

**ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA  
CAMPUS DI CESENA  
SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA BIOMEDICA**

**Modalità NAVA® come tecnica di monitoraggio e di  
ventilazione artificiale in terapia intensiva**

Elaborato in Ingegneria Clinica

Relatore

**Prof. Ing. Claudio Lamberti**

Presentata da

**Davide Ricci**

Sessione Autunnale

Anno Accademico 2012-2013



*A Giulia,  
a mia sorella Erika,  
ai miei genitori e  
a tutti coloro che  
mi sono stati vicino.*



# Indice

<b>Premessa</b>	<b>pag. 7</b>
<b>Capitolo 1 - Fisiologia dell'apparato respiratorio</b>	<b>pag. 9</b>
1. Le ossa ed i muscoli del torace	pag. 10
2. La pleura e i polmoni	pag. 12
3. Le vie aeree	pag. 14
4. Gli alveoli	pag. 15
5. La circolazione polmonare	pag. 16
6. La composizione dell'aria	pag. 17
7. La ventilazione	pag. 19
8. Il movimento della cassa toracica e del diaframma	pag. 21
9. L'inspirazione	pag. 22
10. L'espirazione	pag. 23
11. La pressione intrapleurica	pag. 24
12. L'azione dell'agente surfactante	pag. 25
13. Complianza, elastanza e resistenza polmonare	pag. 26
14. Tipo di ventilazione e ventilazione alveolare	pag. 28
15. Il rapporto ventilazione perfusione	pag. 28
16. Il controllo della ventilazione	pag. 29
<b>Capitolo 2 - Ventilatori meccanici artificiali</b>	<b>pag. 33</b>
1. Ventilatori a pressione negativa	pag. 35
2. Ventilatori a pressione positiva	pag. 36
3. Modalità di ventilazione	pag. 40
3.1 Ventilazione a pressione controllata	pag. 41
3.2 Ventilazione a flusso/volume controllata	pag. 43
4. Respirazione guidata dal paziente o dal ventilatore	pag. 44
5. Sistemi di allarme dei ventilatori meccanici	pag. 46
6. Ventilazione non invasiva (NIV)	pag. 47

<b>7. Sostegno polmonare artificiale</b>	<b>pag. 47</b>
<b>7.1 Ossigenazione extracorporea a membrane</b>	<b>pag. 48</b>
<b>7.2 Eliminazione extracorporea di CO<sub>2</sub></b>	<b>pag. 49</b>
<b>7.3 Ossigenazione intravascolare</b>	<b>pag. 49</b>
<b>8. Scopi clinici della ventilazione</b>	<b>pag. 50</b>
<b>9. Differenze fra ventilazione a breve e lungo termine</b>	<b>pag. 51</b>
<b>10. Svezamento dalla ventilazione</b>	<b>pag. 52</b>
<b>11. Pulsossimetro</b>	<b>pag. 52</b>
<b>12. Capnometria</b>	<b>pag. 53</b>
<b>Capitolo 3 - Ventilatori artificiali con modalità NAVA®</b>	<b>pag. 55</b>
<b>1. Come funziona NAVA</b>	<b>pag. 56</b>
<b>2. Com'è nata NAVA</b>	<b>pag. 60</b>
<b>3. Il Caterere Edi</b>	<b>pag. 61</b>
<b>4. La registrazione del segnale Edi</b>	<b>pag. 63</b>
<b>5. La terapia respiratoria in un modo radicalmente diverso e nuovo</b>	<b>pag. 66</b>
<b>6. NAVA NIV</b>	<b>pag. 68</b>
<b>7. Campi d'applicazione</b>	<b>pag. 69</b>
<b>8. Un caso clinico</b>	<b>pag. 69</b>
<b>9. I benefici di NAVA</b>	<b>pag. 70</b>
<b>Capitolo 4 - NAVA a confronto con le modalità di ventilazione convenzionali</b>	<b>pag. 73</b>
<b>1. I limiti della ventilazione convenzionale</b>	<b>pag. 73</b>
<b>2. Differenze fra NAVA e la modalità con supporto di pressione (PSV)</b>	<b>pag. 76</b>
<b>Conclusioni</b>	<b>pag. 77</b>
<b>Bibliografia e Sitografia</b>	<b>pag. 79</b>

## **Premessa**

L'idea di redigere questa tesi circa la *Modalità NAVA come tecnica monitoraggio e di ventilazione artificiale* nasce durante una visita guidata presso il reparto di terapia intensiva dell'ospedale Maurizio Bufalini di Cesena organizzata dal Prof. Ing. Claudio Lamberti, docente del corso di Ingegneria Clinica.

Durante tale visita un medico intensivista del reparto si è soffermato in particolare sul tema della respirazione artificiale e ha chiarito molti aspetti relativi ai ventilatori meccanici.

Oltre a spiegarci i principi di funzionamento e le modalità di ventilazione dei ventilatori meccanici, abbiamo avuto la possibilità di capirne il funzionamento e conoscere i parametri principali di un monitor interfacciato a un ventilatore meccanico, in un posto letto in terapia intensiva, mentre vi era collegato un paziente non particolarmente critico.

Successivamente, si è discusso riguardo agli aspetti negativi che la ventilazione meccanica convenzionale può provocare, tra i quali, il più frequente è l'infiammazione degli alveoli, causata dalla pressione positiva del ventilatore. A questo riguardo il medico ha presentato la recente modalità di ventilazione meccanica controllata a livello neurale, la NAVA.

Ci stato spiegato come tale modalità, in modo intelligente, potesse ovviare molti dei più comuni problemi che affliggono la ventilazione meccanica convenzionale, tra i quali l'asincronia paziente-ventilatore e i danni polmonari causati da sovra-assistenza e pressioni/volumi eccessivi.

Siamo venuti a conoscenza che con NAVA era possibile rilevare, mediante un sensore, le fasi della meccanica respiratoria sin dai primi gradini del suo sviluppo: NAVA, infatti acquisisce il segnale neurale che dal cervello giunge al diaframma attraverso il nervo frenico e attraverso tale segnale, modula l'assistenza che deve fornire al paziente, in relazione sia alla *durata* che all'*ampiezza* di quest'ultima.

E' a questo punto, quindi, che mi sono interessato a tale modalità e dopo successive ricerche in merito, ho deciso di redigere questo elaborato trattando innanzitutto la fisiologia dell'apparato respiratorio nel Capitolo 1, introducendo in seguito la ventilazione meccanica convenzionale, ancor'oggi molto utilizzata, nel Capitolo 2, giungendo poi a illustrare la nuova modalità NAVA nel Capitolo 3. Segue con un confronto che illustra le principali differenze tra la NAVA e le precedenti modalità di ventilazione nel Capitolo 4.

L'elaborato si conclude sottolineando la speranza che NAVA, un'innovazione senza precedenti, non sia limitata ad un investimento potenzialmente utile nel presente della terapia intensiva, ma che la ricerca ad essa correlata possa, in un imminente futuro, aprire la strada a nuove tecnologie ancora più efficienti nella salvaguardia dei pazienti in terapia intensiva.

# Capitolo 1 - Fisiologia dell'apparato respiratorio

Il metabolismo aerobico delle migliaia di miliardi di cellule di cui è composto il corpo umano dipende dal costante rifornimento dell'ossigeno e nutrienti dall'ambiente circostante ed è accompagnato dalla rimozione dell'anidride carbonica. Questo scambio di gas tra le cellule dell'organismo e l'ambiente costituisce la **respirazione esterna**.

Negli animali di piccole dimensioni queste necessità di scambio vengono soddisfatte per diffusione semplice, attraverso la superficie corporea. Tuttavia la velocità di diffusione semplice è limitata dalla distanza, perciò la maggior parte degli animali pluricellulari, tra i quali l'uomo, si servono di un **apparato respiratorio** associato a un sistema cardiocircolatorio.

L'apparato respiratorio è fondamentale poiché assolve quattro funzioni principali:

- 1. Scambio di sostanze gassose tra atmosfera e sangue.**
- 2. Regolazione omeostatica del pH corporeo tramite l'escrezione o la ritenzione selettiva della CO<sub>2</sub>.**
- 3. Protezione da patogeni inalati e da sostanze irritanti.**
- 4. Vocalizzazione: il movimento dell'aria sulle corde vocali genera vibrazioni utilizzate per parlare.**
- 5. Espulsione di acqua e di calore dall'organismo.**

La respirazione può essere suddivisa in quattro processi integrati:

- I. Lo scambio di aria tra atmosfera e polmoni, noto come **ventilazione**, che si distingue in *inspirazione* quando si ha l'entrata di aria nei polmoni ed *espirazione* quando l'aria esce dai polmoni.
- II. Lo scambio di ossigeno e anidride carbonica tra polmoni e sangue.

- III. Il trasporto di ossigeno e di anidride carbonica tra polmoni e sangue.
- IV. Lo scambio di gas tra sangue e cellule.

La respirazione esterna richiede perciò il funzionamento coordinato degli apparati respiratorio e cardiovascolare.

In particolare, l'apparato respiratorio può essere suddiviso in due parti:

- il **tratto respiratorio superiore**, costituito da bocca, cavità nasale, faringe, laringe e trachea;
- il **tratto respiratorio inferiore** o **porzione toracica**, è costituito dalla trachea, da due bronchi primari, dalle loro ramificazioni dicotomiche e dai polmoni.

Approfondendo, il sistema respiratorio è costituito da strutture coinvolte nella ventilazione e nello scambio dei gas:

1. Le **ossa** e i **muscoli** del torace e dell'addome che permettono la ventilazione.
2. Un **sistema di conduzione** (vie aeree) che va dall'ambiente esterno fino alla superficie di scambio dei polmoni.
3. Gli **alveoli**, una serie di sacchi interconnessi che formano collettivamente **la superficie di scambio**, attraverso cui l'ossigeno diffonde dall'aria inspirata al sangue e l'anidride carbonica diffonde dal sangue all'aria che sta per essere espirata.

### **1. Le ossa e i muscoli del torace**

Il torace, o cavità toracica, è delimitato dalle ossa della colonna vertebrale, dalle coste e dai muscoli ad esse associati. Le ossa e i muscoli sono collettivamente chiamati *gabbia toracica*. Le coste e la colonna vertebrale formano le pareti laterali e quella superiore della cassa toracica, mentre un muscolo scheletrico a forma di cupola, il

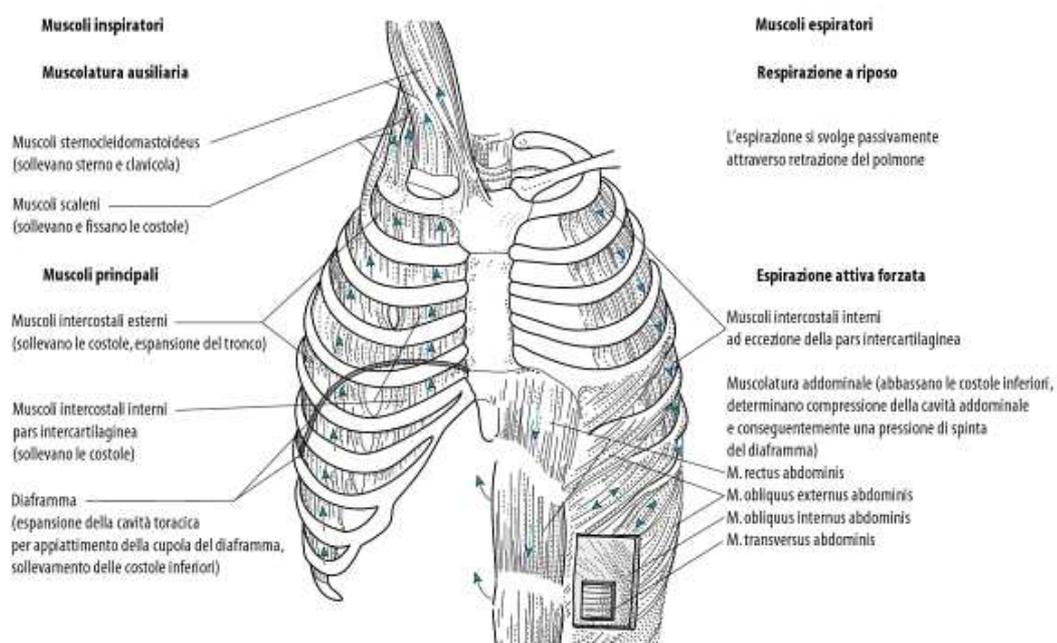
**diaframma**, ne forma il pavimento. Esso divide il torace dalla cavità addominale ed ha uno spessore di circa 3-5 mm. E' fissato a sterno, costole e colonna vertebrale lombare.

Due gruppi di muscoli intercostali, interni ed esterni, connettono le 12 paia di coste. Le ultime due coste sono *fluttuanti*, in quanto non sono unite allo sterno e permettono una maggiore flessibilità nei movimenti. Tuttavia esse presentano un grado di pericolosità maggiore in quanto, a seguito di un' trauma, potrebbero facilmente perforare i polmoni. Alcuni muscoli accessori, gli **sternocleidomastoidei** e gli **scaleni**, si trovano nell'estremità apicale e si portano dalla testa e dal collo fino allo sterno e alle prime due coste. Essi vengono utilizzati nell'atto respiratorio solo in caso di incombente necessità.

Dal punto di vista funzionale, la cassa toracica è un contenitore sigillato che contiene tre sacchi membranosi:

- il *sacco pleurico*, contenente il cuore;
- altri due *sacchi pleurici* contenenti i polmoni.

L'esofago, i vasi sanguinei toracici e i nervi passano tra i due sacchi pleurici.



## 2. La pleura e i polmoni

I **polmoni** sono organi a forma di cono irregolare costituiti da tessuto leggermente simile ad una spugna, il cui volume è principalmente occupato da spazi riempiti di aria. Essi occupano quasi completamente la cavità toracica, hanno la base appoggiata sulla cupola diaframmatica e sono collegati alla *trachea*, via di conduzione principale, dai bronchi.

In stato di media estensione essi hanno nell'adulto le seguenti dimensioni:

- diametro verticale 25-26 cm;
- diametro sagittale alla base 16 cm;
- diametro trasverso 10-11 cm per il polmone destro e 7-8 cm per il polmone sinistro (a causa dell'ingombro del cuore).

Sono contenuti nelle **logge polmonari** della cavità toracica che sono delimitate:

- *lateralmente* da coste e muscoli intercostali;
- *medialmente* dallo **spazio mediastinico**, ossia lo spazio che si interpone tra i due polmoni. In tale spazio vi alloggiavano molti linfonodi e vasi linfatici che hanno lo scopo di drenare i liquidi in eccesso ed evitare quindi pericolosi *edemi polmonari*;
- *inferiormente* dal diaframma;
- *superiormente* dai vasi succlavi, dal plesso brachiale, dal muscolo scaleno anteriore.

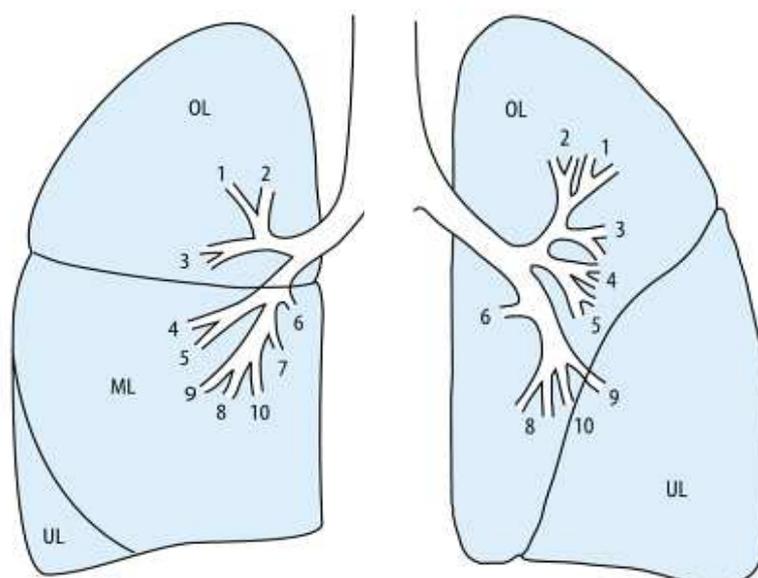
Ogni polmone è all'interno di un *sacco pleurico*, formato da due foglietti pleurici: uno **viscerale**, più sottile e trasparente, che riveste la superficie esterna del polmone e l'altro **parietale**, più robusto e ricco di fibre elastiche, che riveste l'interno della cavità toracica. Le membrane pleuriche, o **pleure**, sono costituite da diversi strati di

*tessuto connettivo elastico*, formato da un intreccio di fibre di collagene ed elastina, e numerosi capillari. I due foglietti sono tenuti insieme da un sottile strato di liquido pleurico il cui volume ammonta a pochi millilitri.

Il liquido pleurico che si trova intorno alle pleure serve a diversi scopi:

- crea una superficie umida e scivolosa tale per cui i due foglietti possono scorrere l'uno sull'altro durante il movimento dei polmoni nella cavità toracica;
- mantiene i polmoni a stretto contatto con le pareti toraciche sfruttando la *proprietà di coesione dell'acqua* fungendo quasi come da adesivo.

La zona dei polmoni, compresa nella fascia mediale, attraverso la quale entrano i bronchi e vasi sanguigni è chiamata **ilo polmonare** e l'insieme degli organi che lo attraversano, tra cui bronchi vasi sanguigni e linfatici, costituisce il **peduncolo polmonare**.



*Polmone destro*

*Polmone sinistro*

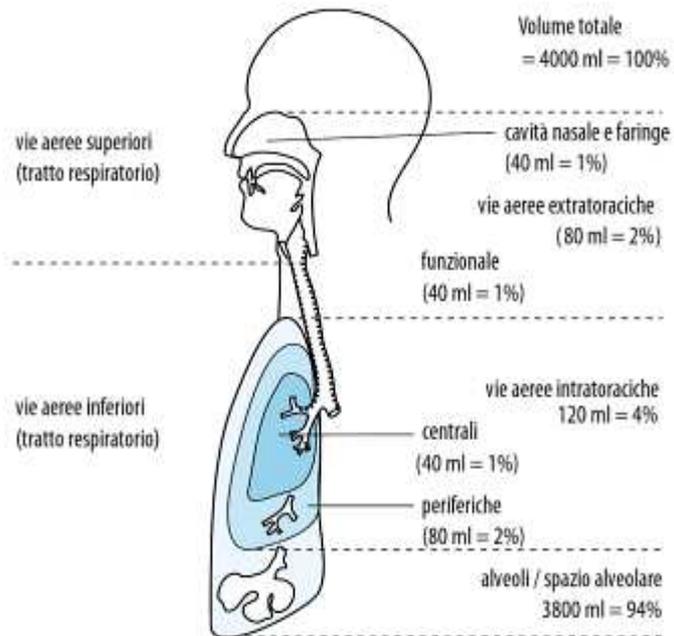
### 3. Le vie aeree

L'aria entra nel tratto respiratorio superiore dalla bocca e dal naso e passa nella **faringe**, via di passaggio comune per cibi, liquidi ed aria. Dalla faringe, l'aria fluisce attraverso la **laringe** per raggiungere la **trachea**. La laringe contiene le **corde vocali**, bande di tessuto connettivo che si tendono per generare suoni durante il passaggio dell'aria. La trachea è un tubo semi-flessibile costituito da 20 anelli cartilaginei a forma di C. Essa si estende nella cavità toracica, dove si ramifica in una coppia di **bronchi primari**, uno per ogni polmone, costituiti ugualmente da tessuto cartilagineo.

All'interno dei polmoni le vie aeree formano un *intricato sistema di arborizzazione*: i bronchi si ramificano ripetutamente in maniera dicotomica fino a 16-17 volte in bronchi progressivamente più piccoli fino a divenire **bronchioli**, ossia piccole vie di passaggio comprimibili con pareti di tessuto liscio. I bronchioli continuano a ramificarsi fino ai *bronchioli terminali* che terminano a livello dell'epitelio di scambio polmonare. Il diametro delle vie aeree diventa progressivamente sempre più piccolo man mano che si scende verso i bronchioli ma le singole vie aeree aumentano di numero. Di conseguenza l'area della superficie delle vie aeree aumenta enormemente ad ogni divisione. Se si potesse infatti stendere il tessuto di cui sono fatti i polmoni si potrebbe coprire interamente la superficie di un campo da tennis circa 75m<sup>2</sup>.

Le vie aeree superiori, fino ai bronchioli, possono variare il proprio calibro tramite l'intervento del sistema nervoso autonomo (SNA) che controlla la muscolatura liscia delle pareti dell'albero bronchiale. Ad esempio, possono contrarsi nel caso in cui venga inalato un agente irritante e ciò si verifica attraverso l'attivazione del sistema **parasimpatico**, che ha, appunto effetti *broncocostrittori*, mentre il sistema **ortosimpatico** produce effetti *broncodilatatori*.

extratoracico		Z
segmenti veicolanti l'aria	Trachea	0
	HBr	1
	Br	2
	Brl	3
	Brl	4
segmenti di passaggio e respiratori	TBrl	16
	RBrl	17   19
	AD	
	AS	
		23



#### 4. Gli alveoli

Gli **alveoli**, raggruppati all'estremità dei bronchioli costituiscono la maggior parte del tessuto polmonare.

La loro funzione primaria è lo *scambio di gas tra l'aria presente negli alveoli e il sangue*.

Ogni alveolo è costituito da un sottile strato di epitelio di scambio delle dimensioni di 0,5  $\mu\text{m}$ , in cui sono presenti due tipi di cellule:

- Le **cellule alveolari di tipo II (pneumociti II)**, piccole e spesse, che sintetizzano e secernono una sostanza chimica detta **surfactante**, un agente tensioattivo, che si mescola con il sottile liquido di rivestimento alveolare per facilitare l'espansione polmonare durante la ventilazione. Esse rappresentano il 7% della superficie alveolare. Inoltre, tali cellule contribuiscono a minimizzare il volume di liquido presente negli alveoli

trasportando soluti, seguiti dall'acqua, fuori dagli spazi aerei alveolari.

- Le **cellule alveolari di tipo I (pneumociti I)**, grandi e molto sottili, permettono ai gas di diffondere rapidamente attraverso di esse.

In gran parte della superficie di scambio uno strato di lamina basale congiunge l'epitelio alveolare all'endotelio capillare, così che è presente solo una piccola quantità di liquido interstiziale.

Tali cellule rappresentano il 90% della superficie alveolare.

Le pareti alveolari non hanno tessuto muscolare, perché questo potrebbe ostacolare lo scambio gassoso: per questo il *tessuto polmonare non può contrarsi*.

Il tessuto connettivo presente tra le cellule epiteliali alveolari, tuttavia, presenta molte fibre elastiche che contribuiscono al ritorno elastico dei polmoni quando questi vengono stirati.

Un'estesa rete di capillari copre l'80-90% della superficie alveolare formando una lamina quasi continua di sangue in stretto contatto con l'aria che riempie gli alveoli. La vicinanza tra il capillare e l'aria alveolare è fondamentale per permettere un rapido scambio gassoso.

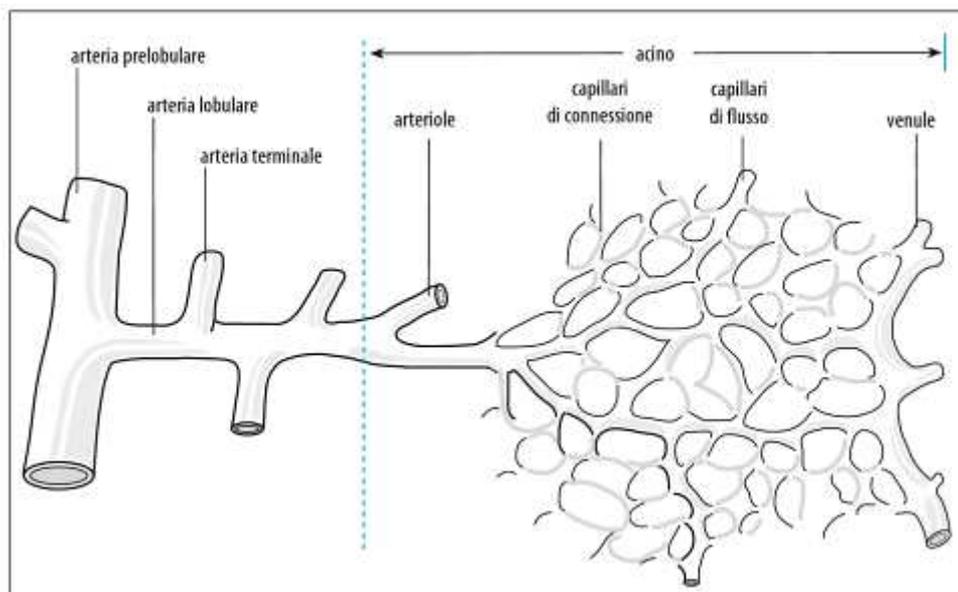
## **5. La circolazione polmonare**

La circolazione polmonare inizia dall'arteria polmonare che riceve sangue poco ossigenato dal ventricolo destro, poi si divide nelle due arterie polmonari, una per ogni polmone. Il sangue ossigenato a livello polmonare torna all'altro sinistro tramite le vene polmonari e viene spinto in tutto il corpo attraverso il ventricolo sinistro e l'aorta. La circolazione polmonare contiene in ogni momento 0,5 L di sangue, cioè il 10% del volume totale. Circa 75mL di questa quota si trovano a livello capillare, dove avviene lo scambio gassoso, mentre la parte restante si trova nelle vene e nelle arterie polmonari. La portata del flusso di sangue nei polmoni è molto maggiore di quella degli altri

tessuti perché i polmoni ricevono dal ventricolo destro l'intera gittata cardiaca cioè 5 L/min.

Questo significa che la quantità di sangue che scorre nei polmoni in un minuto corrisponde a quella che circola in tutto il resto dell'organismo nello stesso tempo. La pressione del sangue della circolazione polmonare è tuttavia molto bassa attorno ai 25/8 mmHg, inferiore a quella del sangue nel circolo arterioso sistemico di 120/80 mmHg.

Data la minore lunghezza dei vasi, la facilità di distensione ed elevata area della superficie di sezione delle arteriole polmonari, la resistenza del circolo polmonare è bassa, per cui il *ventricolo destro compie un lavoro minore* rispetto al sinistro per generare il flusso sanguineo.



## 6. La composizione dell'aria

La **legge di Dalton** stabilisce che la pressione totale esercitata da una miscela di gas corrisponde alla somma delle pressioni parziali esercitate dai singoli gas componenti.

$$\text{Pressione parziale di un gas atmosferico} = \text{pressione totale atmosferica} \times \% \text{ del gas nell'atmosfera}$$

Nell'aria secca alla pressione atmosferica di 760 mmHg a livello del mare, il 78% della pressione totale è dovuto a N<sub>2</sub> (azoto), il 21% a O<sub>2</sub> (ossigeno), lo 0,033% a CO<sub>2</sub> (anidride carbonica) e si ha conseguentemente una pressione parziale di 593 mmHg per N<sub>2</sub>, 160 mmHg per O<sub>2</sub> e 0,25 mmHg per la CO<sub>2</sub>. Le pressioni parziali dei gas nell'aria variano leggermente in relazione alla quantità di vapore acqueo presente, perché la presenza di vapor acqueo diluisce il contributo degli altri gas alla pressione totale. In aria a 37°C con il 100% di umidità si ha una pressione parziale di 556 mmHg per N<sub>2</sub>, 150 mmHg per O<sub>2</sub> e 0,235 mmHg per la CO<sub>2</sub>.

*Il flusso dell'aria si verifica ogni volta che è presente un gradiente di pressione da aree ad alta pressione verso aree a bassa pressione.*

Il movimento della cassa toracica durante la ventilazione genera ciclicamente condizioni di alta e bassa pressione all'interno dei polmoni. Il movimento secondo gradiente avviene anche per i singoli gas: l'ossigeno per esempio fluisce da zone con pressione parziale elevata a zone a pressione parziale inferiore.

$$P_1V_1 = P_2V_2 = \text{costante} \quad \text{Legge di Boyle}$$

La **legge di Boyle** del 1600 indica che se il volume si riduce della metà la pressione raddoppia e viceversa.

Nell'apparato respiratorio, i cambiamenti di volume della cavità toracica durante la ventilazione generano gradienti di pressione che determinano il flusso d'aria. Quando il volume del torace aumenta, la pressione intratoracica diminuisce e l'aria entra nell'apparato respiratorio. Quando la cavità toracica diminuisce di volume la pressione aumenta e l'aria esce dai polmoni. Tale movimento viene detto *flusso di massa*.

## 7. La ventilazione

La ventilazione è lo scambio di aria per flusso di massa tra atmosfera e gli alveoli. La quantità d'aria spostata durante la ventilazione può essere suddivisa in quattro volumi polmonari:

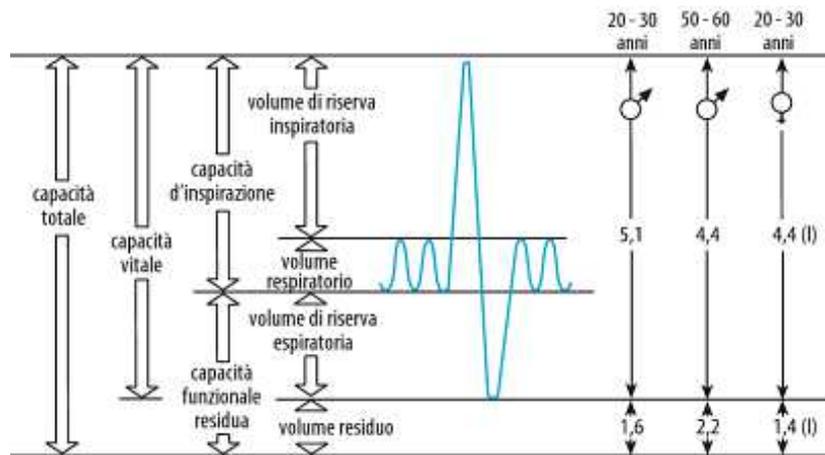
- **Volume corrente**( $V_c$ ): è il volume d'aria che si sposta normalmente durante una singola inspirazione o espirazione ed ammonta circa a 500 mL o  $\text{cm}^3$  d'aria.
- **Volume di riserva inspiratoria**(VRI): è il volume aggiuntivo inspirato oltre al volume corrente ed ammonta circa a 3000 mL, sei volte maggiore al volume corrente nominale.
- **Volume di riserva espiratoria**(VRE): è il volume d'aria eliminato forzatamente dopo la fine di un'espirazione tranquilla ed ammonta a circa a 1100 mL.
- **Volume residuo** ( $V_R$ ): è il volume d'aria che rimane nelle vie aeree dopo un'espirazione massimale ed ammonta circa a 1200 mL. La maggior parte del volume residuo è dovuta al fatto che il polmone viene tenuto stirato contro la parete toracica a opera del liquido pleurico. Se tale liquido venisse a meno i polmoni collasserebbero su se stessi e si giungerebbe velocemente all'asfissia.

Tali volumi polmonari variano in funzione dell'età, del sesso e dell'altezza.

La somma di due o più volumi polmonari è detta *capacità*.

- La **capacità vitale** (CV) è la somma del volume di riserva inspiratoria, del volume di riserva espiratoria e del volume corrente e rappresenta il massimo volume d'aria che può essere volontariamente spostata dentro e fuori l'apparato respiratorio durante un atto ventilatorio. Essa diminuisce fortemente con l'età;
- La **capacità polmonare totale** (CPT) è la somma di capacità vitale e volume residuo;

- La **capacità inspiratoria** (CI) è la somma di volume corrente e volume di riserva inspiratoria;
- La **capacità funzionale residua** (CFR) è la somma di volume di riserva espiratoria e volume residuo.



*Volumi e capacità polmonari*

Parametri	Uomini	Donne
Capacità polmonare totale, TLC	7,0	6,2
Capacità vitale, VC	5,6	5,0
Volume residuo, RV	1,4	1,2
Capacità funzionale residua, FRC	3,2	2,8

*Volumi polmonari in soggetti sani*

Le vie aeree superiori ed i bronchi assolvono funzioni ulteriori rispetto al semplice passaggio dell'aria contribuendo al condizionamento di quest'ultima tramite:

- Il *riscaldamento* dell'aria alla temperatura corporea di 37°C in modo che gli alveoli non vengano danneggiati dall'aria fredda. Esso avviene per mezzo dei **canali sinuosi**, che sono un particolare tipo di capillare.
- L'*aggiunta di vapore acqueo* fino a che l'aria raggiunga il 100% di umidità in modo che l'epitelio di scambio, che è umido, non si disidrati.

- La *filtrazione* del materiale estraneo in modo che virus, batteri e particelle inorganiche non raggiungano gli alveoli.

La ventilazione attraverso la bocca non è così efficace nel riscaldare ed umidificare l'aria come la ventilazione attraverso il naso.

La filtrazione si verifica sia a livello della trachea, che a livello dei bronchi: tali vie aeree sono rivestite da un epitelio cigliato che secreta muco e soluzione salina diluita che intrappolano la maggior parte delle particelle inalate di diametro superiore a 2 micrometri. Il muco contiene immunoglobuline che possono inattivare gli agenti patogeni; le ciglia si contraggono spostando il muco verso la faringe finché possa essere deglutito e l'ambiente acido e gli enzimi dello stomaco possano distruggere i microrganismi rimanenti. La secrezione della soluzione salina è essenziale per la risalita del muco, infatti in una condizione detta *fibrosi cistica*, l'inadeguata escrezione di soluzione salina fa intrappolare le ciglia nel muco denso e viscoso e ne ostacola il movimento. Per questo motivo il muco non può essere eliminato così i batteri colonizzano le vie aeree e provocano gravi infezioni polmonari.

## 8. Il movimento della cassa toracica e del diaframma

Nell'apparato respiratorio, in analogia al cuore per l'apparato circolatorio, sono i muscoli della cassa toracica e il diaframma a fungere da pompa. Quando essi si contraggono determinano il movimento delle coste e del diaframma e di conseguenza dei polmoni che aderiscono all'interno della gabbia toracica grazie al liquido pleurico.

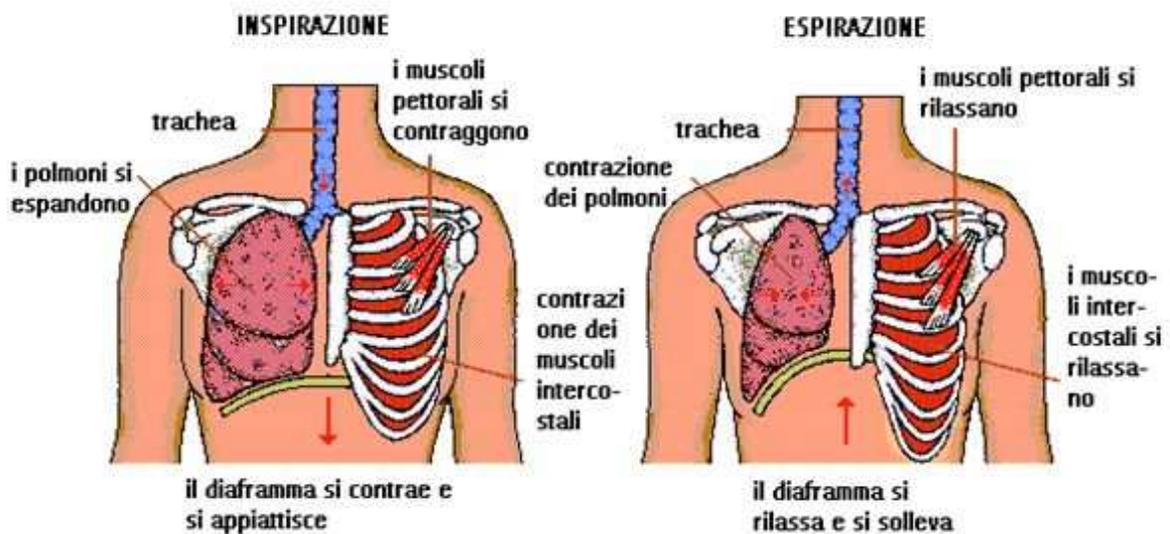
$$\text{Flusso aereo } (F) \propto \frac{\text{differenza di pressione}}{\text{resistenza polmonare}} = \frac{\Delta P}{R}$$

La pressione atmosferica è costante quindi la pressione all'interno dei polmoni deve essere superiore o inferiore rispetto a quella atmosferica per permettere il flusso d'aria tra ambiente esterno e alveoli.

## 9. L'inspirazione

L'inspirazione è la fase della dinamica inspiratoria in cui l'aria fluisce all'interno dei polmoni. Per far sì che si attivi questa dinamica, è necessario che la pressione nei polmoni divenga inferiore rispetto a quella atmosferica. Tale risultato si ottiene attraverso la contrazione del diaframma che perdendo la sua forma a cupola si abbassa verso l'addome di circa 1,5 cm: questo movimento aumenta il volume della cavità toracica contribuendo al 60-75% della variazione del volume polmonare. Il restante 25-40% della variazione del volume polmonare è dovuto al movimento della cassa toracica ad opera dei muscoli intercostali esterni, degli scaleni e sternocleidomastoidei che contraendosi esercitano una trazione sulle coste verso l'alto e verso l'esterno, fungendo da leva di terzo tipo.

La combinazione di questi due movimenti allarga la cassa toracica in tutte le direzioni e permette all'aria di fluire all'interno dei polmoni.



Normalmente durante una **eupnea**, ovvero una respirazione tranquilla, si ha un atto respiratorio ogni 4 secondi ossia *12-20 atti respiratori al minuto* per un adulto e 23-40 atti/min per i neonati. A prescindere dall'età, ogni atto respiratorio è sempre suddivisibile in quattro fasi:

**Tempo 0s:** si ha una *pausa respiratoria* in quanto la pressione alveolare è uguale a quella atmosferica (0 mmHg) e quindi in assenza

di differenza di pressione non si ha flusso d'aria né verso l'interno né verso l'esterno.

**Tempo 0-2s:** inizia l'*inspirazione* quando i muscoli inspiratori si contraggono e il volume toracico aumenta. Parallelamente la pressione intrapolmonare si riduce di circa 1 mmHg al di sotto della pressione atmosferica e l'aria inizia a fluire verso gli alveoli.

I cambiamenti di volume polmonare sono più rapidi del flusso d'aria e per questo la pressione alveolare raggiunge il valore minimo a circa metà dell'atto respiratorio. L'aria entra negli alveoli e la pressione inizia gradualmente ad aumentare fino a quando la cassa toracica smette di espandersi, appena prima del termine dell'inspirazione. Si raggiunge poi la condizione in cui la pressione alveolare è nuovamente uguale a quella atmosferica ed il volume d'aria contenuto nei polmoni è al massimo valore raggiunto nel ciclo ventilatorio.

## 10. L'espirazione

Per espirazione si intende il processo a partire dal momento in cui i motoneuroni somatici cessano di stimolare i muscoli respiratori, i quali conseguentemente si rilassano. Successivamente il ritorno elastico dei polmoni riporta il diaframma e le coste alla posizione di partenza. L'espirazione a riposo non è causata da una contrazione muscolare attiva ed per questo che viene definita **espiazione passiva** che si differenzia dall'**espiazione attiva** che si verifica durante l'esercizio fisico nel quale si possono compiere anche 30-40 atti respiratori al minuto (anziché 12-20) ad opera dei *muscoli espiratori* ossia muscoli intercostali interni ed addominali (retto dell'addome, obliquo interno ed esterno, trasverso dell'addome).

**Tempo 2-4s:** i volumi di polmone e torace diminuiscono e la pressione dell'aria nei polmoni aumenta fino ad un valore massimo di

1 mmHg sopra la pressione atmosferica: il flusso si inverte e l'aria inizia ad uscire dai polmoni.

**Tempo 4s:** l'espiazione ha termine quando la pressione alveolare è nuovamente uguale a quella atmosferica ed il volume polmonare raggiunge il suo valore minimo nel ciclo ventilatorio.

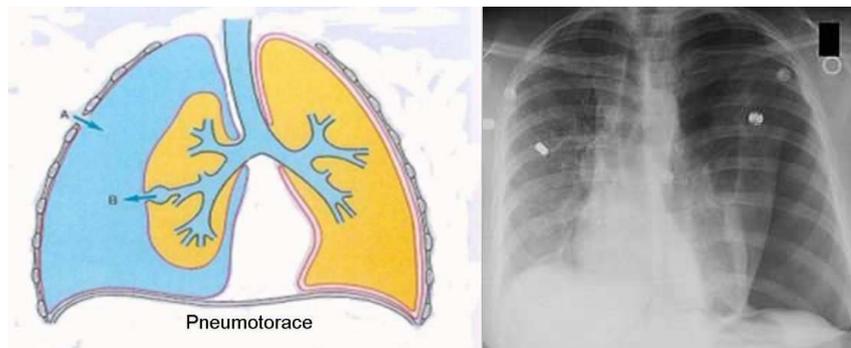
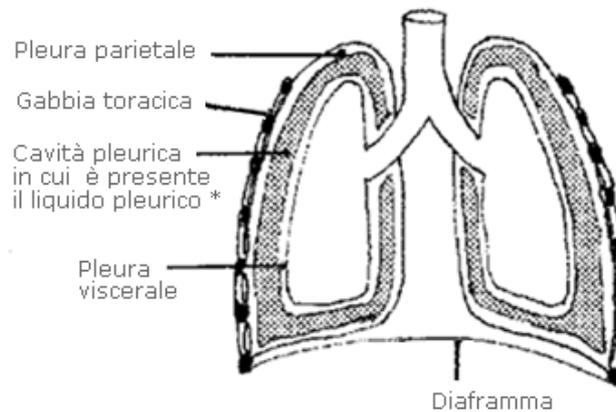
A questo punto un ciclo ventilatorio ha termine ed inizia il successivo.

## 11. La pressione intrapleurica

La ventilazione richiede che i polmoni si muovano assieme alla gabbia toracica nei suoi movimenti di contrazione e rilasciamento. *Non esistono legami fissi* tra polmoni e gabbia toracica perché questi renderebbero il sistema troppo rigido. La connessione avviene grazie alla proprietà di coesione del liquido tra le due membrane pleuriche. La pressione di tale liquido è normalmente negativa o subatmosferica (inferiore a quella atmosferica). Questo perché durante lo sviluppo la cassa toracica cresce più rapidamente dei polmoni e questi ultimi sono costretti dalle membrane pleuriche a stirarsi per adattarsi meglio al volume (maggiore della cassa toracica). Allo stesso tempo i polmoni tendono ad avere un ritorno elastico a causa del materiale fibroso di cui sono costituiti: la combinazione della spinta verso l'esterno della cassa toracica e del ritorno elastico dei polmoni provoca l'instaurarsi di una pressione intrapleurica negativa di circa -3/-4mmHg come se il liquido tra le due pleure, in assenza di aria, venisse attratto da un pistone.

Se si perfora la membrana intrapleurica ad esempio a causa di una rottura di una costola o di un qualsiasi altro evento che metta in comunicazione la cavità pleurica con l'ambiente esterno, l'aria entra nella cavità intrapleurica e, annullando la proprietà di coesione ottenuta grazie alla pressione negativa, rompe il legame tra polmone e cassa toracica: il polmone collassa al proprio volume mentre la parete

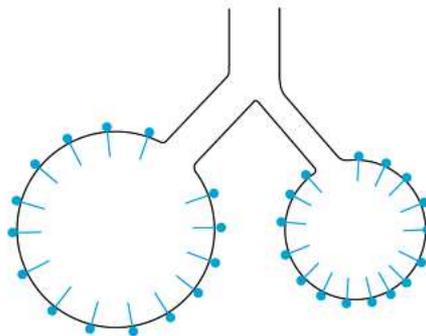
toracica si espande verso l'esterno. Tale condizione è detta di **pneumotorace** e si ha la completa incapacità del polmone di funzionare normalmente e può portare rapidamente alla morte del paziente.



## 12. L'azione dell'agente surfactante

All'interno degli alveoli esiste una tensione superficiale che si sviluppa perché la forze di coesione tra le molecole di liquido sono più forti di quelle esistenti tra molecole liquide e gassose. L'aria alveolare è satura di acqua per cui la superficie epiteliale degli alveoli, a contatto con l'aria, è ricoperta continuamente da un velo di acqua. Per questo si sviluppa una forte tensione superficiale aria-acqua e gli alveoli, al fine di ridurre la superficie d contatto gas-liquido tendono a chiudersi. Circa i 2/3 della forza di retrazione polmonare sono dovuti alla tensione superficiale che si crea dentro gli alveoli. All'interno di ogni polmone sono presenti circa *300.000.000 alveoli* e se non si

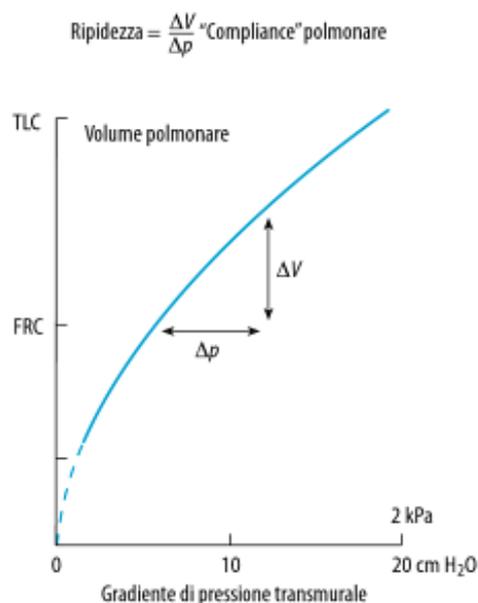
riducesse la pressione causata della forte tensione superficiale, essi potrebbero diventare un unico alveolo con scarsa funzione di scambio. A tale scopo viene prodotto, dai pneumociti di tipo II, il fattore surfattante, una molecola fosfolipidica denominata *dipalmitoilfosfatidilcolina*, ad azione tensioattiva, che diminuisce la tensione superficiale e quindi la tendenza degli alveoli a chiudersi su se stessi.



*La pressione in un alveolo piccolo è maggiore rispetto a uno più grande.*

### 13. Compliance, elastanza e resistenza polmonare

La **compliance** è la capacità del tessuto polmonare di espandersi e dilatarsi facilmente in seguito al flusso d'aria verso l'interno dei polmoni. Nel caso della retta d'equazione di Hooke la compliance rappresenta il coefficiente angolare della retta  $\frac{\Delta V}{\Delta P}$ .



Opposta è la **elastanza**, la capacità di tornare, in seguito a un ritorno elastico, allo stato di riposo durante l'espirazione.

Compliance ed elastanza sono essenziali per una buona ventilazione, negli anziani queste due proprietà si riducono: se i polmoni mancano di compliance allora si dilatano facilmente opponendo poca resistenza al flusso d'aria; se mancano di elastanza essi hanno poco ritorno elastico e non si comprimono facilmente per cui la maggior parte dell'aria rimane intrappolata al loro interno e l'espirazione diviene faticosa.

*L'enfisema polmonare* è uno stato patologico in cui il tessuto polmonare e le pareti alveolari risultano danneggiate o distrutte per cui la compliance del polmone aumenta notevolmente e piccole pressioni possono dilatare facilmente il polmone.

La *fibrosi* è una patologia polmonare che porta all'aumento di tessuto fibroso e non elastico nel polmone. La compliance in questo caso è notevolmente ridotta, e incrementi anche notevoli di pressione causano solo piccole variazioni di volume rendendo difficile la ventilazione.

Infine, la **resistenza**, ossia la proprietà del sistema polmonare di opporsi al flusso d'aria, è esprimibile attraverso legge di Poiseuille, che mette in relazione tre parametri: la lunghezza del sistema (L), la viscosità dell'aria che scorre ( $\eta$ ), il raggio dei condotti del sistema (r).

$$R \propto L \cdot \eta / r^4$$

Circa il 90% della resistenza può essere attribuito a trachea e bronchi strutture rigide con area della superficie di sezione minima. Trachea e bronchi sono sostenuto da tessuto cartilagineo in modo che il diametro della loro sezione non subisca modifiche durante la ventilazione e la resistenza offerta rimanga costante.

## 14. Tipo di ventilazione e ventilazione alveolare

La **ventilazione polmonare totale**, detta anche *volume minuto*, è il volume d'aria spostato dentro e fuori dai polmoni ad ogni minuto:

$$\text{Volume minuto} = \text{Frequenza respiratoria} * \text{Volume corrente}$$

$$\text{Volume minuto} = 12 \text{ atti respiratori} * 500 \text{ mL} = 6 \text{ L/min}$$

In un soggetto adulto il volume minuto è di circa 6 L/min. Tuttavia, non tutta l'aria che entra ed esce dai polmoni viene a contatto con la superficie alveolare. Infatti, una quota d'aria non raggiunge gli alveoli perché resta nelle vie aree di conduzione, cioè nella trachea e nei bronchi che vengono definiti **spazio morto anatomico**, in quanto in essi non è possibile scambiare gas con il sangue. Tale spazio ha un volume di circa 150 mL. Ad ogni atto respiratorio quindi giungono agli alveoli solo 350 mL di aria "fresca", ossia il volume corrente diminuito dei 150 mL di aria "ferma" dello spazio morto anatomico.

$$\text{Ventilazione alveolare} = \text{Frequenza respiratoria} * (\text{Volume corrente} - \text{spazio morto anatomico}) = 4,2 \text{ L/min}$$

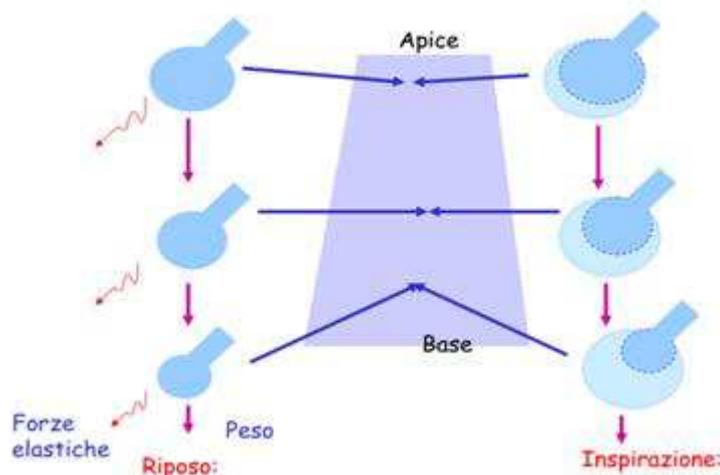
## Tipo di ventilazione e ventilazione alveolare

ARIA FRESCA AGLI ALVEOLI (mL)	VOLUME CORRENTE (mL)	FREQUENZA RESPIRATORIA (atti/min)	VOLUME MINUTO (mL/min)	VENTILAZIONE ALVEOLARE (mL/min)
350	500 (normale)	12	6000	4200
600	750 (profonda)	8 (lenta)	6000	4800
150	300 (superficiale)	20 (rapida)	6000	3000

## 15. Il rapporto ventilazione perfusione

La ventilazione polmonare è la quantità d'aria che raggiunge gli alveoli in un minuto; la perfusione polmonare è il flusso ematico al minuto attraverso il circolo polmonare e corrisponde alla gittata

cardiaca. La ventilazione è una grandezza che è migliore alla base del polmone dove gli alveoli, poiché più schiacciati a causa della forza di gravità, si distendono di più di quelli che sono già un po' aperti in alto. Anche la perfusione è maggiore alla base, dove i capillari risultano un po' più aperti di quelli che stanno in alto. L'indice che tiene conto della ventilazione alveolare e dell'irrorazione polmonare è detto rapporto ventilazione/perfusione ed è espresso dalla formula:  $\frac{V}{Q}$ . Questa frazione ha un valore maggiore all'apice perché la ventilazione diminuisce meno rapidamente della perfusione ed ha un valore medio di circa 0,8.



*Distribuzione regionale della ventilazione*

## 16. Il controllo della ventilazione

La ventilazione è un processo ritmico che si verifica normalmente in assenza di consapevolezza e per questo aspetto assomiglia al battito cardiaco. Tuttavia i muscoli scheletrici, responsabili dell'atto respiratorio, non sono in grado di contrarsi spontaneamente come le fibre muscolari autoritmiche del tessuto cardiaco. Essi, infatti, necessitano del controllo superiore dei motoneuroni somatici controllati a loro volta dal sistema nervoso centrale (SNC). La ritmicità della ventilazione è modulata da diversi fattori quali i riflessi

chemocettivi, il feedback del centro di controllo del sistema cardiovascolare, le emozioni e il controllo conscio e inconscio da parte del SNC. Diaframma e muscoli intercostali sono comandati da un **generatore centrale di ritmi ventilatori** che comprende gruppi di neuroni situati nel ponte e nel bulbo del tronco dell'encefalo, i quali generano una serie di impulsi ritmici in maniera simile alle cellule pacemaker cardiache con potenziale di membrana instabile. Più precisamente, tra neuroni bulbari vi è il **gruppo ventilatorio dorsale (DRG)** che controlla l'inspirazione agendo sul diaframma e il **gruppo ventilatorio ventrale (VRG)**, che controlla l'espiazione. I neuroni del VRG rimangono inattivi durante la respirazione a riposo, mentre si attivano nella espiazione attiva, per esempio durante un esercizio fisico.

Durante un esercizio fisico inoltre aumenta l'attività dei neuroni inspiratori e si ha una stimolazione dei muscoli accessori come gli *sternocleidomastoidei*. La ventilazione è invece modulata dai neuroni del ponte.

La ritmicità del generatore centrale di ritmi respiratori è influenzata da informazioni sensoriali provenienti da chemorecettori centrali e periferici, i quali sono maggiormente affini alle variazioni di anidride carbonica, ossigeno e pH plasmatico. I recettori per la CO<sub>2</sub> e per l'O<sub>2</sub> si trovano lungo la circolazione arteriosa: se nel sangue è presente un eccesso di CO<sub>2</sub> o una carenza di O<sub>2</sub>, tali recettori inviano stimoli atti a modulare la ventilazione aumentando la frequenza e la profondità di quest'ultima.

I **chemorecettori centrali** avvertono la presenza di un eccesso di CO<sub>2</sub> avvertendo i cambiamenti del pH nel liquido cerebrospinale. Infatti l'anidride carbonica che si diffonde attraverso la barriera ematoencefalica nel liquido cerebrospinale è convertita a bicarbonato e ioni H<sup>+</sup> i quali sono responsabili della diminuzione del pH.

I **chemorecettori periferici** si trovano nelle arterie carotidiche (glomero carotideo) e nell'aorta (glomero aortico); essi rilevano specialmente i

cambiamenti della  $PO_2$  nel plasma. Solo se la  $PO_2$  si abbassa del 50% i chemorecettori si attivano e la frequenza della respirazione aumenta.

Nonostante sia possibile modulare volontariamente la ventilazione ad atto del sistema nervoso centrale, non è invece possibile bloccare i riflessi mediati dai chemorecettori e per questo motivo non si può arrestare volontariamente la respirazione in maniera permanente. Infatti, quando i livelli della  $PCO_2$  nel plasma e nel liquido cerebrospinale aumentano, si attivano i chemorecettori e che ci costringono all'inspirazione.

Parametri		età pediatrica	adulti
Frequenza respiratoria	(per minuto)	30-40	12-16
Tempo inspiratorio	(s)	0,4-0,5	1,2-1,4
Rapporto di tempo resp.	(I:E)	1:1,5-1:2	1:2-1:3
Flusso inspiratorio	(l/min)	2-3	24
Volume per atto insp.	(ml)	18-24	500
	(ml/kg)	6-8	6-8
FRC	(ml)	100	2200
	(ml/kg)	30	34
Capacità vitale	(ml)	120	3500
	(ml/kg)	33-40	52
Capacità totale	(ml)	200	6000
	(ml/kg)	63	86
"Compliance" totale	(ml/cm $H_2O$ )	2,6-4,9	100
	(ml/cm $H_2O$ /FRC)	0,04-0,06	0,04-0,07
"Compliance polmonare"	(ml/cm $H_2O$ )	4,8-6,2	170-200
	(ml/cm $H_2O$ /FRC)	0,04-0,074	0,04-0,07
Perdita respiratoria d'acqua	(ml/24 h)	45-55	300



## Capitolo 2 - Ventilatori meccanici artificiali

In passato, la ventilazione artificiale era vista come un semplice procedimento meccanico. Oggi, grazie alle nuove tecnologie nel campo dei ventilatori e alle diverse modalità in cui può essere erogata, la respirazione artificiale si è sviluppata nell'ambito di un complesso procedimento terapeutico che richiede, da parte degli operatori di terapia intensiva e non, una vasta conoscenza delle basi e dei principi di funzionamento.



La **ventilazione artificiale**, nota anche come **ventilazione meccanica**, sostituisce o integra l'attività dei muscoli inspiratori fornendo l'energia necessaria ad assicurare un adeguato volume di gas ai polmoni soprattutto durante una insufficienza respiratoria acuta.

La ventilazione meccanica può essere utilizzata in maniera **continua** o **intermittente**, soprattutto durante il sonno. Essa viene erogata con apparecchiature speciali, dette ventilatori polmonari, di piccole dimensioni che possono facilmente essere trasportati e utilizzati a domicilio.

Essa ha lo scopo di supportare o vicariare completamente la ventilazione, in modo da allontanare la  $CO_2$  prodotta nel metabolismo e fornire all'organismo una quantità di  $O_2$  sufficiente al fabbisogno

dello stesso organismo. Perché si possa avere un flusso di gas, è necessario che tra la bocca e i polmoni esista un gradiente di pressione. Il gradiente può essere prodotto da una pressione positiva a livello della bocca e in questo caso si parla di **ventilazione a pressione positiva** oppure realizzando una pressione negativa a livello pleurico e si parla di **ventilazione a pressione negativa**, realizzabile con il “polmone d’acciaio”.

In particolare, la ventilazione artificiale si classifica in:

- a. **Ventilazione artificiale permanente**, generalmente realizzata mediante un *sistema a pressione negativa*, grazie ad una camera d’aria che circonda il torace – come il cosiddetto *polmone d’acciaio* – e che viene ritmicamente resa a pressione negativa per permettere l’aspirazione dell’aria nelle vie aeree e nei polmoni;
- b. **Ventilazione artificiale temporanea**, realizzata mediante sistemi a *pressione positiva* come un ventilatore o la ritmica compressione manuale di un serbatoio di aria arricchita in ossigeno. Tra questi ultimi ricordiamo il *Pallone di Ambu* o un *Va e vieni*, collegati alle vie aeree del paziente.

La ventilazione artificiale inoltre può essere effettuata in due modalità:

- **Invasivamente**, attraverso un foro di pochi centimetri eseguito sulla cute all’altezza della trachea (detto tracheostoma) attraverso il quale viene inserita una cannula tracheostomica di materiale plastico che permette l’entrata del flusso di aria dal ventilatore ai polmoni.
- **Non invasivamente** per mezzo di apposite maschere facciali o nasali che, una volta fissate al volto del paziente con leggere cinghiette, permettono di collegarsi al ventilatore meccanico che eroga il flusso attraverso un circuito cilindrico.

E' spesso considerata un *intervento salva-vita*, ma non è privo di complicanze, anche gravi, come lo *pneumotorace*, la lesione delle vie aeree o degli alveoli e la polmonite infettiva.

## 1. Ventilatori a pressione negativa

Il polmone d'acciaio, conosciuto anche come **Cisterna di Drinker e Shaw** o *corazza respiratoria*, fu sviluppato nel 1929 e fu una delle prime macchine a pressione negativa per la ventilazione artificiale a lungo termine.

Si tratta di un contenitore metallico, nel quale il paziente è chiuso fino al collo con la testa che sporge e le vie aeree in diretto contatto con l'aria dell'ambiente. Attraverso un mantice viene generata una depressione all'interno del contenitore, così che la cassa toracica si espanda e si determini una depressione all'interno delle vie aeree del paziente. L'aria ambiente, per differenza di pressione, entra nelle vie aeree e giunge nei polmoni. Annullando la depressione all'interno del contenitore, si ha il ritorno della gabbia toracica alla posizione di riposo, con conseguente svuotamento passivo del polmone. Il polmone d'acciaio riproduce quindi la normale meccanica respiratoria che si avrebbe se i muscoli respiratori non fossero danneggiati. In passato uno dei grossi problemi era rappresentato dal fatto che, poiché anche l'addome si trovava nella cisterna e di conseguenza anch'esso si espandeva durante l'azione del mantice, raccoglieva sangue, riducendo il riempimento cardiaco. Ad oggi, i sistemi a pressione negativa sono ancora in uso, per lo più su pazienti con insufficienza della muscolatura della gabbia toracica, come nella *poliomielite*. Ad essi viene coinvolta la sola zona toracica, con interessamento delle braccia e delle gambe, lasciando la possibilità di movimento al paziente e quindi eliminando il problema dell'espansione dell'addome.



*Una cisterna di “Drinker e Shaw” o “polmone d’acciaio”*

## **2. Ventilatori a pressione positiva**

Pur essendo la ventilazione a pressione negativa un sistema ancora utilizzato, la ventilazione a pressione positiva rappresenta la pratica più ricorrente.

Infatti attraverso la ventilazione artificiale positiva vengono trattate diversi tipi di patologie tra cui:

- danno polmonare acuto
- apnea da arresto respiratorio
- intossicazione
- malattie polmonari croniche
- acidosi respiratoria acuta
- paralisi del diaframma
- Miastenia Gravis (perdita del tono muscolare)
- crisi acute di distrofia muscolare o sclerosi laterale amiotrofica
- lesione del midollo spinale
- effetto di anestetici o farmaci miorilassanti
- aumento del lavoro dei muscoli respiratori, evidenziata da eccessiva tachipnea (frequenza respiratoria >20 atti/min)
- ipossia con  $\text{PaO}_2 < 55 \text{ mmHg}$
- ipotensione e shock, da scompenso cardiaco o sepsi.

Il ventilatore meccanico è utilizzato per aumentare o sostituire la ventilazione spontanea di un individuo che presenta insufficienza respiratoria/ventilatoria per malattie che colpiscono il polmone o la pompa toracica.

I moderni ventilatori a pressione positiva derivano dai dispositivi utilizzati nella seconda guerra mondiale per assistere la ventilazione in quota dei piloti di aerei militari. Il ventilatore lavora insufflando aria a pressione positiva nelle vie aeree del paziente. L'espirazione è permessa dal ritorno della pressione del ventilatore al livello della pressione atmosferica e dal ritorno elastico dei polmoni e della gabbia toracica.

La ventilazione artificiale è indicata negli interventi chirurgici che prevedano la curarizzazione del paziente con conseguente paralisi muscolare o nel momento in cui la respirazione spontanea del paziente non sia in grado di mantenere le funzioni vitali.

La ventilazione può essere effettuata con:

- pallone autoespandibile (AMBU)
- pallone va e vieni (o dispositivo a T)
- manualmente
- ventilatore meccanico



*Pallone va e vieni*



*Pallone ambu con reservoir*



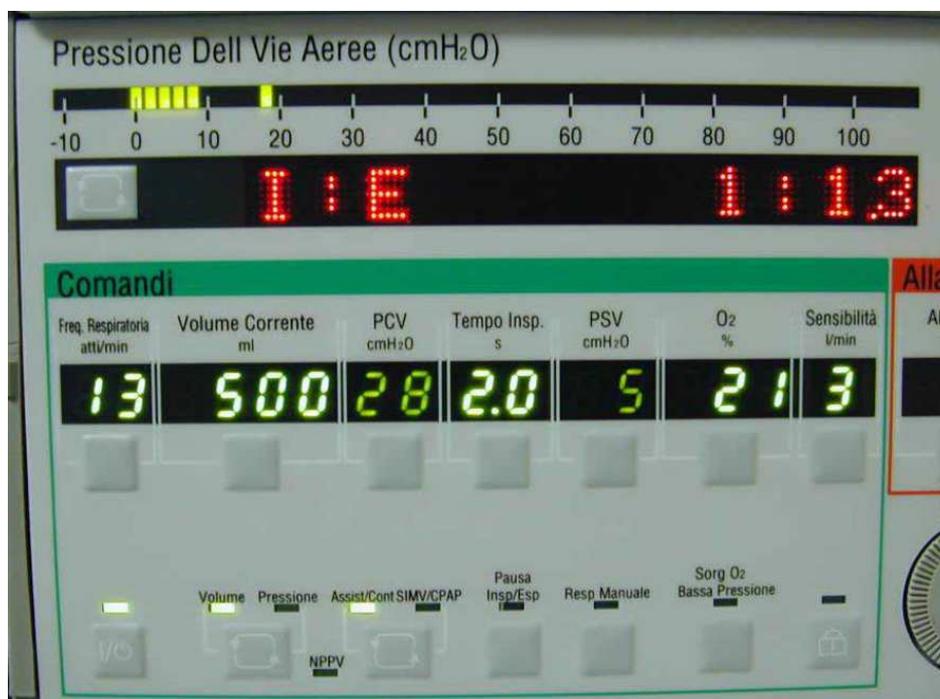
*Respirazione bocca a bocca*

In particolare ventilatori meccanici vengono classificati in:

- **Ventilatori trasportabili**, che sono piccoli, basilari ed alimentati pneumaticamente, oppure mediante corrente elettrica dalla rete oppure da batterie.
- **Ventilatori da terapia intensive**, di maggiori dimensioni, richiedono solitamente l'alimentazione diretta dalla rete elettrica ma tutti hanno una batteria per permettere il trasporto del paziente all'interno dell'ospedale oppure l'alimentazione temporanea in caso di black out. Questi dispositivi sono anche più complessi e permettono il controllo di più parametri della ventilazione. Inoltre, negli ultimi modelli sono presenti grafici in tempo reale per valutare visivamente l'effetto dei ventilatore sui flussi e le pressioni delle vie aeree.
- **Ventilatori per terapia intensiva neonatale**, progettati per la ventilazione dei neonati pretermine e presentano una risoluzione maggiore del controllo dei parametri della ventilazione.
- **Ventilatori a pressione positiva PAP ( Positive Airway Pressure)**, concepiti per la ventilazione non invasiva, anche a domicilio per il trattamento delle apnee ostruttive nel sonno durante le quali le vie aeree del paziente si restringono, i muscoli si rilassano naturalmente e si ha un brusco risveglio per non soffocare. La macchina PAP riesce a contrastare questo fenomeno fornendo una corrente di aria compressa, attraverso una mascherina facciale (o nasale) ed un tubo, permettendo, tramite la pressione dell'aria, di rendere pervie le vie aeree, in modo che sia possibile la respirazione senza ostruzioni. La macchina PAP eroga l'aria alla pressione prescritta che è nota anche come pressione "tirata" e viene usualmente determinata da un medico dopo l'analisi di uno studio polisonnografico eseguito durante uno studio notturno in un laboratorio del sonno.

- **Ventilatori C-PAP (Continuous Positive Airway Pressure)** che mantengono all'interno delle vie aeree una pressione costante maggiore della pressione atmosferica durante tutto il ciclo respiratorio al fine di favorire il reclutamento alveolare ed aumentare la capacità funzionale residua (CFR).

La CPAP, allevia la fatica dei muscoli respiratori e diminuisce il lavoro durante la respirazione. L'aumento della pressione nelle vie aeree permette inoltre una migliore distribuzione dei gas, questo porta ad un aumento della pressione alveolare, alla riespansione degli alveoli collassati, a una migliore compliance polmonare, alla diminuzione della resistenza delle vie aeree, ad un aumento della broncodilatazione che influisce positivamente sul rapporto Ventilazione/Diffusione (V/Q). Il respiro è tuttavia affidato totalmente al paziente ed è dunque impiegabile solo in pazienti con una buona funzione dei muscoli respiratori.



*Un respiratore domiciliare PAP*

### 3. Modalità di ventilazione

I sistemi di ventilazione, sia a pressione positiva sia negativa, vengono azionati in modo pneumatico, con pressione d'aria o di ossigeno oppure elettrico con corrente alternata o continua.

La trasformazione dell'energia di funzionamento nello sviluppo di un determinato flusso, pressione nelle vie aeree o volume d'esercizio, avviene per compressione gassosa interna od esterna, con l'impiego di valvole di controllo pneumatiche od elettromagnetiche.

Fondamentale per la comprensione della ventilazione meccanica è la conoscenza del rapporto tra pressione (p), flusso (F) e volume (V), in dipendenza della "Compliance" (C) e della resistenza (R) dell'apparato respiratorio.

Come già introdotto precedentemente, con questa terminologia si delineano le seguenti definizioni:

- La **Resistenza** è l'ostacolo opposto dalle vie aeree; definisce il valore di pressione che deve essere praticata per determinare un flusso nelle vie aeree

$$R = \Delta p / \Delta F$$

- La **Compliance** definisce l'espansibilità del sistema respiratorio, cioè la variazione di volume per unità di variazione di pressione, che si determina nei polmoni

$$C = \Delta V / \Delta p$$

- L'**elastanza** è indice della "durezza" del sistema respiratorio, indica quale pressione deve essere esercitata per determinare una predefinita variazione di volume

$$E = \Delta p / \Delta V$$

- L'elastanza e la "Compliance" sono relazionate da un rapporto inverso

$$E = 1/C$$

Durante l'inspirazione, deve essere esercitata una pressione totale data dalla somma delle pressioni elastiche e di resistenza

$$p_{tot} = p_{elast} + p_{resist}.$$

Questa pressione viene esercitata dal solo respiratore ( $p_{respiratore}$ ) nelle forme di sola ventilazione controllata, dalla muscolatura respiratoria del paziente ( $p_{paziente}$ ) nelle forme di sola ventilazione spontanea, oppure attraverso entrambe, nelle ventilazione parziali.

$$p_{tot} = p_{respiratore} + p_{paziente} = p_{elast} + p_{resist} = V \cdot E + F \cdot R$$

Da queste definizioni si deduce che quanto più alta è l'elastanza (cioè tanto più bassa è la "Compliance") e più alta la resistenza, maggiore è la pressione che deve essere sviluppata per determinare un preciso volume d'esercizio da parte del respiratore e/o dalla muscolatura del paziente.

Le modalità di ventilazione si classificano in base al controllo dell'atto respiratorio e tradizionalmente in base al modo con il quale viene stabilito quando interrompere l'insufflazione di aria. Oggi, diversamente dal passato, i ventilatori sono in grado di eseguire tutti programmi di ventilazione artificiale.

A seconda della variabile impiegata, la ventilazione viene definita come a pressione, a volume, a flusso o a tempo controllata.

### **3.1 Ventilazione a pressione controllata**

Una ventilazione a pressione controllata viene realizzata o per sviluppo di una pressione positiva nelle vie aeree oppure per determinazione di una pressione negativa, rispetto a quella atmosferica, sulla superficie toracica. La prima è la forma più comunemente impiegata, la seconda solo eccezionalmente. Volume e flusso sono le variabili dipendenti e quest ultimo il flusso è sempre decelerante. Il livello di pressione positiva da erogare nelle vie aeree è

stabilito dal medico e regolato sull'apparecchio, tale livello viene raggiunto ad ogni atto respiratorio. Questo tipo di ventilatore non garantisce però un volume di aria costante per ogni atto respiratorio, e quindi il volume/min è variabile. Per questo, tale ventilazione è considerata ventilazione di supporto (life-support) e non indispensabile (life-sustaining) alla vita del paziente: è pertanto da riservarsi alla ventilazione domiciliare di tipo non invasivo, generalmente applicata a pazienti con discreta autonomia respiratoria.

Esistono anche ventilatori che erogano una certa pressione a **tempo prefissato**, in questo caso il paziente dovrà adattarsi al ritmo della macchina.

Esistono invece dei ventilatori che erogano pressione solo a comando del paziente, ovvero quando il paziente inizia a respirare da solo (**ventilazione assistita**). La ventilazione controllata è per lo più usata per i pazienti non completamente autonomi nella ventilazione.

La **ventilazione in pressione di supporto (PSV)** è una modalità limitata in pressione, in cui ciascun atto respiratorio è iniziato e sostenuto dal paziente. Essa fornisce un supporto ventilatorio, respiro per respiro, per mezzo di un'onda di pressione positiva sincronizzata con lo sforzo inspiratorio del paziente che ne controlla sia l'inizio che la fine. La ventilazione a pressione di supporto può essere quindi utilizzata per *sostenere la ventilazione spontanea* in pazienti con richieste ventilatorie stabilizzate o in fase di svezzamento.

**Ventilatori Bi-Level:** ciclano fra due livelli di pressione, il livello più alto IPAP (Pressione Positiva Inspiratoria delle vie Aeree) assiste l'inspirazione ;il più basso EPAP (Pressione Positiva Espiratoria delle vie aeree) si applica durante l'espiazione. La ventilazione Bi-Level può svolgersi sia in modalità *spontanea* (assistita) che in modalità *timed* (controllata).

### 3.2 Ventilazione a flusso/volume controllata

I ventilatori a flusso/volume controllati sono in grado di erogare nelle vie aeree un volume prestabilito (tidal volume “ $V_t$ ”, o *volume corrente*) di aria per ogni atto inspiratorio. A differenza degli apparecchi pressometrici, la quantità di volume di aria è decisa e impostata dal medico, ed è costante ad ogni atto respiratorio. Quello che varia è il livello di pressione positiva nelle vie aeree necessario per raggiungere tale volume.

Sono utilizzati prevalentemente quando appaiono indispensabili alla sopravvivenza del paziente: sono, infatti, dotati della possibilità di impostare una ventilazione volume/minuto prefissata. Sono comunque indicati per la ventilazione domiciliare dei pazienti tracheotomizzati e incapaci di autonomia ventilatoria.

La suddivisione in ventilazione a volume/flusso controllata non ha molta importanza, visto che flusso e volume sono tra loro relazionate dal tempo:

$$\text{flusso} = \text{volume}/\text{tempo} \quad e \quad \text{volume} = \text{flusso} \cdot \text{tempo}$$

Una ventilazione a volume controllato è, quindi, sempre indirettamente a flusso controllato e viceversa.

Le forme più comunemente impiegate sono quelle con controllo di volume (VCV) e di pressione (PVC). Nei respiratori di vecchia generazione è possibile impostare solo uno dei due parametri. I respiratori moderni, invece, offrono la possibilità di scelta tra l'uno e l'altro. Comunque, anche in questi, non è possibile mantenere costante contemporaneamente, più di una variabile. È consentito, però, il cambiamento della variabile di controllo, nel corso del ciclo respiratorio, da flusso/volume a pressione.

## **4. Respirazione guidata dal paziente o dal ventilatore**

La ventilazione meccanica avviene, così come nella ventilazione spontanea, durante la fase inspiratoria, attraverso sviluppo, limitazione e conclusione dell'atto inspiratorio. Le diverse fasi dell'atto inspiratorio possono essere guidate o dal respiratore o dal paziente. Nel primo caso, le variabili di fase vengono determinate indipendentemente dall'attività del paziente. Nel secondo invece, il paziente interagisce con il ventilatore. L'attività del paziente e la contrazione della sua muscolatura respiratoria determinano variazione di pressione e movimento di flusso e volume nelle vie aeree, ai quali il respiratore, secondo prefissate condizioni ed algoritmi, reagisce. Da ciò vale che ciascuna variabile di fase può essere descritta secondo due aspetti: il primo, se viene guidata dal ventilatore o dal paziente, il secondo se è regolata da pressione, volume, flusso o tempo.

### **a. Guidata dal ventilatore (ventilazione controllata)**

L'inizio dell'inspirazione può essere guidata dal ventilatore. Dopo un certo lasso di tempo, viene conclusa l'espiazione ed inizia l'inspirazione. La guida da parte del ventilatore è, quindi, regolata dal tempo che è la variabile “**trigger**”. Una variante di questa forma è il “trigger” manuale, determinato dalla ventilazione manuale: in tal caso, la persona che ventila guida la ventilazione (secondo tempi prestabiliti) e sostituisce il respiratore.

### **b. Guidata dal paziente (ventilazione assistita)**

Il ventilatore registra i movimenti del paziente che sono coinvolti nell'inspirazione. Ciò è, quindi, possibile solo quando il paziente mantiene la sua spontanea attività respiratoria.

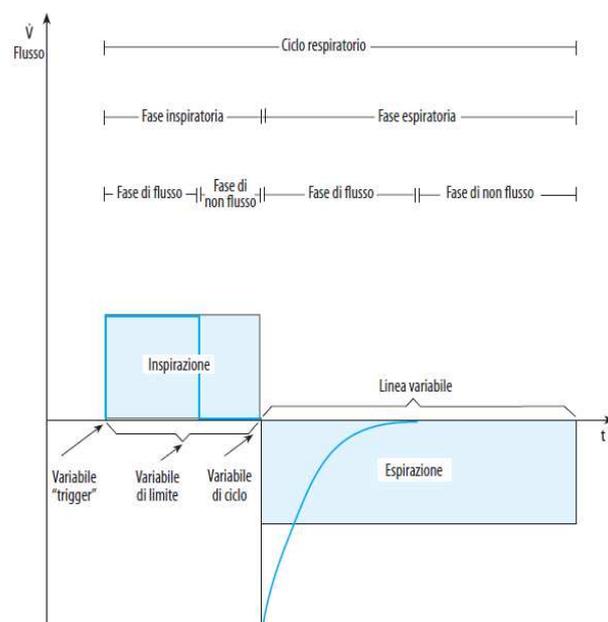
La ventilazione assistita riduce il rischio di *barotrauma* dal momento che è minima la sovrapposizione tra l'atto inspiratorio spontaneo e quello erogato rispetto alla ventilazione controllata.

Il “trigger” può avvenire secondo diversi principi:

- **Pressione o “trigger” di risucchio:** la riduzione della pressione nelle vie aeree è un “trigger”. L’entità della caduta di pressione necessaria, può essere definita direttamente al ventilatore oppure essere impostata al livello desiderato. È la forma “trigger” più comunemente impiegata.
- **Flusso “trigger”:** il ventilatore riconosce i movimenti inspiratori del paziente, grazie a variazioni di flusso.
- **Volume “trigger”:** vengono riconosciuti discreti movimenti di volume ed il ventilatore determina l’inspirazione.
- **Regolata a livello neurale:** è un innovativo approccio alla ventilazione meccanica controllata dai segnali del cervello che provocano la stimolazione vagale del diaframma. Tale modalità, denominata **NAVA (Neurally Adjusted Ventilatory Assist = assistenza ventilatoria regolata a livello neurale)**, sarà discussa ampiamente nel prossimo capitolo.

Dopo il raggiungimento di adeguati valori di pressione, volume/flusso o di un tempo prefissato, ha termine la fase inspiratoria e si ha il cambiamento dall’inspirazione all’espirazione. La variabile può essere guidata dal ventilatore o dal paziente come nel caso dell’inspirazione.

L’espirazione nella ventilazione meccanica, così come nel respiro spontaneo, avviene passivamente. La direzione del flusso durante la fase espiratoria è inversa rispetto a quella inspiratoria, pertanto il flusso espiratorio, nei diagrammi flusso-tempo, è negativo e rappresentato al di sotto della linea nulla, come possiamo osservare nello schema affianco.



*Curve di flusso nel ciclo inspiratorio*

## 5. Sistemi di allarme dei ventilatori meccanici

I sistemi d'allarme sono meccanismi che devono avvertire circa il possibile sviluppo o la presenza di eventi pericolosi. Questi ultimi possono essere:

- Errori di funzionamento del respiratore;
- Alterazioni dell'interazione tra paziente e ventilatore;
- Condizioni a rischio per il paziente.

Si suddividono tre livelli di priorità, corrispondenti all'intensità del segnale d'allarme rilevato. Il segnale d'allarme può essere ottico od acustico.

- I *segnali acustici* si differenziano in base alla regolazione del volume ed alla successione di toni. È possibile una loro temporanea sospensione (per circa due minuti). Se la causa si risolve, l'allarme acustico si annulla automaticamente;
- I *segnali ottici* possono essere semplici o complessi. I primi consistono nell'accensione o nel lampeggiare di una luce. I secondi evidenziano la causa dell'allarme in una finestra del monitor. Se il problema viene risolto l'allarme ottico può essere, grazie ad appositi tasti, resettato.

Il sistema d'allarme deve poter rilevare tutte le situazioni di pericolo (elevata sensibilità) e dall'altro lato, dare quanto meno possibile segnali falsi positivi (elevata specificità). Purtroppo, nella pratica, una elevata sensibilità si associa ad una bassa specificità, il che si traduce in una frequente segnalazione di falsi allarmi. Ciò potrebbe condurre ad una minore attenzione da parte del personale. Per tale motivo, non devono essere stabiliti livelli d'allarme per tutte le variabili da controllare, ma solo per i parametri essenziali.

Di regola, sono soggetti a controllo con sistemi d'allarme i seguenti parametri: fonte energetica, controllo del circolo, pressione nelle vie

respiratorie, volume respiratorio per esercizio e per minuto, frequenza respiratoria, rapporti di flusso, rapporto tra i gas inspirati e loro temperatura. Gli eventi segnalati possono essere classificati a seconda delle priorità.

Priorità	Pericolo di vita	Urgenza immediata	Ridondanza	Tipo di allarme
Primo livello	si, subito	si	si	acustico (forte) + ottico
Secondo livello	si, possibile	si	no	acustico (deb.) + ottico
Terzo livello	no	no	no	ottico

## 6. Ventilazione non invasiva NIV( Non Invasive Ventilation )

Un'altra modalità di ventilazione artificiale è rappresentata dalla ventilazione non invasiva (NIV) che sostiene il respiro senza necessità di intubazione endotracheale. Può essere realizzata nei casi di ventilazione a domicilio per patologie respiratorie croniche o per il trattamento delle patologie respiratorie acute o degli scompensi acuti delle patologie respiratorie croniche in terapia intensiva. Ove possibile viene effettuata, poiché sono molteplici gli svantaggi e le possibili complicazioni di un'intubazione protratta o di una tracheotomia, tra i quali:

- Insufficiente umidificazione dell'aria inspirata;
- Lesioni da pressione di naso, palato, corde vocali e trachea;
- Polmoniti;
- Sinusiti;
- Difficile comunicazione con il paziente.

## 7. Sostegno polmonare artificiale ALA ( Artificial Lung Assist )

È noto che elevate concentrazioni inspiratorie di ossigeno, così come eccessive pressioni e volumi d'esercizio nelle vie aeree, nelle alterazioni polmonari acute, possono ulteriormente peggiorarne

funzione e struttura. In alcuni pazienti, nonostante l'ottimale impostazione di una terapia respiratoria, non è possibile raggiungere e mantenere valori adeguati di  $paO_2$ . Questa condizione può svilupparsi rapidamente (“**catastrophic lung disease**”) o progressivamente, nell'arco di alcuni giorni. In caso di fallimento delle metodiche convenzionali di terapia respiratoria, in alcuni centri, vengono praticate tecniche di sostituzione della funzione polmonare, extra- ed intracorporee. Il fine è quello di porre il polmone in una condizione di “riposo”, evitando pressioni e volumi d'esercizio elevati ed eccessive concentrazioni inspiratorie di ossigeno. A queste tecniche appartengono:

- Il sostegno polmonare extracorporeo (“Extra Corporal Lung Assist”, ECLA);
- L'ossigenazione intravascolare.

L'ECLA viene praticata secondo diverse varianti ed identificata con varie denominazioni: arterovenosa, venoarteriosa e venovenosa. Come noto, la variante venoarteriosa è da tempo praticata in cardiocirurgia nella macchina cuore-polmone e, definita con il termine ECMO (“ExtraCorporal Membrane Oxygenation”, ossigenazione extracorporea a membrane). La tecnica venovenosa, è oggi di più frequente applicazione ed è stata inizialmente definita come ECCO<sub>2</sub>-R (“ExtraCorporal CO<sub>2</sub>-Removal”, eliminazione extracorporea di CO<sub>2</sub>), poiché avviene, in primo luogo, l'eliminazione di anidride carbonica e non l'ossigenazione del sangue. Questo processo è, tuttavia, realizzabile anche nella ECLA venovenosa e, per tale motivo, vengono indicate la tecnica venoarteriosa e venovenosa dello scambio gassoso extracorporeo.

### **7.1 Ossigenazione extracorporea a membrane (ECMO)**

Così come avviene in cardiocirurgia nella macchina cuore-polmone, il sangue viene prelevato da una grossa vena ed attraverso una cannula

di cospicuo diametro, drenato all'esterno dell'organismo, convogliato grazie ad una pompa a rullo in una o due membrane ossigenanti e quindi ricondotto all'organismo in una vena (o arteria). Questo procedimento necessita di una riduzione della coagulazione, ottenibile con *eparina*. Per determinare una sufficiente ossigenazione ed eliminazione di anidride carbonica, il "flowrate" extracorporeo deve essere superiore a 2,5 Litri/minuto. Tuttavia a seguito di tale metodologia possono insorgere gravi effetti collaterali e complicazioni emorragiche dovute alla importante somministrazione di *eparina* e lesioni in corrispondenza dell'arteria. Inoltre si può giungere a una distribuzione ineguale del sangue ossigenato o ad una alterazione di quest'ultimo a causa del flusso elevato.

## **7.2 Eliminazione extracorporea di CO<sub>2</sub> ( Extra Corporal CO<sub>2</sub>-Removal, ECCO<sub>2</sub>-R)**

In passato, la ECCO<sub>2</sub>-R veniva combinata alla ventilazione a bassa frequenza. Oggi invece, l'eliminazione di anidride carbonica viene considerata di minore importanza e l'ossigenazione del sangue venoso nella membrana ossigenante, come più importante funzione della metodica. La metodica viene eseguita con tecnica di irrorazione venovenosa, con membrane polmonari con *eparina* e sistema di tubi, in modo che siano sufficienti minime riduzioni della capacità di coagulazione ematica.

## **7.3 Ossigenazione intravascolare**

Questa tecnica prevede l'introduzione di membrane ossigenanti nella vena cava, attraverso la giugulare interna o la femorale. La membrana consiste di fibre insufflate di ossigeno con micropori, sulla cui superficie avviene uno scambio gassoso artificiale. Tuttavia la superficie di scambio gassoso del sistema ("IntraVascular OXYgenator" IVOX) è minima e la capacità di ossigenazione relativamente limitata.

## 8. Scopi clinici della ventilazione

La ventilazione meccanica può sostenere il respiro alterato, fino a quando la funzione polmonare non migliori, permettendo una sufficiente respirazione spontanea. La ventilazione, però, non risolve la patologia polmonare di base. Al contrario: la ventilazione è una metodica invasiva, associata a particolari rischi, che possono condurre ad ulteriori lesioni e complicazioni polmonari. I più importanti scopi della ventilazione sono:

### *1. Trattamento di uno stato ipossico (paO<sub>2</sub> inferiore a 60 mmHg)*

L'ipossia arteriosa, poiché mette in pericolo la vita del paziente, deve obbligatoriamente essere trattata. La paO<sub>2</sub> deve essere innalzata, in modo da ottenere valori di saturazione superiori al 90%.

### *2. Correzione di un'acidosi respiratoria (pH inferiore a 7,2);*

L'ipercapnia determinante acidosi respiratorie che possono mettere a rischio la vita del paziente, deve essere corretta. Mentre lo stato di normocapnia non è, in questo caso, lo scopo principale della ventilazione meccanica, è importante riportare a valori normali il pH.

### *3. Trattamento dell'insufficienza respiratoria.*

Alcune patologie polmonari che inducono serie alterazioni respiratorie possono essere trattate con un temporaneo sostegno meccanico. Soprattutto in corso di malattie respiratorie gravi, la respirazione artificiale, non riesce a riportare i valori di paO<sub>2</sub> e pH a livelli normali, senza arrecare ulteriori lesioni polmonari. Si deve valutare, caso per caso, se possono essere tollerati valori più bassi.

### *4. Ripresa della funzionalità della muscolatura respiratoria.*

L'affaticamento della muscolatura respiratoria ("respiratory muscle fatigue"), per aumento acuto, non più compensabile, del lavoro respiratorio, può essere trattato con sostegno meccanico.

### *5. Possibilità di sedare e rilassare il paziente.*

Con l'impiego della respirazione artificiale, il paziente può essere sedato, rilassato, può essere sottoposto ad anestesia totale o ad analgesia, durante il trattamento in terapia intensiva o per interventi chirurgici.

### *6. Riduzione del fabbisogno sistemico e cardiaco di ossigeno.*

In alcune particolari condizioni patologiche, quali la grave insufficienza cardiaca, la sepsi, la ventilazione meccanica può ridurre il lavoro del miocardio e della muscolatura respiratoria e, quindi, ridurre il fabbisogno sistemico e cardiaco di ossigeno.

### *7. Riduzione della pressione intracerebrale.*

Un'iperventilazione meccanica controllata riduce l'irrorazione ed il volume di sangue che affluisce al distretto cerebrale, abbassando la pressione, come avviene nei casi di edema cerebrale o trauma cranico. Si devono valutare però i rischi connessi.

### *8. Stabilizzazione del torace.*

Nei traumi che determinano instabilità toracica ("flail chest"), la temporanea ventilazione può stabilizzare il torace e permettere una sufficiente ventilazione alveolare.

## **9. Differenze fra ventilazione a breve e lungo termine**

Gli scopi della ventilazione a breve e lungo termine non sono differenti, sebbene non si possa definire con esattezza il limite tra le due definizioni. Una ventilazione che dura più di 48 ore viene denominata a lungo termine. Tanto più prolungato è il tempo di permanenza del tubo, tanto maggiori sono le complicazioni ad esso correlate. Per tale motivo, in una ventilazione che si prolunga oltre i 14 giorni, è necessario effettuare una trachetomia.

Le complicazioni della ventilazione (infezioni, lesioni polmonari da volume o da pressione), probabilmente, aumentano con il

prolungamento della durata della ventilazione; errori nella programmazione dei parametri di ventilazione agiscono negativamente sui polmoni, anche nei casi di ventilazione a breve scadenza; lo svezzamento dal respiratore dopo una ventilazione a lunga scadenza è più complesso rispetto a quello successivo ad un trattamento di minor durata.

## 10. Svezzamento dalla ventilazione (“Weaning”)

Con il termine “Weaning” si intende il meccanismo di passaggio tra la completa ventilazione meccanica e con vie aeree artificiali (tubo endotracheale o cannula tracheale) alla respirazione spontanea con successiva estubazione.

## 11. Pulsossimetro

È una valutazione continua non invasiva dell’ossigenazione del sangue arterioso. Viene misurata la saturazione parziale di ossigeno dell’emoglobina (SpO<sub>2</sub>). Il valore viene mostrato in pochi secondi con un errore, per saturazioni comprese tra 60 e 90%, solo dell’1-2%. La pigmentazione della pelle non influenza la misurazione. Il valore normale di SpO<sub>2</sub> è 98%.

Come noto, la colorazione e le variazioni cromatiche del sangue dipendono dalla saturazione e dalle proprietà ottiche dell’*emoglobina*: quella ossigenata assorbe meno la luce nello spettro del rosso, rispetto all’emoglobina deossigenata (ridotta) risultando, quindi, meno trasparente alla luce, a queste lunghezze d’onda. Le metodiche spettrofotometriche del pulsossimetro si basano sulla *Legge di Lambert-Beer*, secondo la quale l’assorbimento (l’indebolimento di un raggio di luce) è data dal prodotto fra lo spessore dello strato della soluzione, il coefficiente di assorbimento e la concentrazione della sostanza disciolta (emoglobina).

$$I_1 = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

Così la concentrazione di una molecola può essere valutata analizzando l'assorbimento della luce ad una lunghezza d'onda data. Il rapporto di assorbimento viene calibrato rispetto a campioni noti di valori di saturazione e la curva risultante, viene memorizzata da microprocessori del pulsossimetro. Lo strumento esegue più di 100 letture al secondo e fornisce in "output" la media di queste osservazioni. Possono essere prefissati valori superiori ed inferiori di allarme, il cui superamento in senso positivo o negativo viene segnalato acusticamente.

## **12. Capnometria**

Valuta, ad ogni atto respiratorio, la concentrazione di anidride carbonica nella miscela di gas espirata e segnala sul monitor il valore rilevato. Nella capnografia, viene anche registrata la curva di CO<sub>2</sub>, durante tutto il ciclo respiratorio. La misurazione avviene per la maggior parte dei casi con la spettrometria ad infrarossi.



### **Capitolo 3 - Ventilatori artificiali con modalità NAVA®**

I primi ventilatori meccanici si sono diffusi circa 30 anni fa e da quel momento i reparti di terapia intensiva di tutto il mondo hanno iniziato a usare la ventilazione meccanica come terapia per salvare la vita dei pazienti nelle fasi più critiche.

Tale ventilazione era tecnologicamente poco avanzata, si basava su semplici pompe pneumatiche che spingevano l'aria verso l'interno dei polmoni senza curarsi del respiro spontaneo del paziente. Questo processo provocava spesso più danni di quanti ne avesse provocato la malattia.

E' noto, infatti, che durante l'inspirazione, l'aria ambiente fluisce nei polmoni a causa dell'espansione della gabbia toracica, la quale provoca una depressione (pressione negativa) all'interno delle vie aeree e l'aria per differenza di pressione vi fluisce all'interno. Per questo motivo insufflare aria a pressione positiva all'interno dei polmoni, con un meccanismo opposto a ciò che succede naturalmente, può provocare gravi barotraumi tra i quali l'infiammazione degli alveoli, i quali perdono la loro funzione di scambio gassoso, con la conseguenza che il paziente rischia di entrare in una condizione di scarsa ventilazione.

Con il passare degli anni e l'avvento dei computer e dei microprocessori, i ventilatori si sono evoluti e sono state introdotte speciali valvole (es. PEEP), sensori, flussimetri per cercare di analizzare la respirazione spontanea del paziente e sincronizzarvi con essa, in modo da produrre meno danni possibili.

Proprio grazie a tali innovazioni nasce la modalità di supporto ventilatorio parziale o ventilazione assistita, sviluppata per limitare gli effetti avversi della ventilazione a supporto totale. Tali innovazioni, infatti, consentono al paziente, che mantiene intatta l'attività respiratoria spontanea, di avviare l'atto respiratorio meccanico e di interagire con il ventilatore, per produrre un flusso e un volume

inspiratorio. Tuttavia, la coordinazione tra paziente e ventilatore è spesso problematica; quando è precaria, il consumo energetico dei muscoli respiratori aumenta e questo può compromettere l'esito finale.

Da quando sono stati introdotti i ventilatori meccanici il trattamento ventilatorio è stato tradizionalmente fornito attraverso un controllo della pressione dell'aria, del flusso e del volume.

Benché in uso con successo, da parecchie decine d'anni, queste forme di assistenza ventilatoria presentano numerosi limiti. E' vero infatti che l'impiego di segnali pneumatici nella gestione del ventilatore può risentire delle modificazioni delle proprietà meccaniche del sistema respiratorio del paziente, delle resistenze imposte dalle protesi tracheali e nel caso di ventilazione non invasiva, della presenza di eventuali perdite d'aria dal circuito.

Per ovviare questi problemi, oggi un gruppo di ricercatori di Toronto ha sviluppato una nuova metodica respiratoria basata sul controllo neurale dei pazienti, la cosiddetta NAVA Neurally Adjusted Ventilator Assist.

## **1. Come funziona NAVA®**

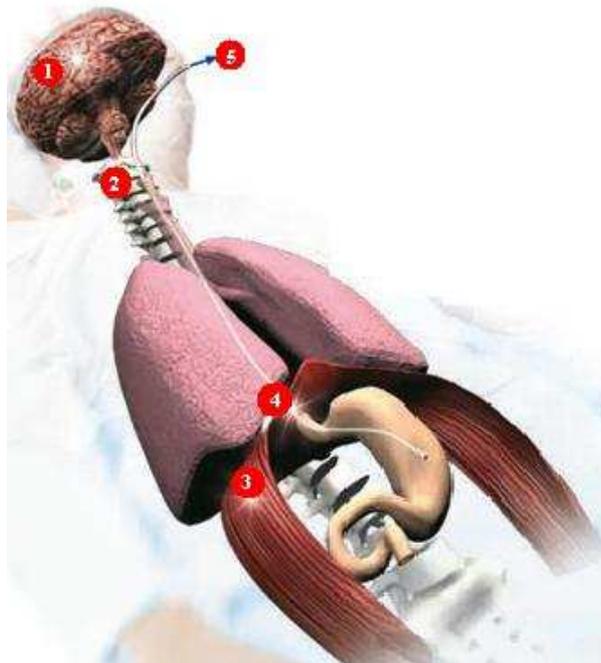
L'assistenza ventilatoria regolata a livello neurale NAVA®, dall'inglese Neurally Adjusted Ventilatory Assist, è un innovativo approccio alla ventilazione meccanica basato sull'emissione respiratoria neurale, disponibile sia in ventilazione invasiva che non invasiva (NAVA NIV). È un metodo di ventilazione controllata dai segnali del cervello che accresce l'interazione tra paziente e ventilatore.

L'azione del respiro viene controllata dal centro respiratorio del cervello, che stabilisce le caratteristiche di ciascun respiro, la durata e l'ampiezza. Il centro respiratorio invia un segnale lungo il nervo frenico e attiva le cellule muscolari del diaframma, causando la loro contrazione e la discesa della cupola diaframmatica. Di conseguenza,

la pressione nelle vie aeree scende, causando un flusso di aria nei polmoni. NAVA è in grado di rilevare tale attività elettrica del diaframma (Edi), il primo segnale respiratorio che può essere captato, tramite elettromiografia transesofagea. Il segnale Edi è il risultato della sommatoria, spaziale e temporale, dell'attività elettrica di tutte le unità motorie del diaframma reclutate.

Questo segnale viene prelevato tramite l'inserimento nasogastrico di un catetere provvisto di un array di elettrodi bipolari distali e che, interfacciato con il ventilatore, fornisce un'assistenza proporzionale e sincrona agli sforzi respiratori del paziente, indipendentemente dalla categoria o dalle dimensioni di quest'ultimo. Il livello di assistenza corrisponde alla moltiplicazione del segnale. Il segnale Edi è misurato 62,5 volte al secondo. Con NAVA quindi, l'attività elettrica diaframmatica viene catturata, inviata al ventilatore ed utilizzata per assistere la respirazione del paziente.

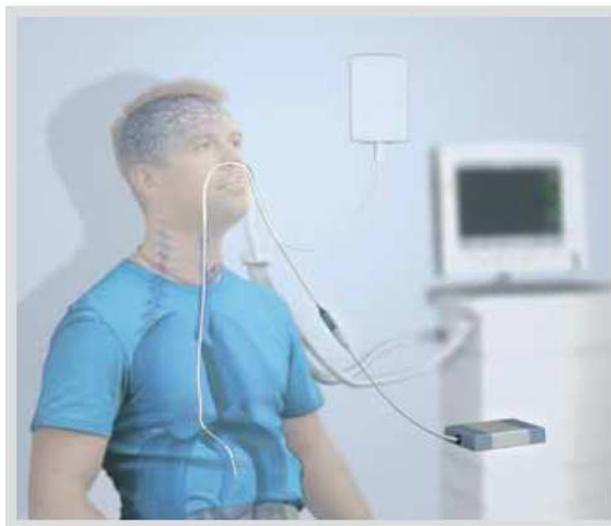
Ovviamente, l'impiego dell'Edi come espressione dell'output dei centri respiratori implica l'integrità dei nervi frenici e delle giunzioni neuromuscolari e assume che il diaframma sia il principale muscolo respiratorio.



*NAVA® e il processo di respirazione*

*Schema sintetico delle fasi del processo NAVA:*

- 1) Il centro respiratorio del cervello invia un segnale;
- 2) Il segnale viaggia attraverso il nervo frenico;
- 3) Il segnale giunge al diaframma e lo attiva;
- 4) Il catetere Edi, con gli elettrodi posizionati al livello del diaframma, cattura l'attività elettrica del diaframma (Edi);
- 5) Il segnale Edi viene inviato al ventilatore che sincronizza la ventilazione in proporzione agli sforzi dei singoli pazienti.



*“Il segnale Edi viene ottenuto da un array di elettrodi posizionati sulla punta distale di un tradizionale sondino di alimentazione nasogastrica.”*

La pressione del ventilatore è controllata direttamente dal controllo neurale della respirazione del paziente e dal momento che il ventilatore e il diaframma lavorano con il medesimo segnale, l'accoppiamento meccanico tra il diaframma e il ventilatore è praticamente istantaneo, simultaneo e sincronizzato.

La tecnologia convenzionale, invece, si limita a rilevare lo sforzo del paziente nella fase finale del processo respiratorio, condizione che, in molteplici casi, potrebbe non soddisfare le esigenze ventilatorie. I ventilatori meccanici tradizionali infatti percepiscono lo sforzo del paziente tramite una caduta della pressione nelle vie aeree o un'inversione del flusso. Come possiamo osservare dalla tabella a

seguito riportata, questo è l'ultimo gradino di risposta nella catena degli eventi respiratori, che rende un sistema di ventilazione tradizionale sensibile ai problemi di insufflazione eccessiva (sovra-assistenza).



*“NAVA apre una nuova finestra nella ventilazione meccanica: registra direttamente l’attività elettrica del diaframma e risponde fornendo una pressione direttamente proporzionale a quella spontaneamente richiesta attraverso l’eccitamento neurale.”*

Quando la respirazione aumenta e i centri respiratori stimolano il diaframma a un maggior sforzo, il segnale Edi rilevato si intensifica, quindi la pressione viene immediatamente fornita dal ventilatore NAVA spontaneamente desiderata.

Mentre si acquisisce il segnale di monitoraggio neurale, è possibile valutare quanto deve essere il livello di assistenza, sapere come è stato regolato il drive respiratorio e conoscere le pressioni utilizzate.

Ad oggi NAVA risulta l’unica modalità che può fornire queste funzionalità ed offre un controllo maggiore rispetto a qualsiasi altra modalità.

Un Pulsossimetro, ad esempio, potrebbe facilmente stimare che la saturazione della PaO<sub>2</sub> è scesa all’80% ma sarebbe il medico che dovrebbe effettuare le regolazioni necessarie guardando il monitor.

Con NAVA, invece, è il paziente il "responsabile" della regolazione della sua ventilazione. NAVA non compie alcun intervento osserva solo come il paziente sta regolando se stesso.

Attualmente a Toronto sono in corso studi anche su pazienti profondamente sedati con la respirazione controllata da NAVA: sembra che con poche difficoltà, i gas ematici siano tornati normali ed i pazienti siano divenuti stabili.

## **2. Com'è nata NAVA®**

Gli studi su NAVA sono iniziati con l'analisi dei segnali elettrici del diaframma, campo in cui era già stata compiuta per anni molta ricerca. Prima di tutto è stata compiuta una analisi spettrale, che ha esaminato l'attività elettrica del diaframma nel dominio della frequenze.

Il dominio delle frequenze può fornire una grande quantità di informazioni: può indicare, per esempio, quando è affaticato un muscolo, il numero di unità motorie di un muscolo e come vengono reclutate, che segnale è utilizzato quando si attiva la respirazione spontanea .

E' stato tracciato lo spettro delle frequenze in 1024 punti diversi, poi diviso in punti campione per valutare il segnale, quindi è stata fatta un'enorme analisi di ogni piccolo campione.

E' a questo punto che un medico di terapia intensiva, ha pensato di poter utilizzare questa grande quantità di informazioni sui ventilatori convenzionali.

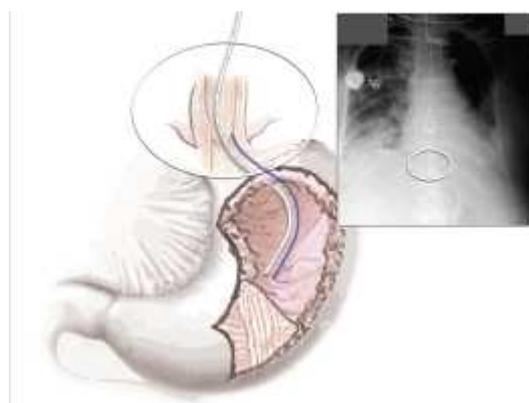
Continuando la ricerca sui segnali è stato osservato che i segnali del diaframma erano molto stabili e che invece i segnali di triggering dei ventilatori convenzionali avevano ritardi significativi: questo ha fatto pensare di poter implementare NAVA per migliorare l'efficienza di tali ventilatori. Sebbene non sia stato difficile implementare gli algoritmi per i ventilatori, sono sorte difficoltà quando si è cercato applicare questi algoritmi a una tecnologia e a piattaforme già esistenti perché si sono dovuti effettuare molti adattamenti.



*Un ventilatore meccanico MAQUET® con modulo NAVA®*

### **3. Il Caterere Edi (Diaphragmatic Electrical Activity)**

NAVA utilizza un sondino o catetere nasogastrico munito di elettrodi bipolari che rilevano l'Edi. Dei nove elettrodi disposti nella porzione terminale della sonda, otto sono dedicati alla registrazione del segnale, mentre uno è utilizzato per la messa a terra.



Il catere Edi funziona anche come sondino per l'alimentazione nasogastrica, ed è disponibile in dimensioni che vanno da 6 Fr a 16 Fr per soddisfare tutte le categorie di paziente, dai neonati agli adulti. Si applica semplicemente, come qualsiasi normale sondino nasogastrico posizionato nell'esofago al livello del diaframma.

Deve essere bagnato con soluzione fisiologica (non con soluzioni lubrificanti, che danneggerebbero gli elettrodi) prima di essere introdotto in esofago. Il posizionamento del catetere Edi assume una particolare importanza per assicurare un segnale Edi forte e letture accurate. Il sondino è collegato al ventilatore automatico tramite uno speciale cavo e si seleziona l'apposita funzione *Edi catheter*

*positioning*, che fornisce un'utile guida all'inserimento del sondino nella corretta posizione. Sullo schermo compaiono quattro tracce, che rappresentano il segnale elettrocardiografico (ECG) e quello elettromiografico. Una volta inserito, si verifica la corretta posizione del sondino controllando prima l'attività cardiaca ECG, poi l'Edi.



*“Una gamma di dimensioni di catetere Edi garantisce l’ottimizzazione della qualità del segnale per tutte le categorie di pazienti.”*



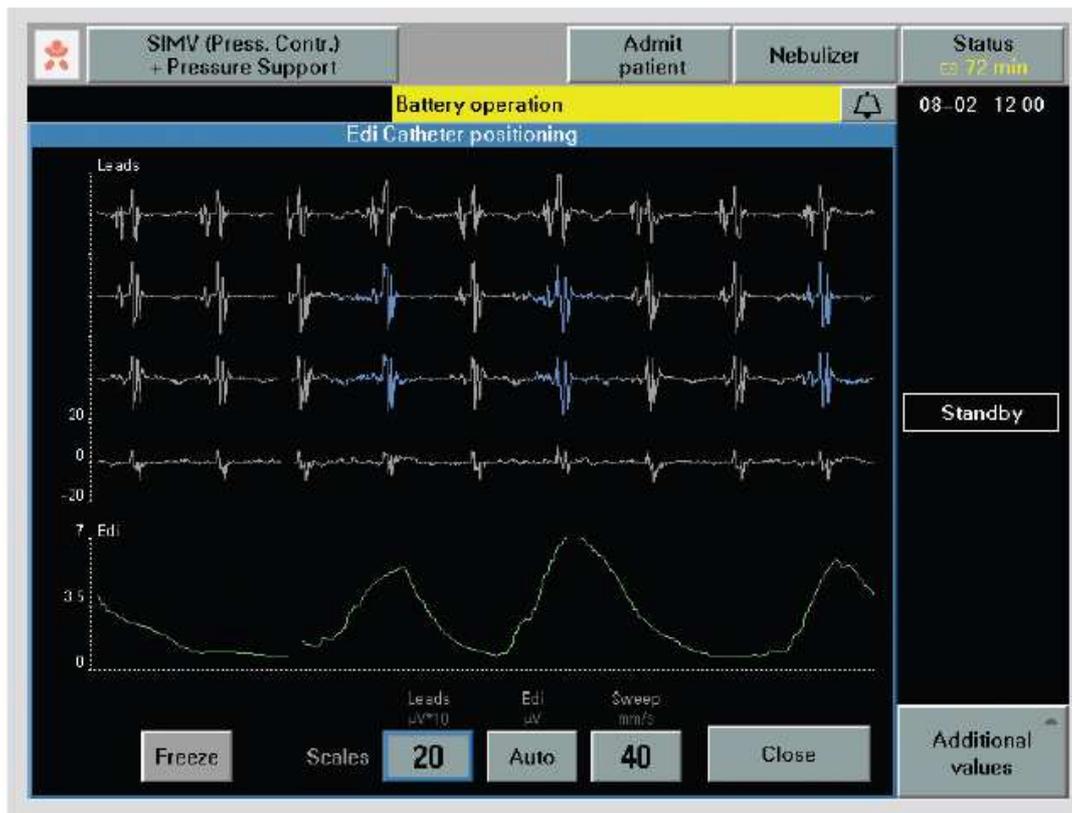
*“Il catetere Edi viene inserito alla profondità misurata e posizionato in modo corretto grazie all’ECG esofageo.”*

#### 4. La registrazione del segnale Edi

Fino ad alcuni anni fa non era possibile registrare fedelmente l'Edi a causa di interferenze provenienti dall'attività elettrica del cuore, dalla peristalsi esofagea, dall'attività simultanea di altri muscoli respiratori e dal rumore prodotto dal materiale elettrico presente nell'ambiente; per questo motivo non era possibile neanche farne un uso clinico vantaggioso.

Oggi, invece, si ha la disponibilità di elettrodi miniaturizzati applicabili a una comune sonda nasogastrica e software capaci di rilevare, filtrare, e elaborare l'Edi in tempo reale, in modo da renderlo disponibile per l'uso clinico e pilotare un ventilatore automatico. Il sondino nasogastrico, opportunamente modificato in modo da apporvi il sistema di elettrodi, consente la rilevazione dell'Edi dalla *porzione crurale del diaframma*, costituita da fibre che sono attaccate ai legamenti lungo le vertebre, con una procedura relativamente semplice. L'Edi del diaframma crurale è espressione dell'attività globale del muscolo in volontari sani e in pazienti con insufficienza respiratoria acuta e cronica. Rispetto agli elettrodi di superficie, quelli esofagei presentano il vantaggio di non risentire dell'attività dei muscoli espiratori e posturali (cross-talking) e degli strati sottocutanei. Il segnale elettrico diaframmatico, rilevato dagli elettrodi esofagei, è inviato al ventilatore dove un software dedicato lo trasforma e lo impiega per pilotare il supporto ventilatorio meccanico. La "quantità" di assistenza meccanica offerta dalla NAVA dipende dall'Edi e da un fattore di guadagno (NAVA gain). In breve, nel corso dell'inspirazione, la pressione delle vie aeree è direttamente proporzionale all'Edi, secondo l'equazione:

$$\text{Airway pressure} = P_{aw} (\text{cmH}_2\text{O}) = \text{Edi} (\mu\text{V}) \times \text{NAVA gain} \\ (\text{cmH}_2\text{O}/\mu\text{V})$$



*“Immagine dello schermo del ventilatore durante la fase di controllo della corretta posizione del sondino che monta gli elettrodi per la registrazione dell’Edi.”*

Nella parte superiore sono illustrate le 4 tracce elettromiografiche derivanti dalle 4 coppie di elettrodi (il nono serve per la messa a terra). Nelle due tracce centrali (seconda e terza, dall’alto) è presente il segnale elettromiografico “crudo” (cioè non trattato). Nell’ultima traccia, in basso, è mostrato il segnale Edith trattato (filtrazione, amplificazione, rettificazione e integrazione). Si osservi la riduzione dell’ampiezza delle onde P man mano che si procede dalle tracce più alte a quelle più basse. La posizione ottimale del sondino corrisponde a una prevalenza di attività elettromiografica del diaframma nelle due tracce centrali. In questo modo, il supporto erogato dal ventilatore è costantemente sotto il controllo dei centri respiratori del paziente e corrisponde, istante per istante, alla richiesta ventilatoria del paziente, a prescindere dalle proprietà meccaniche del sistema respiratorio e da eventuali variazioni della geometria del muscolo, facendo sì che

all'aumentare della richiesta ventilatoria corrisponda un aumento di assistenza meccanica da parte del ventilatore e viceversa .

I parametri da impostare in modalità NAVA sono il NAVA gain, il valore di PEEP (Positive End Expiratory Pressure), la soglia del trigger neurale e di quello pneumatico, la ventilazione di sicurezza e quella di backup. L'impostazione del trigger neurale implica di stabilire la quota di Edi che, addizionata al rumore di fondo, rappresenta la soglia di avvio del supporto meccanico.

Il trigger pneumatico, a flusso o a pressione, è utilizzato come meccanismo di sicurezza, nel caso in cui ci siano interferenze che limitino il funzionamento del trigger neurale. Trigger neurale e pneumatico lavorano seguendo il principio del *first serves first*, in base al quale l'assistenza è innescata dal trigger che si attiva per primo. È inoltre richiesta l'impostazione di una ventilazione di sicurezza (in PSV) che entra in azione nel momento in cui il segnale Edi perde in qualità (es., spostamento o usura del sondino). Inoltre, è indispensabile stabilire una ventilazione di back-up a controllo di pressione nel caso compaiano episodi di apnea o di assenza di segnale elettromiografico (es., sedazione eccessiva, curarizzazione).

NAVA elimina tutti i limiti legati all'impiego di trigger pneumatici, quali la presenza di pressione positiva di fine espirazione e di perdite d'aria dal circuito. Inoltre le variazioni della domanda ventilatoria da parte del paziente (es., febbre) e delle proprietà meccaniche del sistema respiratorio (es., broncospasmo) sono gestite in maniera ottimale con NAVA.

## **5. La terapia respiratoria in un modo radicalmente diverso e nuovo**

Solitamente i medici che lavorano in terapia intensiva hanno come supporto sia un anestesista sia un rianimatore: con NAVA , essi possono avere anche un supporto neurologico.

Nella ventilazione convenzionale è sempre presente una certa asincronia paziente-ventilatore ed è raro trovare pazienti con insufficiente sostegno mentre è facile trovare pazienti che stanno ricevendo troppo sostegno perché l'assistenza è stata prolungata oltre il ciclo neurale .

In particolare, avendo la possibilità di monitorare l'attività neurale del diaframma durante la ventilazione meccanica, si apre la possibilità di valutare tale asincronia paziente-ventilatore direttamente al posto letto.

E' infatti necessario che una metodologia fornisca supporto *nel momento* in cui il paziente ha bisogno e *nella quantità* desiderata: in questo senso è importante la sincronia.

Nessuno comprerebbe un mouse che impiega qualche secondo per visualizzare a monitor lo spostamento desiderato.

Con NAVA, il ventilatore “cicla” quando inizia l’inspirazione neurale, fornisce assistenza durante l'inspirazione in modo proporzionale al fabbisogno del paziente, smette di “cliccare” quando inizia l’espiazione neurale. Esso non interferisce con la respirazione naturale, perché ne segue il modello.

Uno dei maggiori problemi derivanti dalla assistenza in ritardo, è che le pressioni estreme e i volumi elevati possono causare lesioni ai polmoni.

Una recente esperienza nella ricerca suggerisce che la NAVA protegge i polmoni ed inoltre i dati clinici indicano anche che i volumi correnti scelti spontaneamente sono bassi e simili a quelli raccomandati dallo studio *ARDSNet* per ridurre il danno polmonare indotto dal ventilatore .

Nel corso di tre studi pre-clinici si è cercato di aumentare il livello NAVA fino ad assistere livelli di sovradistensione: non è stato possibile raggiungere tale livello poiché è comparso un riflesso neurologico che ha regolato e abbassato le pressioni troppo elevate. Fisiologicamente, infatti, quando un volume aumenta fino a un certo livello in cui non è più possibile ispirare, il corpo ha un meccanismo neurologico che arresta il processo. Con NAVA, un ventilatore funzionerebbe, ad esempio, nello stesso modo in cui un paziente non fosse in grado di buttare più fuori aria perché ha esaurito la riserva di volume all'interno di polmoni: egli non avrebbe alcun danno polmonare perché un riflesso neuronale bloccherebbe l'espiazione. Un ventilatore convenzionale potrebbe continuare a forzare l'espiazione e provocare un danno ai polmoni.

Riassumendo NAVA copre in modo intelligente entrambi due aspetti: *la sincronia* paziente-ventilatore e il *grado desiderato dell'assistenza* che non va mai oltre quello naturalmente richiesto.

NAVA permette quindi un meccanismo di difesa fisiologica del corpo che regola il ventilatore.

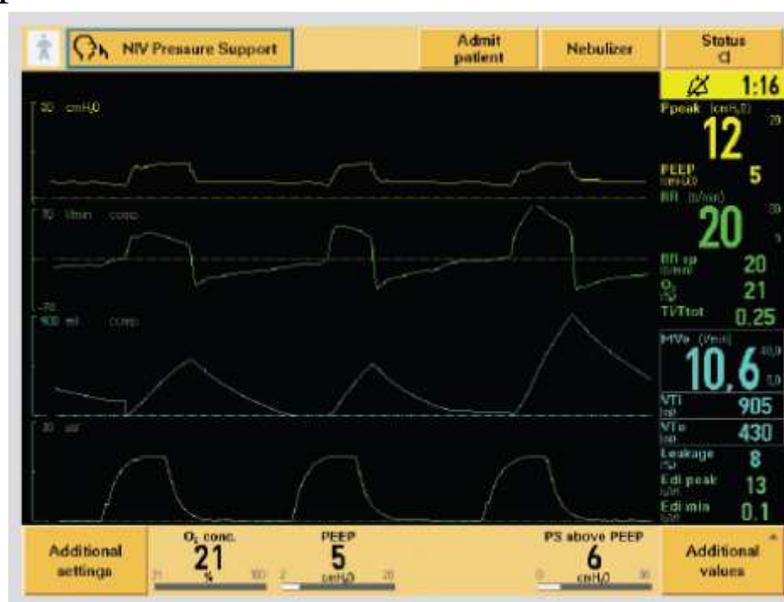
Per esempio, se un paziente avesse una inspirazione insufficiente e un ventilatore meccanico tradizionale iniziasse ad assisterlo, nel momento in cui smettesse di ispirare, si provocherebbe forte stress al paziente e si fornirebbe un livello di assistenza sbagliato.

Con la modalità di ventilazione NAVA, la respirazione spontanea è considerata un vero obiettivo e si cerca di interferire il meno possibile. L'assistenza respiratoria infatti deve essere fornita solo quando il paziente lo necessita e si deve arrestare quando il paziente ne ha ricevuta abbastanza.

## 6. NAVA NIV®

Con la modalità NAVA, non importa come si fornisce la ventilazione: si può ventilare con una maschera, con un casco, con occhialini nasali o un tubo endotracheale. La differenza tra invasivo rispetto a non-invasivo (NIV) è un modo tradizionale di pensare la ventilazione artificiale ma in NAVA non c'è nessuna differenza.

NAVA fornisce l'assistenza ventilatoria desiderata anche nel caso di pazienti sedati a causa di gravi malattie o forte dolore. Nei bambini e nei neonati, la ventilazione non invasiva convenzionale può essere complicata dalle perdite e dal fatto che lo sforzo del bambino risulta troppo debole per essere rilevato in modo preciso dai meccanismi di trigger a pressione o a flusso del ventilatore. NAVA NIV è una ventilazione non invasiva controllata neuralmente. NAVA NIV fornisce assistenza sincronizzata, indipendente dai sensori pneumatici convenzionali e dalle perdite associate alle interfacce dei pazienti. L'attivazione dei respiri e il meccanismo di ciclaggio non sono influenzati dalle perdite e tutti gli sforzi dei pazienti, indipendentemente dal tipo di interfaccia, sono valutati e assistiti in maniera ugualmente efficace per tutti i pazienti, da quelli adulti fino ai neonati più piccoli.



Una schermata del monitor durante NAVA NIV.

## **7. Campi d'applicazione**

La prima descrizione di questa tecnica risale a 10 anni fa. La NAVA è entrata in commercio ed è disponibile per l'uso clinico da circa un anno. In linea di principio la NAVA trova indicazione in qualunque forma di insufficienza respiratoria acuta e cronica riacutizzata che necessita di assistenza ventilatoria, purché non esistano controindicazioni all'inserimento di un sondino nasogastrico e vi sia integrità funzionale dell'asse centri nervosi-nervo frenico-diaframma. Quando è necessario sedare il paziente o ricorrere all'impiego di miorilassanti questa tecnica, ovviamente, non può essere utilizzata. E' comunque necessario oggi acquisire molta esperienza direttamente dal campo della terapia intensiva per classificare quali categorie di malattie e quali categorie di pazienti siano curabili con NAVA. Ad esempio, i pazienti sottoposti a un trapianto di cuore o polmone hanno molti organi in cui la connessione neurale è stata tagliata e sostituita da nuovi organi e per questo essi non sono adatti alla ventilazione con NAVA.

## **8. Un caso clinico**

Un paziente di 49 anni travolto da una ruspa durante il lavoro, giunge in ospedale con un esteso trauma addominale, eviscerazione e grave shock emorragico. Le indagini strumentali tomografiche mostravano un addensamento contusivo parenchimale postero-basale dei lobi inferiori. Viene portato in sala operatoria dove subisce un intervento di 15 ore. Dopo la ventilazione pressometrica controllata nella stabilizzazione postoperatoria, è stata impiegata con successo la modalità ventilatoria controllata a livello neurale. Durante l'adozione della NAVA l'adattamento del paziente e l'interazione con il ventilatore sono stati ottimi durante tutto il periodo. Il livello NAVA regolato in base al lavoro respiratorio compiuto dal paziente ha permesso un migliore reclutamento polmonare e la valutazione dinamica ed obiettiva dei progressi della respirazione.

Il monitoraggio del segnale Edi è risultato un importante indicatore dello svezzamento da una ventilazione prolungata in un grave trauma toracoaddominale. Esso è stato sfruttato come strumento diagnostico durante tutti i modi di ventilazione invasivo e non invasivo, per ottenere informazioni sul:

- drive respiratorio;
- l'effetto delle impostazioni ventilatorie;
- adattamento al piano di analgesedazione.

L'analisi di questo caso dimostra in maniera chiara l'utilità e l'efficacia di NAVA in casi di pazienti critici con forti compromissioni dell'apparato respiratorio, ribadendo la necessità di adottare questa innovativa modalità nella maggior parte dei reparti di terapia intensiva e di continuarne la ricerca.

## **9. I benefici di NAVA®**

NAVA rappresenta un'innovazione unica nel suo campo. Quanto descritto fin ora, frutto di recenti ricerche scientifiche sia in laboratorio sia mediante un'osservazione sul campo nei reparti di terapia intensiva, conferma l'indubbia validità della metodologia NAVA quale tecnica innovativa ed efficace di ventilazione assistita.

In particolare infatti utilizzando NAVA sono possibili maggiori e diversificati benefici, che con le tecniche di ventilazione convenzionali sono più difficilmente raggiungibili.

Possiamo riassumere tali benefici nei seguenti punti:

- **Migliore sincronia:** nel sistema NAVA il ciclo del ventilatore si avvia non appena ha inizio l'inspirazione neurale. Inoltre, il livello di assistenza fornito durante l'inspirazione è determinato dalla domanda del centro respiratorio del paziente stesso. Lo stesso accade per la fase di espirazione neurale, l'inspirazione dal ventilatore cessa nell'istante in cui il sistema riceve il segnale dell'inizio della fase di espirazione neurale.

Il paziente trae beneficio, poiché l'assistenza respiratoria sincronizzata consente livelli di assistenza più bassi ed elimina la discordanza con la durata pneumatica di inspirazione ed espirazione, evitando il rischio di sforzi inefficaci.

- **Capacità di monitoraggio:** il segnale Edi è un nuovo parametro unico nella ventilazione meccanica. Può essere utilizzato come strumento diagnostico per monitorare l'attività elettrica del diaframma. In tutti i modi di ventilazione, la curva Edi ed i valori ad essa associati possono dunque essere usati come potente strumento di monitoraggio, che offre informazioni su stimolazione respiratoria, requisiti volumetrici ed effetti delle impostazioni di ventilazione, e per ottenere indicazioni per la sedazione e lo svezzamento, nonché per il continuo monitoraggio dello stato diaframmatico del paziente. Tutti i trends (*Edi di picco, Edi minimo, compliance statica e dinamica, pressione min, max e media, PEEP, frequenza respiratoria, volume minuto*) e le modifiche nella stimolazione respiratoria del paziente sono registrati e salvati.



Schermata NAVA che mostra tutti trends per seguire i progressi del paziente.

- **Supporto decisionale per lo scarico e l'estubazione:** il segnale Edi può essere utilizzato come indicatore per stabilire il livello di supporto necessario dal ventilatore. Non appena le condizioni del paziente migliorano, l'ampiezza del segnale Edi diminuisce, determinando una riduzione della pressione fornita dal ventilatore. Questa diminuzione di pressione è un indicatore per prendere in considerazione lo svezzamento e l'estubazione.
- **Comfort del paziente:** con NAVA i muscoli respiratori e il ventilatore sono azionati dal medesimo segnale. Il livello di assistenza offerta è uguale alle esigenze neurali. Questa sincronia tra il paziente e il ventilatore aiuta a ridurre al minimo il disagio e lo stato di agitazione del paziente, promuovendo la respirazione spontanea e permettendo di ridurre l'eventuale sedazione.
- **Per neonati :** il segnale Edi offre uno strumento che consente ai medici di interpretare i caotici schemi respiratori che si riscontrano spesso nei pazienti infantili. L'accesso diretto alla gittata del centro respiratorio offre informazioni immediate sull'effetto di qualsiasi intervento relativo alla ventilazione polmonare. Infatti nei bambini e neonati le alte frequenze respiratorie, i piccoli volumi correnti, i tubi endotracheali di piccolo diametro, talvolta non cuffiati, non garantiscono che vi sia una buona interazione paziente-ventilatore se si usano ventilatori convenzionali.

## **Capitolo 4 – NAVA® a confronto con le modalità di ventilazione convenzionali**

Il principale aspetto innovativo di NAVA consiste nel fatto che, mentre i ventilatori convenzionali ancora oggi in uso, utilizzano la pressione e il flusso come feedback per controllare la ventilazione (ciò significa che un sacco di informazioni provengono dallo stesso tubo dal quale viene erogata allo stesso tempo la ventilazione), con NAVA le informazioni provengono da un'altra fonte: *direttamente dal cervello*.

### **1. I limiti della ventilazione convenzionale**

Nella meccanica respiratoria lo stimolo nervoso proveniente dal cervello è il primo evento che si manifesta, poi esso viaggia lungo il nervo frenico fino a stimolare in modo opportuno il diaframma. La contrazione del diaframma genera una differenza di pressione e di conseguenza un flusso d'aria. E' a valle di questa "catena" che si collocano i sensori dei ventilatori meccanici convenzionali: essi percepiscono un cambiamento nel flusso, nel volume, nella pressione dell'aria e stabiliscono che il paziente ha terminato l'atto inspiratorio e sta iniziando quello espiratorio e cercano di fornire un'assistenza il più possibile simile alla dinamica respiratoria spontanea del paziente. Con tali ventilatori convenzionali è sempre presente un certo disaccoppiamento tra l'assistenza fornita e il respiro naturale del paziente perché essi impiegano del tempo a valutare la dinamica respiratoria "guardando" dall'ultimo gradino della sua manifestazione. Essi sono sempre in ritardo perché quando i sensori pressometrici percepiscono che l'aria ha invertito il suo flusso, in seguito a una richiesta inspiratoria, il ventilatore inizia a fornire aria in pressione ma il paziente potrebbe non desiderarla più perché lo stimolo neurale che provocato la richiesta inspiratoria è avvenuto qualche istante prima e in quel momento il cervello potrebbe avere una nuova richiesta respiratoria.

Questa contrapposizione può far sì che i ventilatori convenzionali siano più nocivi che benefici per il paziente: una indesiderata pressione positiva nelle vie aeree può infatti provocare gravi barotraumi a causa dell'infiammazione degli alveoli polmonari che porta all'incapacità parziale o totale di respirare.

In modo estremamente innovativo ed intelligente, NAVA si colloca invece, poco appena sotto il primo gradino della meccanica respiratoria. Analizzando infatti gli stimoli nervosi che giungono dal cervello al diaframma attraverso il nervo frenico, NAVA riesce ad avere un ottimo accoppiamento con la respirazione spontanea del paziente, in quanto è trascurabile il ritardo che vi può essere tra la propagazione del segnale dal cervello all'acquisizione da parte del sensore Edi posto nel diaframma.

Per questo NAVA non è mai in conflitto con la respirazione spontanea del paziente, al contrario l'aiuta fornendo un equo grado di assistenza che non sia né troppo esiguo (sotto-assistenza) né troppo abbondante (sovra-assistenza).

Basandosi sulle naturali esigenze del paziente, NAVA permette così un graduale ritorno alla ventilazione naturale e permette un più precoce svezzamento.

D'altra parte, i ventilatori convenzionali sono spesso in contrapposizione con la respirazione spontanea del paziente. Se per esempio il paziente volesse espirare ma il ventilatore, a causa di una errata interpretazione del flusso o per una perdita nel circuito, erogasse aria all'interno dei polmoni si avrebbe una contrapposizione completa tra la macchina e il paziente che potrebbe portare in poco tempo alla morte per asfissia di quest'ultimo.

Con NAVA ciò non può verificarsi poiché, una volta avviata e riconosciuta, l'interpretazione del segnale Edi del diaframma è unica e difficilmente si commettono errori. Per tale motivo NAVA sarà sempre sincronizzato con la respirazione naturale del paziente. Con NAVA si ha inoltre una riduzione del carico dei muscoli respiratori perché non si è mai nelle condizioni di sotto-assistenza.

Nel caso in cui il segnale Edi divenga troppo debole, o il sensore si deteriori, o l'attività del diaframma del paziente venga improvvisamente a meno, vi sono numerosi meccanismi di sicurezza che entrano immediatamente in funzione, quali i trigger pneumatici convenzionali a controllo di pressione e volume/flusso.

Tuttavia NAVA, pur potendo essere considerato un presidio salvavita, richiede che il paziente sia sedato e spesso curarizzato, con il rischio che la mancanza di attività dei muscoli respiratori provochi atrofia, soprattutto a carico del diaframma e che quindi non sia possibile acquisire il segnale Edi. NAVA quindi non può essere utilizzata quando vi sono alterazioni anatomiche o funzionali dei centri respiratori nel tronco encefalico, dei nervi frenici, della giunzione neuromuscolare e del diaframma.

La NAVA inoltre non può essere utilizzata nei casi in cui sia impossibile introdurre in esofago una sonda nasogastrica (es., chirurgia esofagea recente, sanguinamento gastroesofageo, presenza di varici esofagee, trauma facciale).

Le difficoltà della ventilazione NAVA riguardano soprattutto la corretta posizione della sonda Edi in esofago. Infatti oltre alle complicazioni dovute all'inserimento della sonda (sanguinamenti, introduzione della sonda in trachea, creazione di false strade, lesioni da decubito) esiste il rischio di dislocazione di quest'ultima. Si cerca di ovviare fissando con cura la sonda e segnando dei riferimenti sulla sua superficie, in modo da poterne verificare periodicamente la corretta posizione. L'azienda produttrice consiglia di sostituire il sondino dopo 5 giorni di NAVA; il sondino può essere lasciato in sede se utilizzato soltanto con finalità metaboliche (somministrazione di diete enterali).

## **2. Differenze fra NAVA e la modalità con supporto di pressione (PSV)**

La NAVA, a differenza della forma di supporto parziale più comunemente usata, la ventilazione con supporto di pressione (PSV), si è dimostrata capace di mantenere una perfetta sincronia paziente-macchina a prescindere dall'entità del livello di assistenza fornito nel paziente ricoverato in Terapia Intensiva per insufficienza respiratoria acuta .

E' stato dimostrato che la NAVA è bene integrata con i sistemi di controllo respiratorio e aumentando il NAVA gain, l'Edi diminuisce e non c'è sovradistensione del polmone, anche a volumi polmonari elevati. Grazie ai riflessi intrinseci di controllo nel corso dell'inspirazione, non esiste alcun rischio che la NAVA possa erogare un eccesso di assistenza.

In uno studio in cui confrontavano NAVA e PSV in 15 pazienti con insufficienza respiratoria acuta di varia natura, applicando a entrambe 3 livelli di assistenza, le differenze tra le due modalità sono risultate evidenti a livelli elevati di assistenza: la NAVA non ha erogato un eccesso di assistenza, ha migliorato la sincronia paziente-ventilatore ed ha evitato la comparsa di sforzi inefficaci. In particolare, con la NAVA il volume corrente si è mantenuto stabile ed indipendente dal livello di NAVA gain impostato, mentre il volume corrente è aumentato significativamente in corso di PSV.

Infine, a differenza della PSV, la NAVA non ha prodotto alcun ritardo tra eventi neurali ed eventi meccanici della fase inspiratoria ed espiratoria. In 15 pazienti critici sottoposti a ventilazione meccanica, è stato riportato che l'aumento progressivo del NAVA gain ha provocato una riduzione dell'Edi, ma senza che vi sia stato un rilevante incremento del volume corrente o peggioramento delle condizioni emodinamiche.

## Conclusioni

Nel Capitolo 1 si è illustrata l'anatomia del sistema respiratorio, i principi con cui avvengono gli scambi gassosi di CO<sub>2</sub> ed O<sub>2</sub> tra l'ambiente e il corpo umano, la dinamica della meccanica respiratoria ed i volumi associati e il controllo neurale di quest'ultima. Nel Capitolo 2 in seguito sono state presentate le varie tipologie di ventilazione meccanica artificiale convenzionale e i ventilatori ad esse correlate ed sono stati illustrati anche metodi diversi dalla ventilazione per la ossigenazione del sangue e dei tessuti quali la ossigenazione extracorporea, la rimozione di CO<sub>2</sub> e la ossigenazione intravascolare. Successivamente, nel Capitolo 3 si è introdotta la nuova modalità di ventilazione meccanica assistita NAVA e ne sono state illustrate le basi ed i principi di funzionamento; sono stati descritti la ricerca che ha portato alla sua implementazione, i campi d'applicazione, i pazienti che sono più o meno adatti ad essere trattati con NAVA e a seguire, un caso clinico in cui si è dimostrata essenziale la sua adozione. Infine nel Capitolo 4 si è visto un confronto tra la nuova modalità NAVA e le modalità di ventilazione convenzionale ancor oggi in uso, mostrando, nella maggior parte, gli aspetti positivi di NAVA ma anche evidenziando i casi in cui essa non può e non deve essere utilizzata e i meccanismi di sicurezza necessari nel caso in cui essa fallisca.

E' noto che i periodi di asincronia durante la ventilazione meccanica convenzionale aumentano il costo delle cure, prolungano i giorni di ventilazione meccanica e provocano l'insorgere di altre patologie associate ad un aumento della degenza in terapia intensiva (UTI). Tutto ciò implica una minore disponibilità di posti letto in UTI. NAVA, con il monitoraggio Edi, è un ottimo strumento per verificare le condizioni respiratorie del paziente e per prevederne uno svezzamento precoce. I pazienti ritenuti, grazie a NAVA, in grado di respirare spontaneamente possono essere infatti spostati dal reparto di

terapia intensiva ad un reparto dove saranno controllati con minore intensità di cure, risparmiando così preziosi posti letto in UTI.

Per questo NAVA è una nuova modalità estremamente utile e necessaria, e, a mio avviso, dovrebbe essere implementata almeno in tutti i reparti di terapia intensiva dei più importanti ospedali del territorio.

Oggi NAVA è ancora in una fase pionieristica ma sta permettendo il passaggio ad una nuova generazione di ventilazione meccanica. Per compiere questo passaggio è necessaria molta comunicazione tra medici intensivisti al fine di condividere le reciproche esperienze. Un nuovo modo di pensare e una nuova prospettiva sulla ventilazione non significano solo soluzioni potenzialmente nuove, ma significano mettere in gioco nuove sfide e investire nel futuro della terapia intensiva .

*NAVA®, una conquista tecnologica unica nel campo della ventilazione.*

## **Bibliografia**

Cammarota G., Bergamaschi V., Nevalesi P., *Medicina Critica Capitolo 111 Neurally adjusted ventilator assist (NAVA)* in “UTET scienze mediche“.

Sinderby C., *NAVA – a new generation in respiratory therapy*, in *Maquet Critical Care News art n.16*.

Larsen R., Ziegenfuß T., *La respirazione artificiale: Basi e pratica*, Milan, Heidelberg, New York, Springer, 2012.

Silverthorn D.U., *Fisiologia - Un approccio integrato*, terza edizione, Casa editrice Ambrosiana.

## **Sitografia**

De Nicola A., Sucre M.J. , *NAVA (Neurally Adjusted Ventilatory Assist) in un caso di grave trauma toraco-addominale*, dicembre 2009, in <http://artsalus.myblog.it/archive/2009/12/08/nava-neurally-adjusted-ventilatory-assist-in-un-caso-di-grav.html>

De Nicola A., Sucre M.J. , *Useful of implementation of neurally adjusted ventilatory assist in critically ill patients*, 1 marzo 2010, in <http://ccforum.com/content/14/S1/P205>

Kieffer D., *The potential benefits of NAVA, Neurally Adjusted Ventilatory Assisted mechanical ventilation*, 18 ottobre 2011, in <http://www.helium.com/items/2242167-the-potential-benefits-of-nava-neurally-adjusted-ventilatory-assisted-mechanical-ventilation>

Mori D., *CPAP in ambito pre-ospedaliero come quando e perché*, 23 agosto 2011, in <http://www.areacritica.net/sito/2011/04/08/cpap-ambito-pre-ospedaliero-quando-perche>

Muscolino F., *La ventilazione artificiale meccanica*, 18 settembre 2011, in <http://www.areacritica.net/sito/2011/09/18/la-ventilazione-artificiale-meccanica>

Ostrovsky G., *NAVA (Neurally Adjusted Ventilatory Assist) Ventilation Technology*, 5 maggio 2009, in [http://www.medgadget.com/2009/05/nava\\_neurally\\_adjusted\\_ventilatory\\_assist\\_ventilation\\_technology.html](http://www.medgadget.com/2009/05/nava_neurally_adjusted_ventilatory_assist_ventilation_technology.html)

[http://www.maquet.com/content/Documents/Brochures/SERVOi\\_BR\\_OCHU\\_SERVOiwithNAVAFreeingthefullpotential\\_MX0685\\_00\\_IT\\_LR.pdf](http://www.maquet.com/content/Documents/Brochures/SERVOi_BR_OCHU_SERVOiwithNAVAFreeingthefullpotential_MX0685_00_IT_LR.pdf)

[http://it.wikipedia.org/wiki/Ventilazione\\_artificiale](http://it.wikipedia.org/wiki/Ventilazione_artificiale)

[http://www.asl2.liguria.it/pdf/ventilaizione\\_artificiale11.pdf](http://www.asl2.liguria.it/pdf/ventilaizione_artificiale11.pdf)

[http://www.med.unipg.it/ccl/Materiale%20Didattico/Fisiologia%20\(Pettorossi\)/Ventilazione%20Perfusione.pdf](http://www.med.unipg.it/ccl/Materiale%20Didattico/Fisiologia%20(Pettorossi)/Ventilazione%20Perfusione.pdf)

[http://www.maquet.com/content/Documents/Brochures/SERVOI\\_BR\\_OCHU\\_MX0356\\_NAVA\\_LR\\_IT\\_ALL.pdf](http://www.maquet.com/content/Documents/Brochures/SERVOI_BR_OCHU_MX0356_NAVA_LR_IT_ALL.pdf)

[http://www.criticalcarenews.com/upload/pdf/CCN\\_art54\\_ccn\\_art54\\_18\\_institutional\\_experience\\_of\\_nava\\_in\\_neuro\\_and\\_cardiovascular\\_intensive\\_care\\_patients.pdf](http://www.criticalcarenews.com/upload/pdf/CCN_art54_ccn_art54_18_institutional_experience_of_nava_in_neuro_and_cardiovascular_intensive_care_patients.pdf)

## **Ringraziamenti**

Ringrazio il Prof. Ing. Claudio Lamberti, mio docente, per avermi assistito e guidato nella relazione di questo elaborato.

Ringrazio il Dr. Ing. Marco Bissoli e il Dr. Ing. Paolo Massarotti, responsabili presso l'azienda **Maquet Spa**, unica azienda che commercializza la tecnologia NAVA®, per avermi fornito informazioni e utile materiale informativo per la stesura della tesi.

Ringrazio tutti i docenti e i collaboratori del corso di Laurea in Ingegneria Biomedica della II Facoltà di Ingegneria di Cesena per avermi guidato in questi anni negli studi.

Ringrazio inoltre tutti coloro che mi sono stati vicino e che mi hanno supportato in questi anni.