

BIOINGEGNERIA (BARBINI) – 20/11/15 – LEZIONE 1

INTRODUZIONE

Strumentazione Biomedica. Allora, di che cosa ci occuperemo? Abbiamo detto ci occupiamo di strumentazione biomedica o più che di strumentazione biomedica diciamo di tipologie e di quella parte della tecnologia che riguarda i dispositivi che vengono utilizzati in medicina. Dispositivi che sono, vedremo, faremo due tipi di esempi: Dispositivi sia per raccogliere dati e fare diagnosi, sia dispositivi di tipo protesico tipo organi artificiali. È una cosa estremamente importante avere un'idea di come funzionino questi tipi di dispositivi perché la tecnologia è un aspetto essenziale della medicina moderna. Cioè la medicina moderna si serve dalla mattina alla sera dell'uso di tecnologia e cosa si intende per **Tecnologia**? L'organizzazione Mondiale della Sanità definisce la tecnologia sanitaria con una definizione molto ampia: "è l'insieme che comprende tutti gli strumenti, le apparecchiature, i farmaci e le procedure impiegati nell'erogazione dei servizi sanitari, nonché i sistemi organizzativi e di supporto attraverso i quali l'assistenza sanitaria viene fornita", quindi praticamente la tecnologia è tutto quello che si utilizza in ambito sanitario. Il Ministero della Sanità Italiano dà una definizione leggermente più restrittiva di tecnologia sanitaria: è l'insieme del lavoro e dei dispositivi medici che afferisco al settore della sanità, ad eccezione dei farmaci, quindi toglie i farmaci il Ministero della Sanità dalla tecnologia. Io in realtà propendo più per una definizione di tecnologia di sanità così come viene data dall'OMS piuttosto che quella che è data dal Ministero della Salute Italiano. E quello che viene definito per esempio come tecnologia è una definizione che avete visto moltissimo perché dice: tutte le metodologie utilizzate dagli operatori sanitari per promuovere la salute, per prevenire e trattare la malattia, per migliorare la riabilitazione e le cure a lungo termine; quindi tutto quello non solo di tipo strumentale ma anche farmacologico e di procedure che servono nell'assistenza sanitaria.

In base a questo criterio è possibile stabilire che all'interno delle tecnologie sanitarie rientrino gli strumenti (cosa di cui ci occuperemo esplicitamente noi) ma anche i presidi medico-chirurgici, i farmaci e anche le procedure assistenziali.

Noi ci occuperemo del primo punto, cioè restringeremo la nostra analisi alle Apparecchiature e Strumenti; le altre cose le vedrete in altri corsi.

Per fare questo io prenderò in esame un apparato, che è l'apparato respiratorio, il prof. Cevenini prenderà in considerazione l'apparato cardiovascolare e tutti e due vedremo quali sono gli strumenti e i dispositivi che vengono utilizzati per effettuare delle misure all'interno di questi apparati e quei dispositivi che permettono di effettuare misure che poi andranno a far parte di quell'insieme dei segni sul quale il

medico lavorerà e ragionerà per arrivare alla diagnosi. Chiaramente l'ambito che prendiamo in esame è un ambito ristretto perché fondamentalmente ci occupiamo solo di due apparati, ma il tempo che abbiamo a disposizione non permette di andare a considerare l'insieme globale della strumentazione biomedica considerata a fini diagnostici, però il fatto di aver capito come funzionano questi dispositivi in questi due ambiti mi permette di avere un'apertura mentale per cui dovrete essere in grado alla fine di poter capire anche come funzionano gli altri strumenti di tipo diagnostico, perché bene o male il modo di ragionare è sempre quello; quindi cambierà la specifica dello strumento ma non cambia il modo di ragionare. Dopo di che io invece dedicherò circa la metà delle ore a mia disposizione per andare a vedere i principali dispositivi terapeutici e protesici, anche in questo caso rivolgendo l'attenzione soprattutto al sistema cardiovascolare, al sistema respiratorio e anche al sistema renale. Quindi vedremo come funzionano i dispositivi di tipo pacemaker o i dispositivi di tipo assistenza circolatoria, fino ad arrivare al cuore artificiale, vedremo come funzionano i dispositivi di dialisi e quindi il rene artificiale, vedremo come funzionano i dispositivi di assistenza ventilatoria e quindi i ventilatori meccanici. Le ultime ore del corso le dedicherò per spiegarvi un attimo come funziona una nuova disciplina che ogni giorno di più prende piede all'interno degli ospedali e che si chiama **Health Technology Assessment** ovvero valutazione della tecnologia sanitaria e che è una disciplina nella quale sono coinvolte varie figure a livello sanitario proprio per stabilire quali sono i criteri per effettuare delle scelte giuste in momenti in cui si voglia acquisire o si voglia utilizzare una determinata tecnologia. Perché è chiaro che il mondo è cambiato moltissimo da quando la tecnologia è arrivata in maniera pesante fino ad oggi, per cui abbiamo assistito fondamentalmente a tre fasi di evoluzione: una prima fase nella quale bene o male c'erano molti soldi a disposizione (parlo degli anni '60) in cui la tecnologia stava nascendo e si comprava tutto quello che ci veniva in mente di comprare. Quando poi ci siamo accorti che in realtà questo aveva una spesa troppo elevata, i soldi sono cominciat a mancare e siamo passati a una seconda fase che era quello di tagliare. La terza fase è quella che si sta sviluppando adesso per cui è fondamentale riuscire a capire come funziona, è una fase di assessment, cioè di valutazione, cioè valutare quali sono effettivamente le tecnologie che servono e invece quelle che non servono nel nostro ambiente.

STRUMENTI DI MISURA PER L'APPARATO RESPIRATORIO

Qual è la funzione principale dell'apparato respiratorio? La funzione principale (ci sono altre funzioni secondarie come vedrete in fisiologia) è il trasporto di aria dall'esterno alle sacche alveolari e viceversa, attraverso quello che è l'albero tracheo-

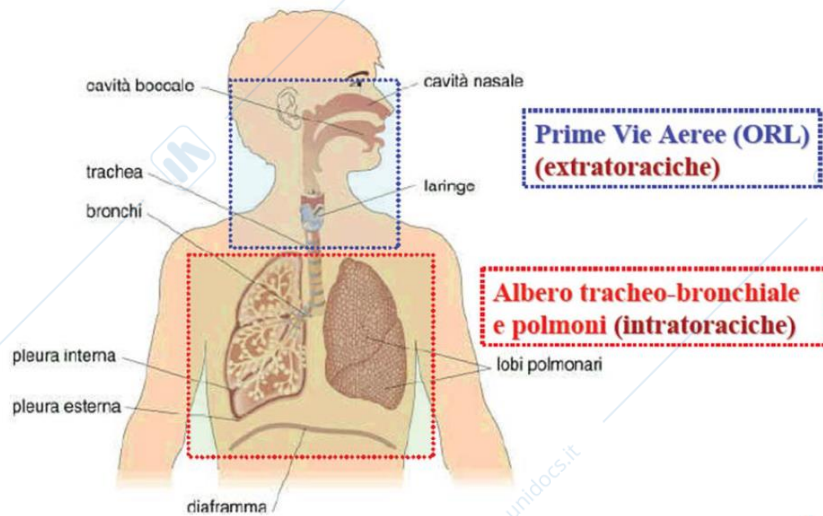
bronchiale e gli scambi gassosi tra aria e sangue. Ovviamente la funzione respiratoria è caratterizzata da due fasi: la prima fase è la fase inspiratoria in cui l'aria e l'ossigeno passano dall'ingresso delle vie aeree e arrivano alle sacche alveolari e la seconda fase è l'espiazione in cui l'aria a questo punto che si è caricata di CO₂ percorre il cammino inverso.

Nella lezione che faremo oggi dedicheremo la maggior parte del tempo a vedere come funziona la fisiologia dell'apparato respiratorio; questo è fondamentale tutte le volte che si deve andare a studiare degli strumenti perché se non sappiamo come funziona dal punto di vista anatomo-fisiologico l'apparato che si vuole andare a studiare, non si riesce a capire che senso ha utilizzare lo strumento. Lo strumento deve andare a fare delle misure su determinate variabili o parametri che caratterizzano il sistema che si vuole studiare; se non conosciamo il sistema non si riesce a capire quali sono le variabili/i parametri che si vogliono andare a misurare e perché si vuole andare a misurare quel tipo di variabile o quel tipo di parametro. Quindi è chiaro che prima di capire che tipo di tecnologia bisogna impiegare bisogna capire come funziona l'apparato. E quando si studia l'apparato respiratorio di solito si fanno due tipi di valutazioni, nel senso che sono fatte su **scale temporali di valutazione**:

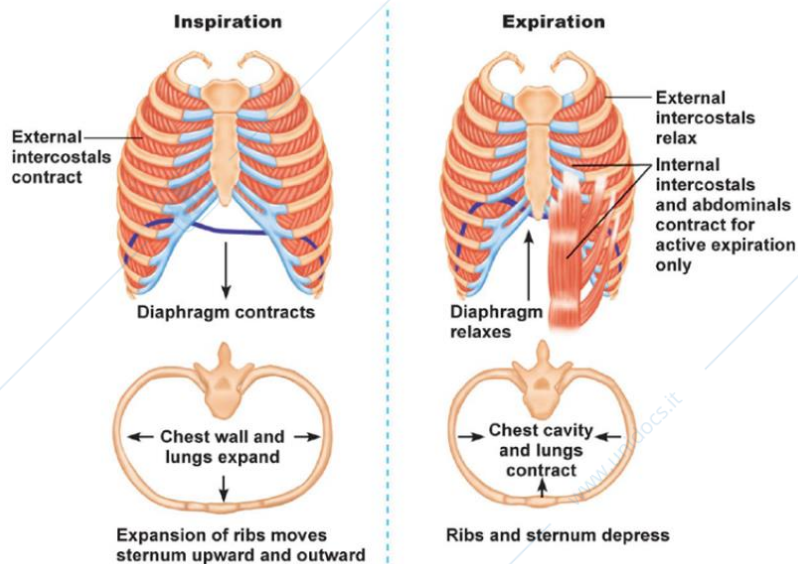
- Un tipo di valutazione è quella che viene fatta su una scala temporale relativamente lunga (in cui le valutazioni possono essere ripetute a distanza di giorni o di mesi o addirittura di anni) e in questo caso quelle che sono le nostre valutazioni cioè i test che vengono fatti, che vengono chiamati **test di funzionalità polmonare** (TFP) a cosa servono? Servono a scopo di screening ad esempio per identificare delle patologie in fase precoce, quindi una volta ogni tot anni viene fatta una valutazione per vedere se è possibile individuare in maniera precoce una determinata patologia. Oppure nel contesto di esami clinici periodici quando abbiamo a che fare con pazienti che hanno patologie polmonari forti e quindi viene fatta una valutazione con tempi abbastanza lunghi per andare a vedere che cosa succede o per valutare cambiamenti acuti, oppure a scopo di follow-up per seguire l'evoluzione della patologia per valutare nel tempo la risposta di questa patologia ad un trattamento.

- C'è poi un tipo di valutazione che viene fatta in una scala temporale molto più breve; questa attività viene eseguita di solito in presenza di situazioni molto critiche e in pazienti che sono ricoverati in ospedale molto spesso in unità di terapia intensiva. In questo caso le valutazioni vengono fatte o in maniera continua (il paziente viene monitorato istante per istante) oppure ad intervalli di tempo estremamente brevi (pochi minuti l'uno rispetto all'altro). Quindi vedete che in questo caso abbiamo già un carattere distintivo in qualche modo che io posso far effettuare o delle valutazioni con una scala temporale piuttosto lunga o valutazioni con scala temporale brevissima.

Schematizzazione dell'apparato respiratorio (sistema deputato agli scambi gassosi : $O_2 - CO_2$)



Muscoli inspiratori e espiratori

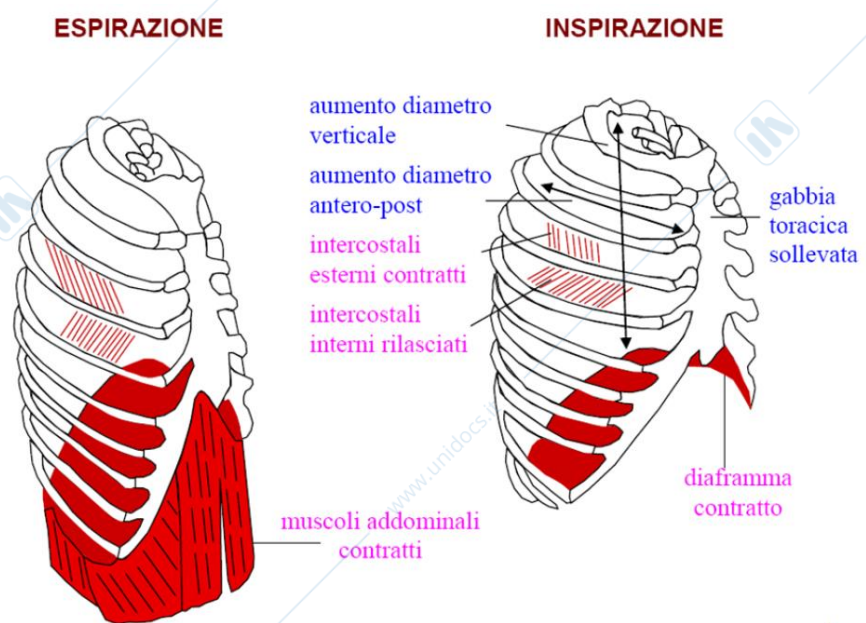


Questo è uno schema dell'apparato respiratorio e qui ci sono i muscoli respiratori che sono quelli deputati a far entrare ed uscire l'aria dai polmoni, quindi a mettere in movimento l'aria dall'esterno verso i polmoni e viceversa. Chiaramente questo è quello che accade quando il soggetto è in respiro spontaneo; quando il paziente ha un'insufficienza di tipo respiratorio e viene in ventilazione meccanica a questo punto i muscoli vengono aiutati e addirittura vengono sostituiti dalla macchina che sarà essa stessa o ad aiutare a movimentare l'aria dall'esterno verso l'interno o in prima persona, a quel punto senza l'ausilio dei muscoli del paziente, a movimentare da sola l'aria dall'esterno verso l'interno e viceversa.

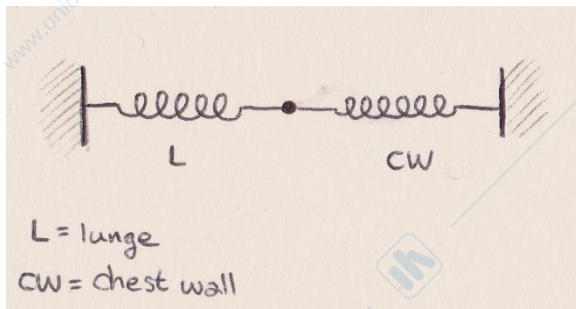
In fase di respiro spontaneo i muscoli principali che vengono utilizzati sono il diaframma e i muscoli intercostali esterni; in parte quando la respirazione è attiva, il

che vuol dire che ad un certo momento siamo noi stessi a regolare la respirazione volontariamente, vengono utilizzati in un individuo normale anche i muscoli intercostali interni e i muscoli addominali. Tanto più l'individuo è patologico tanto più il numero di muscoli che viene utilizzato nella respirazione aumenta. Se voi respirate spontaneamente io posso dire che essendo giovani e sani l'unico muscolo che in realtà utilizzate per la respirazione è il diaframma; se a voi invece dico di fare un'inspirazione massimale allora vi accorgete che incominciate ad utilizzare anche altri muscoli e principalmente i muscoli intercostali interni; una volta fatta un'inspirazione massimale se vi dico di fare un'espirazione massimale allora vi accorgete che in gioco cominciano a entrare anche i muscoli addominali. Un individuo patologico, magari che ha delle ostruzioni elevate all'interno delle vie aeree, non ce la fa con il solo diaframma a fare un respiro tranquillo e a quel punto questi tipi di muscoli che in un individuo sano in respiro tranquillo vengono tenuti al di fuori del meccanismo della respirazione, vengono invece utilizzati in un individuo patologico.

Cosa succede in fase inspiratoria? Succede che il diaframma si contrae, abbiamo la gabbia toracica sollevata e in contemporanea si ha un aumento del diametro verticale e un aumento del diametro anteroposteriore. Quindi si ha un'espansione della gabbia toracica e a questa espansione vedremo



perché corrisponde un ingresso di aria dall'esterno verso i polmoni. Durante la fase espiratoria in un soggetto con respiro normale la fuoriuscita di aria dai polmoni è dovuta semplicemente al rilasciamento del diaframma, cioè il diaframma si rilaccia, i polmoni sono una struttura elastica e passivamente quindi senza nessun intervento muscolare esterno i polmoni tendono a ritornare nella loro condizione iniziale e l'aria fuoriesce verso l'esterno. Se voglio far uscire questa aria più velocemente o il soggetto è patologico è chiaro che ho bisogno di un ausilio perché il semplice ritorno elastico non ce la fa a far uscire l'aria o con quella velocità o in un soggetto di tipo patologico, e allora mi servono tutti quelli che sono i muscoli espiratori.



Come funziona il tutto? Allora, i polmoni sono una struttura elastica e in qualche modo rimangono adesi alla gabbia toracica; quindi noi siamo in una situazione in cui abbiamo due "molle" da un punto di vista fisico connesse, da una parte ci sono i polmoni e da una parte c'è la gabbia toracica che è fissata

da una parte e dall'altra parte è fissata ai polmoni (la molla) e l'altra molla è il secondo polmone che è fissato ad una parete e dall'altra parte c'è fissata la gabbia toracica. Quindi è come se avessimo due molle bloccate fissate tra loro ed è chiaro che queste due molle hanno un punto di equilibrio. cosa succede se taglio il punto in cui fisso le molle? Una molla si contrae in una certa direzione e l'altra si contrae nell'altra direzione e questo è quello che succede nei polmoni perché presi separatamente (isolati) i polmoni sono un sistema elastico che per sua natura tende a collassare; la gabbia toracica che è anch'essa una struttura elastica per sua natura tende ad espandersi, quindi se stacco un polmone dalla gabbia toracica questa si espande. quindi sono due molle una che tira in un senso e una che tira in verso opposto. Queste due molle sono unite una rispetto all'altra e quando il paziente inspira succede che la gabbia toracica si espande, quindi la molla "gabbia toracica" va in una certa direzione e si tira dietro la molla "polmone". Nel momento in cui io rilascio i muscoli (fondamentalmente il diaframma) il sistema ritorna nella sua posizione iniziale, il polmone tende a ritornare nella sua posizione iniziale e la gabbia toracica gli va dietro. Questo quindi è un modellino estremamente semplice da un punto di vista funzionale di come funziona il sistema. È chiaro che se viene a mancare questo punto di "saldatura" ma non c'è saldatura tra queste due molle, il tutto non funziona più ed è la situazione ad esempio patologica tipica del pneumotorace. Il pneumotorace è la situazione per cui queste due molle vengono sganciate l'una rispetto all'altra e a quel punto la gabbia toracica si espande e il polmone si collassa (non c'è più il punto di "saldatura" tra gabbia toracica e polmone).

MECCANICA DELLA VENTILAZIONE POLMONARE: pressione, flussi e volumi

Il polmone

- * è una struttura elastica che, in assenza di una forza elastica che lo tenga espanso, si collassa espellendo l'aria all'esterno attraverso la trachea;
- * fluttua nella cavità toracica (non ha punti d'attacco alla parete toracica ed è semplicemente sospeso al suo ilo in corrispondenza del mediastino);
- * è circondato da uno strato molto sottile di liquido pleurico (lubrificante per i movimenti all'interno della cavità).

Il liquido pleurico è continuamente rimosso attraverso i linfatici (leggera aspirazione tra la superficie della pleura viscerale e parietale).

→ I polmoni

- * Sono adesi alla parete toracica
- * Possono liberamente scivolare sulla superficie della parete toracica.

che il polmone è avvolto da una membrana che si chiama pleura e la pleura che avvolge il polmone è quella che si chiama pleura viscerale; dopo di che questa pleura si riavvolge su se stessa e va in contatto con la parete toracica. Quindi noi siamo in una situazione di questo tipo in cui abbiamo da un lato il polmone dall'altro la gabbia toracica. Tra queste due pleure c'è una pressione minore della pressione atmosferica, quindi c'è una depressione tra questi due foglietti. (Se voi prendete un palloncino e al suo interno voi create una pressione più bassa rispetto alla pressione atmosferica, al palloncino succede che si attaccano tra loro le pareti del palloncino e questa depressione che c'è all'interno dello spazio pleurico fa sì che la pleura viscerale e la pleura parietale vengano ad incollarsi l'una all'altra; quindi tengono il polmone adeso alla gabbia toracica). È una saldatura virtuale, non c'è una saldatura fisica, non c'è un punto di attacco ma c'è il fatto che queste due pleure sono adese l'una all'altra per il fatto che al loro interno c'è una pressione più bassa rispetto alla pressione atmosferica. In caso di pneumotorace succede che per un qualunque motivo (es. accoltellamento) io vengo a forare questi foglietti e quindi la pleura parietale si mette in contatto con l'atmosfera; nel momento in cui ciò avviene all'interno dello spazio pleurico la pressione diventa la pressione atmosferica, non c'è più quella depressione che tiene il polmone adeso alla gabbia toracica e allora a quel punto il polmone va per

Allora riusciamo a capire adesso com'è che può essere fatta questa "saldatura" tra gabbia toracica e polmone, perché in realtà il polmone non è fisicamente saldato alla gabbia toracica, però di fatto è adeso alla gabbia toracica.

Il polmone che cos'è? (punti slide)

Ora in realtà noi abbiamo

conto suo e collassa in quella zona e la gabbia toracica va per conto suo e in quella zona si espande.

La pressione endopleurica o intrapleurica o semplicemente pleurica è la pressione presente nello spazio intrapleurico. In respiro spontaneo questo valore della pressione pleurica varia da -5 cmH₂O all'inizio dell'inspirazione a -7 cmH₂O alla fine dell'espiazione. Cosa significa la pressione -5 cmH₂O? è chiaro che è una pressione misurata rispetto alla pressione atmosferica, quindi dire che nello spazio intrapleurico c'è una pressione di -5 cmH₂O significa che nello spazio intrapleurico all'inizio dell'inspirazione c'è una pressione che è 5 cmH₂O più bassa rispetto alla pressione atmosferica. Cioè sono pressioni misurate tutte prendendo come riferimento (come

Pressione endopleurica o intrapleurica o, semplicemente, **pleurica** (P_{PL}): pressione presente nello spazio intrapleurico (tra pleura viscerale e pleura parietale).

In respiro spontaneo tranquillo Ppl varia fra circa -5 cmH₂O (inizio dell'inspirazione) e -7,5 cmH₂O (fine dell'inspirazione).

Pressione alveolare (P_{ALV}): pressione presente all'interno degli alveoli.

In respiro spontaneo tranquillo Palv è minore della pressione atmosferica in ispirazione e maggiore in espiazione.

Pressione all'inizio delle vie aeree: P_{AWO}

Pressione transpolmonare (P_{TP}): $P_{ALV} - P_{PL}$

Pressione transvieaeree (P_{TWA}): $P_{AWO} - P_{PL}$

N.B. Sia la pressione transpolmonare sia la pressione transvieaeree sono pressioni transmurali.

aeree)

e poi ci sono due pressioni transmurali, cioè le pressioni attraverso una parete che sono:

- Pressione transpolmonare (differenza tra pressione alveolare e pressione pleurica) per cui se la pressione transpolmonare è positiva vuol dire che la pressione all'interno dell'alveolo è superiore rispetto alla pressione pleurica e l'alveolo è disteso; se questa si annulla o diventa negativa l'alveolo collassa;

- Pressione transvieaeree (differenza tra pressione che ho all'apertura delle vie aeree e pressione pleurica)

Ora, in respiro spontaneo la pressione che ho all'ingresso delle vie aeree quanto vale? Vale 0 perché è la pressione atmosferica. Com'è che si muove l'aria dall'esterno verso l'interno dei polmoni? Si muove per **convezione**, cioè per differenza di pressione,

0) la pressione atmosferica.

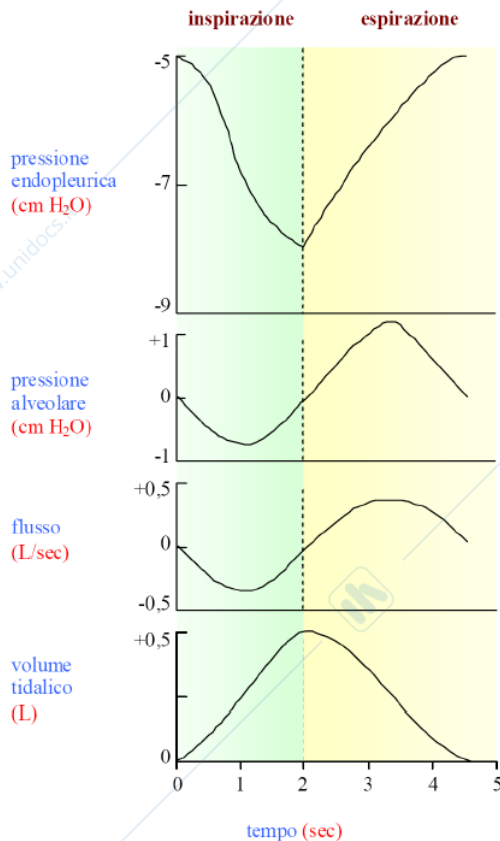
In fisiologia respiratoria le pressioni vengono misurate in cmH₂O (centimetri d'acqua) e in cardiologia vengono misurate in mmHg.

Le pressioni in gioco nel sistema respiratorio sono:

- Pressione alla bocca (all'ingresso delle vie

significa che l'aria va dalla bocca verso gli alveoli se la pressione alveolare è più bassa; se la pressione alveolare diventa più alta rispetto alla bocca, l'aria va dagli alveoli verso l'esterno. In respiro meccanico le cose non sono proprio così perché in respiro meccanico fondamentalmente nella fase respiratoria coi ventilatori attuali io pompo l'aria dalla bocca verso i polmoni; in respiro spontaneo l'aria entra per convezione.

SEQUENZA DEGLI EVENTI DURANTE LA FASE INSPIRATORIA



- a) I muscoli inspiratori si contraggono.
- b) La cavità toracica si espande.
- c) La pressione endopleurica diventa più negativa.
- d) La pressione trasmurale aumenta.
- e) I polmoni si espandono.
- f) La pressione alveolare diventa subatmosferica.
- g) L'aria penetra nei polmoni finché la pressione alveolare uguaglia quell'atmosferica.

Dinamica di un normale ciclo respiratorio (12 atti/minuto) con durata inspiratoria ed espiratoria pari a 2 e 3 s. (← resistenza al flusso durante l'espirazione maggiore che durante l'inspirazione).

11

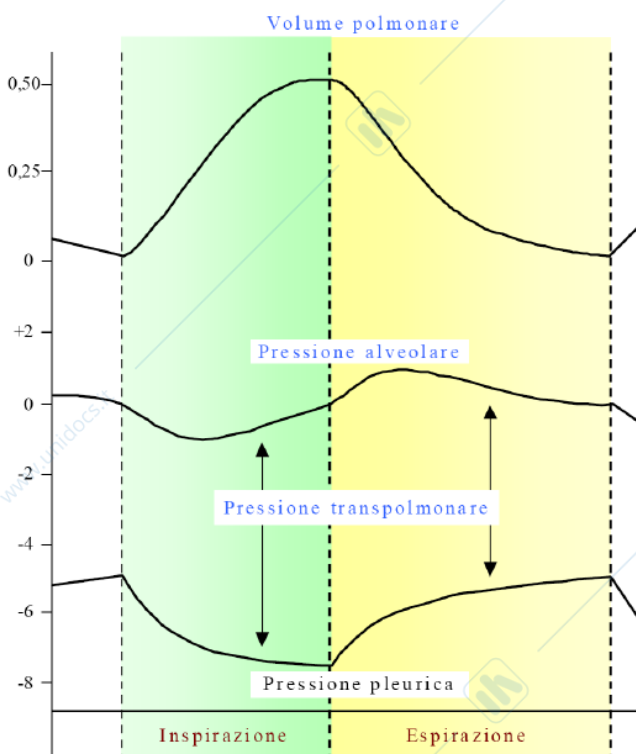
Com'è che si crea questa pressione subatmosferica a livello alveolare? È chiaro che nel momento in cui sono in condizione di equilibrio e ho finito una inspirazione tranquilla, l'aria non entra o esce dai polmoni quindi la pressione alveolare e la pressione atmosferica sono uguali (condizione di equilibrio); a questo punto il paziente mette in funzione i suoi muscoli inspiratori (diciamo il diaframma in condizioni normali) e questo porta ad un'espansione della gabbia toracica. Questo vuol dire che nello spazio intrapleurico se la gabbia toracica tende ad espandersi, la pressione tende a diminuire, va da -5 cmH₂O a -7 cmH₂O, ma nel momento in cui diminuisce la pressione a livello dello spazio intrapleurico la pleura viscerale tende ad andare dietro alla pleura parietale e quindi il polmone tende ad espandersi, l'alveolo tende ad espandersi e nel momento in cui l'alveolo si espande la pressione alveolare tende ad abbassarsi e la pressione alveolare diventa subatmosferica.

Nel momento in cui finisce l'inspirazione succede che il muscolo diaframma (in respiro tranquillo) si rilancia e nel momento in cui si rilancia, la gabbia toracica che si era

espansa tende a ritornare alla sua condizione iniziale, quindi la pleura parietale tende ad avvicinarsi alla pleura viscerale. A questo punto la pressione intrapleurica aumenta e il polmone tende a contrarsi a questo punto, la pressione alveolare diventa più alta rispetto alla pressione atmosferica e il paziente respira.

Nella dinamica di un normale ciclo respiratorio un soggetto fa circa 12 atti respiratori al minuto ovvero ha una frequenza respiratoria di circa 12 respiri/min il che vuol dire che la durata di un ciclo respiratorio è circa 5 sec; di questi 5 secondi 2 secondi sono mediamente dedicati all'inspirazione e 3 secondi sono mediamente dedicati all'espiazione, quindi vuol dire che il tempo per espirare è più lungo di quello che si impiega per inspirare; questo significa fondamentalmente che per buttare fuori un certo volume d'aria ci mettiamo più tempo rispetto a quello che ci mettiamo per inalare lo stesso volume d'aria e quindi che le resistenze che si hanno in fase espiratoria sono più alte delle resistenze che si hanno in fase inspiratoria.

In fisiologia il termine che viene dato al volume d'aria che viene inspirato ed espirato in un atto respiratorio è **Volume Corrente (VT)**, dall'inglese tidal volume). Tipicamente questa quantità di aria è circa 0.5 L.



volume corrente (o **tidal volume, VT**): volume che entra o esce dai polmoni in atto respiratorio, a riposo $VT \cong 500$ ml.

N.B. La pressione transpolmonare P_{TP} è sempre positiva, impedendo ai polmoni di collapsarsi.

Se P_{PT} si annulla il polmone, a causa dell'elasticità, si collassa (es. pneumotorace).

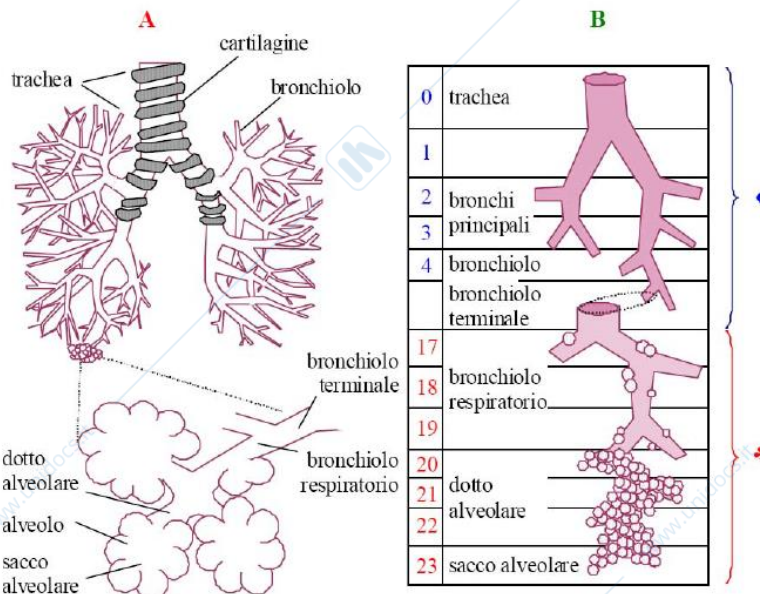
A sinistra voi vedete sovrapposti tra loro i grafici che nella diapositiva precedente erano separati l'uno rispetto all'altro e vedete quindi che c'è la pressione alveolare che in fase inspiratoria è leggermente sopra la pressione atmosferica e in fase espiratoria è sotto la pressione atmosferica e lì c'è un ciclo di inspirazione e di espirazione; vedete che la differenza fra la pressione alveolare e la pressione pleurica è sempre positiva, così come deve essere, cioè la pressione alveolare è costantemente

superiore alla pressione pleurica perché se così non fosse l'alveolo collasserebbe. Ossia la differenza tra pressione alveolare e pressione pleurica, che è la pressione transpolmonare, deve essere sempre positiva e se andiamo a vedere il ciclo respiratorio ci accorgiamo che è così perché in fase inspiratoria non c'è nemmeno bisogno di andare a vedere la figura perché la pressione alveolare è positiva e la pleurica è negativa e quindi facendo la differenza tra una grandezza positiva e una grandezza negativa il risultato senz'altro è un numero positivo; in fase espiratoria dove sono tutte e due negative, noi abbiamo però sempre che la pressione alveolare è superiore rispetto alla pressione pleurica per cui la pressione alveolare è magari 1 cmH₂O sotto la pressione atmosferica e la pressione pleurica è 6 cmH₂O ad un determinato istante sotto la pressione atmosferica per cui la pressione transpolmonare, che è la differenza tra queste due grandezze, è $[-1 - (-6)] = +5$ e quindi è positiva.

Allora noi abbiamo detto questo è quello che ci serve per mettere in movimento l'aria; è chiaro che questa è la parte aerea dell'apparato respiratorio, poi ci sarà anche una parte circolatoria perché la funzione è quella di rimuovere la CO₂ dal sangue e di ossigenare il sangue. Quindi è chiaro che la parte aerea a livello degli alveoli deve essere messa in contatto attraverso una membrana opportuna con la parte circolatoria, quindi i sistemi in gioco sono da un lato l'albero tracheo-bronchiale e dall'altro l'albero vascolare.

Rimanendo alla parte tracheo-bronchiale, **come è fatto questo albero tracheo-bronchiale?** è una serie di tubi altamente ramificati che partendo dalla prima generazione (all'ingresso delle vie aeree) vengono a restringersi e diventano sempre più corti e intensi quando penetrano nelle parti più profonde del polmone. Quindi le vie aeree si suddividono ripetutamente per aumentare la superficie totale dell'albero respiratorio stesso. Si arriva in fondo che la superficie interna del polmone a questo punto nelle ultime generazioni è aumentata ulteriormente dalla formazione di estroflessioni delle piccole vie aeree che costituiscono gli alveoli e in un polmone adulto noi abbiamo da 300 a 500 milioni di alveoli con una superficie interna totale che è circa 75 m². A questo punto una volta che l'aria arriva a livello alveolare il movimento di O₂ e di CO₂ non è più un movimento per convezione, cioè non c'è una pressione idrostatica più alta in un lato rispetto all'altro che spinge l'aria da una parte all'altra, ma è un movimento diffusivo, cioè questi gas si muovono per differenze di concentrazione.

Modello morfologico di Weibel



♦ prime 17 generazioni: zona di conduzione

♣ ultime 7 generazioni: zona respiratoria (partecipano agli scambi gassosi)

Questo è uno schema dell'albero tracheo-bronchiale e a lato c'è un modello che ci fa comodo per capire un attimo come funziona il sistema ed è il modello di Weibel, il modello più semplice che si possa fare dell'albero tracheo-bronchiale. Weibel si impone che partendo dalla trachea che lui chiama generazione 0, alla fine della trachea ci sia una biforcazione e da questa generazione si formino due nuovi rami

che verranno a costituire la generazione 1; alla fine di questi due nuovi rami, ciascuno di questi due darà luogo ad altri due nuovi rami che sarà la generazione 2 e quindi abbiamo nel passaggio da una generazione all'altra il raddoppio dei rami. Quindi nella generazione n i rami sono 2^n .

Qui dice che nel sistema respiratorio ci sono 24 generazioni (partendo dalla generazione 0 e arrivando alla generazione 23) e le prime 17 generazioni sono quelle che vengono chiamate zona di conduzione e le ultime 7 generazioni sono invece quella che viene chiamata zona respiratoria. Allora, nelle prime 17 generazioni fondamentalmente non avvengono gli scambi, è semplicemente una serie di condotti che servono a portare l'aria dalla bocca alla parte profonda del polmone dove avverranno gli scambi nelle ultime 7 generazioni.

Il modello di Weibel è una rappresentazione, nella realtà è un modello schematico semplificato tant'è vero che non torna nemmeno poi con la parte realmente strutturale perché il modello di Weibel è simmetrico (quello che succede a sinistra è uguale a quello che succede a destra) e se voi guardate l'anatomia di ogni polmone voi vedete che il polmone sinistro e il polmone destro come l'albero tracheo-bronchiale non sono identici l'uno rispetto all'altro.

VENTILAZIONE TOTALE

Si supponga $V_T = 500 \text{ ml}$ $RF = 12 \text{ atti/minuto}$



$\dot{V} = \text{ventilazione al minuto (ventilazione totale)} = 0,5 \times 12 = 6 \text{ l/m}$

SPAZIO MORTO ANATOMICO

Non tutta l'aria inspirata raggiunge gli alveoli. Per ogni 500 ml di aria inspirata circa 150 ml rimangono nelle vie aeree di conduzione e non partecipano agli scambi gassosi (spazio morto anatomico).

Il normale rapporto fra spazio morto anatomico e volume corrente varia tra 0,25 e 0,35.

SPAZIO MORTO ALVEOLARE

Quantità di aria che, pur raggiungendo gli alveoli, non partecipa agli scambi gassosi (← alveoli non perfusi o poco perfusi).

SPAZIO MORTO FISIOLÓGICO

spazio morto fisiologico = spazio morto anatomico + spazio morto alveolare

Nei soggetti normali: spazio morto fisiologico \cong spazio morto anatomico

VENTILAZIONE ALVEOLARE

Volume di aria che raggiunge gli alveoli in un minuto (\dot{V}_A)

$$\dot{V}_A = (V_T - V_D) \times FR \quad \text{dove } V_D \text{ indica lo spazio morto}$$

Osservazione

- | | | | | | | |
|---|---|--|----|--|---|--|
| <p>a) $V_T = 150 \text{ ml}$
$FR = 40 \text{ atti/min}$
$V_D = 150 \text{ ml}$</p> | { | <p>$\dot{V} = 6 \text{ l/m}$
$\dot{V}_A = 0 \text{ l/min}$</p> | b) | <p>$V_T = 500 \text{ ml}$
$FR = 12 \text{ atti/min}$
$V_D = 150 \text{ ml}$</p> | { | <p>$\dot{V} = 6 \text{ l/m}$
$\dot{V}_A = 4,2 \text{ l/min}$</p> |
| <p>c) $V_T = 1000 \text{ ml}$
$FR = 6 \text{ atti/min}$
$V_D = 150 \text{ ml}$</p> | { | <p>$\dot{V} = 6 \text{ l/m}$
$\dot{V}_A = 5,1 \text{ l/min}$</p> | 16 | | | |

Allora, supponiamo che un paziente respiri e supponiamo che il suo volume corrente sia 500 mL. In realtà la prima cosa che ci viene in mente guardando il modello di Weibel è che questi 500 mL del volume corrente che sta respirando il paziente non partecipano tutti agli scambi respiratori e questo perché? Perché quello è il volume di aria che si mette in movimento; ho una parte di questo volume di aria che non arriva agli alveoli perché rimane all'interno della zona di conduzione. Quindi io metto all'interno dell'albero tracheo-bronchiale 500 mL, una parte arriverà alla zona respiratoria e quell'altra parte rimane nella zona di conduzione. Quant'è questa parte che rimane nella zona di conduzione?

Tipicamente ho 150 mL (un 30% di aria che inspiro non partecipa agli scambi respiratori se inspiro 500 mL). Questa aria che non partecipa agli scambi si chiama spazio morto dal punto di vista fisiologico. Questo spazio morto è quello che definiamo come spazio morto anatomico perché è lo spazio morto che la nostra natura mette in gioco, quindi non è lo spazio morto che è dovuto ad una patologia (è morto da un punto di vista degli scambi gassosi).

Allo spazio morto anatomico si aggiunge lo spazio morto alveolare, che è la quantità di aria che pur raggiungendo gli alveoli non partecipa agli scambi gassosi perché va a finire in alveoli che sono o non perfusi o sono poco perfusi.

In condizioni fisiologiche lo spazio morto anatomico è estremamente piccolo e si riduce a quella che nel polmone si chiama la zona 1 che è la zona apicale del polmone; quindi in individui normali abbiamo che lo spazio morto anatomico è trascurabile; in generale possiamo parlare di spazio morto fisiologico sommando lo spazio morto anatomico allo spazio morto funzionale. Quindi in un individuo sano lo spazio morto

fisiologico è circa uguale allo spazio morto alveolare. Ovviamente tanto più lo spazio morto fisiologico si differenzia dallo spazio morto anatomico, tanto più ci sarà una qualche patologia nel paziente che impedisce ad una certa quantità di volume corrente (aria inspirata ed espirata) di partecipare agli scambi.

Allora, in clinica cosa è che in realtà vi interessa? Vi interessa quella che è la ventilazione alveolare, cioè vi interessa qual è la quantità di aria che in un minuto effettivamente partecipa agli scambi. Com'è che possiamo definire la ventilazione alveolare? è definita tramite questa relazione: $(\text{volume corrente} - \text{spazio morto}) \times \text{frequenza respiratoria}$, cioè la quantità di aria che in un minuto viene utilizzata a livello degli scambi gassosi. Per cui, prendendo la situazione b) standard, ho un paziente con un volume corrente di 500 mL che fa 12 atti respiratori al minuto, la sua ventilazione totale è $500 \times 12 = 6 \text{ L/min}$, la ventilazione alveolare è $500 - 150 = 350 \text{ mL}$ ---> $350 \times 12 = 4.2 \text{ L/min}$ (volume che partecipa agli scambi).

Ora una cosa importante, quando uno si mette a correre che succede? Aumenta la sua frequenza respiratoria; supponiamo che un individuo respiri più frequente, ma come cambia la sua ventilazione al minuto? ovvero se la sua ventilazione al minuto è ancora 6 L e la frequenza respiratoria si è alzata da 12 atti a 40 atti/min; questo vuol dire che il suo volume corrente si è abbassato a 150 mL e se ho questo volume corrente la ventilazione alveolare è 0 $[VA = (VT - VD) \times FR]$. Il che vuol dire che il solo aumento della FR respiratoria non porta ad un aumento della ventilazione alveolare. E allora succede che quando un paziente è sotto sforzo aumenta la FR respiratoria ma aumenta anche il volume che viene inspirato ed espirato (ventilazione totale); aumentano due grandezze, sia la FR con cui respira sia la quantità di aria che respira in un minuto, quindi il sistema di controllo farà in modo tale da portare un aumento sia della FR ventilatoria sia del volume corrente. Con questo abbiamo concluso la parte di fisiologia.

Quando io voglio andare a misurare delle grandezze che mi servono per fare diagnosi io ho alcune grandezze variabili (o parametri) che sono direttamente misurabili, che vuol dire? che c'è uno strumento, un dispositivo che mi permette di misurare direttamente quella grandezza. Ci sono delle grandezze però che non sono direttamente misurabili, per esempio se voglio misurare la pressione alveolare del paziente si va ad utilizzare dei modelli che mi permettono di stimare il valore della pressione alveolare e quindi di avere una misura indiretta. Un modello che cos'è? Un modello è una rappresentazione schematica della realtà; se io nel modello vado ad inserire le grandezze che sono stato in grado di misurare direttamente, grazie a queste misure dirette e al modello sono in grado di capire quali sono le grandezze che non sono stato in grado di misurare direttamente.

Quindi in pratica le mie grandezze misurabili le posso dividere in due grosse categorie:

- Grandezze misurabili direttamente (per cui esistono dei dispositivi che mi permettono di accedere direttamente a questa grandezza e a valutarne il suo valore)
- Grandezze misurabili indirettamente (richiedono il modello per poter non essere misurate, ma per poter essere stimate)

Modelli del sistema respiratorio

Il funzionamento del sistema respiratorio è di solito formalizzato impiegando **modelli astratti**.

I modelli del sistema respiratorio non specificano soltanto le **variabili da misurare**, ma permettono di definire anche **parametri caratteristici di funzionalità respiratoria**.

Le misure devono essere minimamente invasive, non causare fastidi gravi ed essere adeguate ad un ambiente clinico.

È conveniente dividere la funzione respiratoria in due parti:

(1) **trasporto dei gas nei polmoni** (includendovi anche le vie aeree extrapolmonari ed i capillari polmonari);

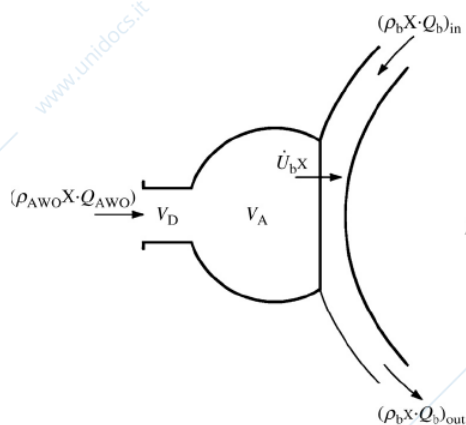
(2) **meccanica dei polmoni e della gabbia toracica**.

I modelli che descrivono il trasporto dei gas si occupano principalmente dei **cambiamenti di concentrazione di specie gassose e di flussi volumetrici di gas**, mentre quelli che descrivono la meccanica mirano a mettere in relazione **pressione, volume polmonare e variazioni del volume polmonare per unità di tempo**.

Queste due parti della funzione respiratoria sono altamente correlate: i modelli e le misure sono fra loro complementari.

17

succede dal punto di vista della meccanica del respiro, come si muove l'aria all'interno del polmone stesso.



Allora, prima di tutto si fa un modello concettuale, uno pensa come può essere schematizzato concettualmente il sistema che vuole modellare e il modo più semplice per schematizzare il sistema che voglio andare a modellare dal punto di vista degli scambi gassosi è quello di andare a considerare un sistema di questo tipo: una parte circolatoria che è caratterizzata da un condotto, una parte ventilatoria che è caratterizzata da un

sacco alveolare e un condotto che porta l'aria dall'esterno verso il sacco alveolare. Quindi il modello più semplice da un punto di vista concettuale che possa andare a prendere in esame è l'unità di base del trasporto di gas dai polmoni che è composto da un compartimento alveolare a volume variabile, un compartimento ematico che scambia gas con il compartimento alveolare e ultimo abbiamo uno spazio morto a

volume costante che è l'insieme delle vie aeree di conduzione che portano l'aria dalla bocca verso il compartimento alveolare. Chiaramente questo modello è valido a livello dell'alveolo, quindi questa è l'unità di base; se volessi rappresentare in maniera direi quasi perfetta il sistema degli scambi gassosi dovrei mettere in parallelo un certo numero di milioni di questi elementi. Noi adesso soffermiamoci su questo, considerando un soggetto sano in respiro tranquillo.

Una volta che ho fatto un modello concettuale devo andare a passare dal modello concettuale, che è lo schema mentale (il mio disegno), ad un modello matematico che è una relazione che mi dice come funziona il sistema per poter fare quelle che sono le misure indirette, per fare le quali devo avere un insieme di relazioni all'interno di cui ci sono anche delle grandezze che potrei andare a misurare in altri modelli.

Un bilancio di massa dinamico può essere scritto per ogni specie chimica X o insieme di specie nella miscela di gas respirata. Se in un sistema la produzione di X mediante reazione chimica è trascurabile, il bilancio di massa della specie può essere scritto come

$$\begin{array}{l} \text{Accumulo di massa} \\ \text{di X per unità di} \\ \text{tempo nel sistema} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Flusso di massa} \\ \text{totale di X per} \\ \text{convezione} \end{array} - \begin{array}{l} \text{Diffusione netta} \\ \text{di X fuori} \\ \text{dal sistema} \end{array}$$

Allora, qual è la relazione che caratterizza questo tipo di modello? è estremamente semplice: io ho un ingresso di aria che entra nel compartimento alveolare e scambia con il compartimento ematico; quest'aria è composta da più componenti (O₂, CO₂, Azoto...) e quello che mi posso domandare è cosa succede ad ogni singola componente. è chiaro che se sempre a livello concettuale l'aria che entra è ricca di O₂ e il sangue che arriva è povero di O₂, per diffusione l'O₂ passerà dall'aria al sangue, viceversa se l'aria che entra è priva di CO₂ e però dal compartimento ematico arriva sangue ricco di CO₂ è chiaro che per diffusione la CO₂ passerà dal sangue al compartimento alveolare. Come si fa a scrivere da un punto di vista matematico questa situazione? La variazione che abbiamo della massa di una sostanza X per unità di tempo nel sistema (accumulo che può essere sia positivo che negativo) è uguale al flusso di massa totale per convezione (sostanza che arriva all'interno dell'alveolo passando per la bocca) - la diffusione netta della sostanza X fuori dal sistema.