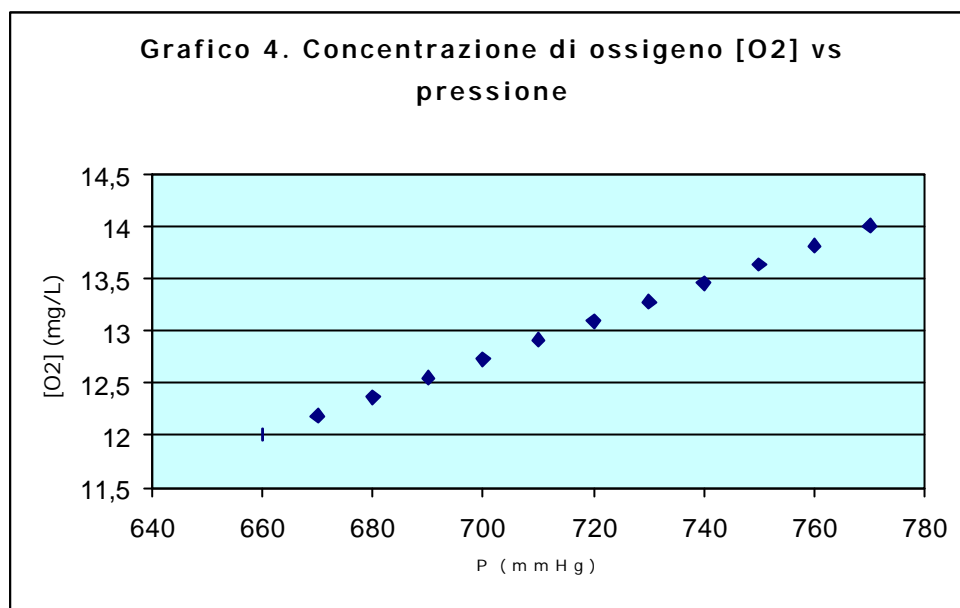


Figura 3. Apparecchiatura per la misura della **concentrazione** di ossigeno al variare della pressione.

Azionando la pompa da vuoto (è sufficiente una pompa a caduta d'acqua) nel pallone diminuisce la pressione e conseguentemente anche la **concentrazione** di ossigeno. Utilizzando per la misura della pressione una sonda della Vernier, si otterrà direttamente il grafico della variazione della **concentrazione** in funzione della pressione. (Grafico 4). L'esperimento, però, deve essere condotto in un bagno termostato per evitare contemporanee variazioni di temperatura.



5. Indicazioni didattiche

Nel progettare questo percorso didattico si è tenuto conto di due aspetti complementari che caratterizzano la costruzione della conoscenza scientifica: il momento applicativo e d'indagine e quello cognitivo-intellettuale. Il primo si veicola nella pratica di laboratorio intesa sia come spazio finalizzato all'esecuzione di compiti prefissati che all'acquisizione di abilità sperimentali finalizzati all'appropriazione di un modo di guardare, descrivere e interpretare i fenomeni.

Il momento cognitivo, invece, si ha nelle attività di modellizzazione, schematizzazione e formalizzazione dei fenomeni osservati.

Si consiglia, pertanto, di utilizzare un metodo "induttivo-sperimentale" secondo le seguenti fasi:

1. Fase motivazionale: ricognizione e definizione del problema; formulazione di ipotesi di lavoro.
2. Fase sperimentale: ottenimento dei dati sperimentali, stima dei limiti delle misure.
3. Fase di apertura mentale: elaborazione dei dati; formulazione di correlazioni e di leggi empiriche; generalizzazione.
4. Fase creativa: formulazione di modelli teorici di interpretazione.

Le fasi 1 e 2, tipicamente di tipo induttivo, sono adatte ad allievi di età compresa tra 11 e 14 anni, la fase 3, ancora di tipo induttivo, e la fase 4, di tipo deduttivo, poiché rientrano nella logica astratta, sono indicate per alunni di età superiore ai 14 anni.

Alla fine delle attività didattiche, per effettuare una valutazione sommativa dell'intero percorso, si può utilizzare la metodologia del "problem solving" che potrebbe essere il seguente: "Ti vengono consegnati tre virgulti di elodea. Devi evidenziare la formazione di ossigeno nella fotosintesi". L'alunno, in questo caso, deve collegare conoscenze acquisite in ambiti disciplinari differenti ed effettuare gli opportuni collegamenti. Il lavoro può essere svolto in gruppo e prima di passare in laboratorio il gruppo deve chiarire la strategia di soluzione all'insegnante ed essere eventualmente corretta.

6. Glossario

- **Concentrazione:** quantità di soluto in rapporto alla quantità di soluzione o di solvente.
- **Densità elettronica:** concentrazione della carica elettronica in un dato volume.
- **Energia di attivazione:** quantità minima di energia che un atomo od una molecola deve acquistare per far avvenire la trasformazione.
- **Equilibrio:** stadio di una trasformazione quando la velocità diretta eguaglia la velocità inversa
- **Frazione molare:** rapporto tra il numero di moli di un componente della miscela rispetto al numero totale di moli di tutti i componenti.
- **Molecola polare:** molecola nella quale i centri di densità delle cariche positive e negative non coincidono.
- **Momento dipolare:** prodotto delle entità delle cariche parziali di un dipolo moltiplicato per la loro distanza; misura della polarità di una molecola.
- **Pressione parziale:** pressione che un singolo componente di una miscela gassosa eserciterebbe se occupasse da solo lo stesso volume totale occupato dalla miscela.
- **Processo reversibile:** trasformazione in cui dallo stadio finale è possibile ritornare allo stadio di partenza.
- **Solubilità:** quantità massima di soluto che si può sciogliere in una certa quantità di solvente.