



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Biomedica

Tesi di Laurea di
Giulia Bolognini

**ANALISI DI DISPOSITIVI PER LA VENTILAZIONE
MECCANICA: SISTEMI COMMERCIALI E
VENTILATORI POLMONARI OPEN SOURCE**

**ANALYSIS OF MECHANICAL VENTILATION
DEVICES: COMMERCIAL SYSTEMS AND
OPEN SOURCE LUNG VENTILATORS**

Relatore:

Lorenzo Scalise

Correlatore:

Paolo Marchionni

Anno Accademico 2019/2020

INDICE

ANALISI DI DISPOSITIVI PER LA VENTILAZIONE MECCANICA: SISTEMI COMMERCIALI E VENTILATORI POLMONARI OPEN SOURCE

INTRODUZIONE	3
IL SISTEMA RESPIRATORIO	5
2.1 ANATOMIA E FISILOGIA DEL SISTEMA RESPIRATORIO	5
2.2 LA COMPOSIZIONE DELL'ARIA.....	7
2.3 LA VENTILAZIONE	9
2.4 L'AZIONE DELL'AGENTE SURFACTANTE	11
2.5 COMPLIANCE, ELASTANZA E RESISTENZA POLMONARE	11
I VENTILATORI POLMONARI	13
3.1 CARATTERISTICHE GENERALI.....	13
3.2 ELEMENTI PRINCIPALI-SCHEMA A BLOCCHI	16
3.3 MODALITÀ DI VENTILAZIONE	18
3.3.1 VENTILAZIONE A PRESSIONE NEGATIVA	18
3.3.2 VENTILAZIONE A PRESSIONE POSITIVA	19
3.4 TIPOLOGIE DI VENTILATORI.....	22
3.4.1 VENTILATORI DOMICILIARI.....	24
3.4.2 VENTILATORI OSPEDALIERI.....	28
VENTILATORI OPEN SOURCE	38
4.1 INTRODUZIONE.....	38
4.2 SPECIFICHE CHIAVE E MATERIALI	40
4.3 ANALISI DEI VENTILATORI POLMONARI OPEN-SOURCE.....	44
CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	50
BIBLIOGRAFIA	51

INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni il progresso che il mondo della Ricerca Scientifica è riuscito ad ottenere nel campo della respirazione meccanica è stato notevole; infatti i respiratori polmonari rappresentano ormai un pilastro fondamentale della Sanità. Proprio per tale ragione, in una situazione di emergenza, come la recente pandemia causata dal Coronavirus, essi sono divenuti tra i primi strumenti necessari per la sopravvivenza di un paziente. In questi ultimi mesi la richiesta di ventilatori polmonari è, infatti, aumentata in maniera esponenziale e i ricercatori di tutto il mondo si sono dovuti operare a livello globale per sopperire a questa necessità, con lo scopo di trovare un ventilatore realizzato con materiali facilmente reperibili e di basso costo, così da renderlo funzionale ed operativo in tempi brevi. Questi particolari requisiti sono perfettamente incarnati da quei ventilatori definiti: *Open Source*; così chiamati in quanto idealizzati e progettati attraverso l'uso di piattaforme online che permettono a pneumologi, ingegneri ed infermieri di poter contribuire all'implementazione del progetto attraverso le proprie competenze ed esperienze pregresse, rispettando gli obiettivi prefissati (basso costo, biocompatibilità, materiali facilmente reperibili, rispetto delle norme, ecc.).

L'obiettivo della tesi è dare un contributo alla ricerca di una soluzione per un problema così importante, andando a scoprire quale potrebbe essere il ventilatore polmonare che rispecchi al meglio le caratteristiche precedentemente riportate.

Per poter raggiungere questo obiettivo è necessario svolgere in primis un viaggio, un excursus, tra le attuali modalità di ventilazione presenti nel mondo della Sanità, sia di tipo ospedaliero che domiciliare, studiando quali sono le caratteristiche fondamentali che si celano dietro un ventilatore polmonare.

In secondo luogo, sulla base dello studio effettuato riguardo le tecnologie dei dispositivi in questione, e dopo aver acquisito le conoscenze necessarie, si è potuta effettuare una vera e propria review dei ventilatori polmonari Open Source con lo scopo di andarne a ricercare i più efficienti.

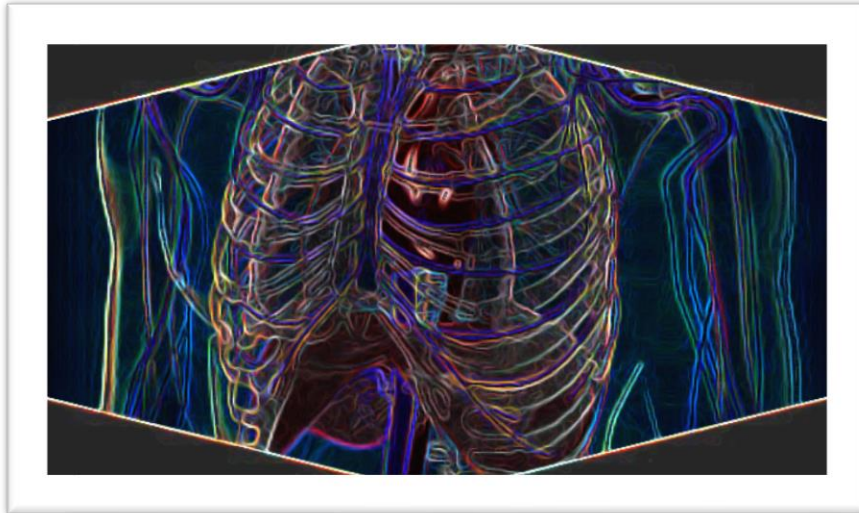


Figura 1

IL SISTEMA RESPIRATORIO

2.1 ANATOMIA E FISIOLOGIA DEL SISTEMA RESPIRATORIO

La respirazione polmonare è una funzione vitale del nostro corpo. Il suo scopo è trasportare ossigeno (O₂) dall'aria alle cellule e l'anidride carbonica (CO₂) dalle cellule all'aria. Durante un'operazione chirurgica con anestesia totale, soprattutto quando quest'ultima coinvolge il torace, la respirazione risulta compromessa.

All'interno del reparto di terapia intensiva alcuni pazienti potrebbero avere una funzionalità respiratoria parzialmente o completamente danneggiata. Per ognuno di questi casi, esiste un ventilatore adatto, che ristabilisce una respirazione completa.

Il ventilatore è quindi una macchina in grado di insufflare nei polmoni una determinata miscela di gas e di consentirne l'espirazione. Tutto questo rispettando una frequenza nota e un appropriato regime di pressioni. Nel trattamento dell'insufficienza respiratoria, il ventilatore polmonare ha sostituito il polmone d'acciaio. Quest'ultimo è un apparecchio (utilizzato oggi in caso di trattamenti a lungo termine, come a seguito di lesioni neuromuscolari) in grado di generare una pressione subatmosferica all'interno di un cilindro, in cui viene posto il corpo del paziente. In tale guisa esso produce una depressione, a cui consegue l'espansione della gabbia toracica e la generazione di una differenza di pressione transpolmonare che comporta il flusso d'aria.

Nella respirazione normale, quando il flusso alveolare è nullo, c'è un bilanciamento delle forze elastiche data dalla reazione verso l'interno del parenchima polmonare e dalla reazione verso l'esterno della gabbia toracica. Di conseguenza la pleura ha un volume forzatamente maggiore di quello che avrebbe normalmente. Ciò comporta una pressione intrapleurica negativa rispetto a quella atmosferica.

La depressione intrapleurica si trasmette agli alveoli per delle ragioni fondamentali. La differenza di pressione tra alveoli e ambiente, infatti, permette di superare le resistenze al flusso dei gas nelle vie aeree, distendere i bronchioli e consentire l'entrata di aria nelle unità terminali. Successivamente, il diaframma e i muscoli intercostali si contraggono, provocando:

- diminuzione di pressione nel liquido pleurico;
- decremento della pressione alveolare, che diventa negativa rispetto a quella atmosferica.

Inoltre, il gradiente pressorio tende ad annullarsi, cosa che porta l'aria esterna ad entrare nei polmoni fino agli alveoli e ripristina una situazione isobara tra esterno e interno. La fase inspiratoria è attiva, quindi la pressione alveolare è minore di quella atmosferica, mentre la fase espiratoria è passiva e la pressione alveolare è maggiore di quella atmosferica.



Figura 2: Il sistema respiratorio

2.2 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.

(Pressione parziale di un gas atmosferico = pressione totale atmosferica · % del gas nell'atmosfera)

$$pressione\ parziale\ del\ gas = p_{tot} (atm) \cdot \% \text{ gas in atm}$$

Nell'aria secca alla pressione atmosferica di 760 mmHg a livello del mare, il 78% della pressione totale è dovuto a N₂ (azoto), il 21% a O₂ (ossigeno), lo 0,033% a CO₂ (anidride carbonica) e si ha conseguentemente una pressione parziale di 593 mmHg per N₂, 160 mmHg per O₂ e 0,25 mmHg per la CO₂.

Le pressioni parziali dei gas nell'aria variano leggermente in relazione alla quantità di vapore acqueo presente, perché la presenza di quest'ultimo 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 N₂, 150 mmHg per O₂ e 0,235 mmHg per la CO₂.

Fatte le precedenti premesse, il concetto alla base della respirazione è il seguente:

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.

La seguente legge (legge di Boyle del 1600) racchiude in sé il concetto che segue: se il volume si dimezza, la pressione raddoppia e viceversa. In altre parole, le due grandezze sono inversamente proporzionali.

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 = costante$$

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. Viceversa, quando la cavità toracica diminuisce di volume la pressione aumenta e l'aria esce dai polmoni. Tale movimento viene detto flusso di massa.

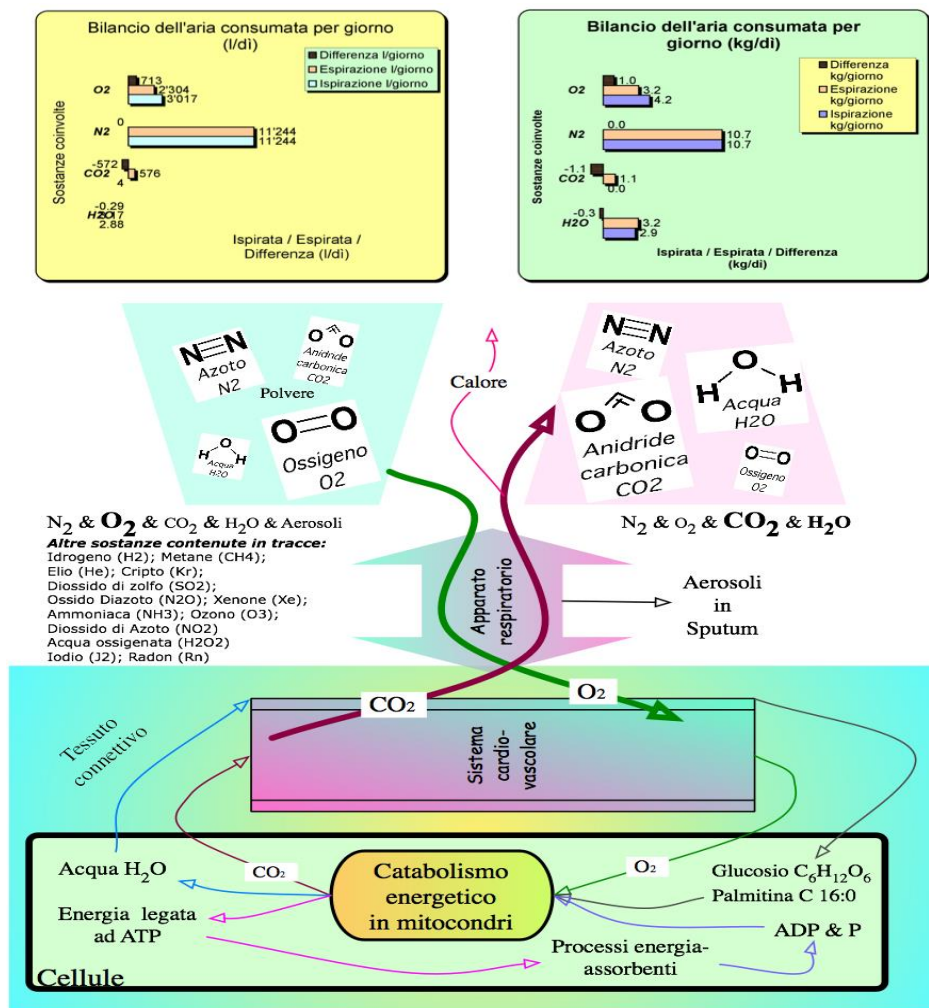


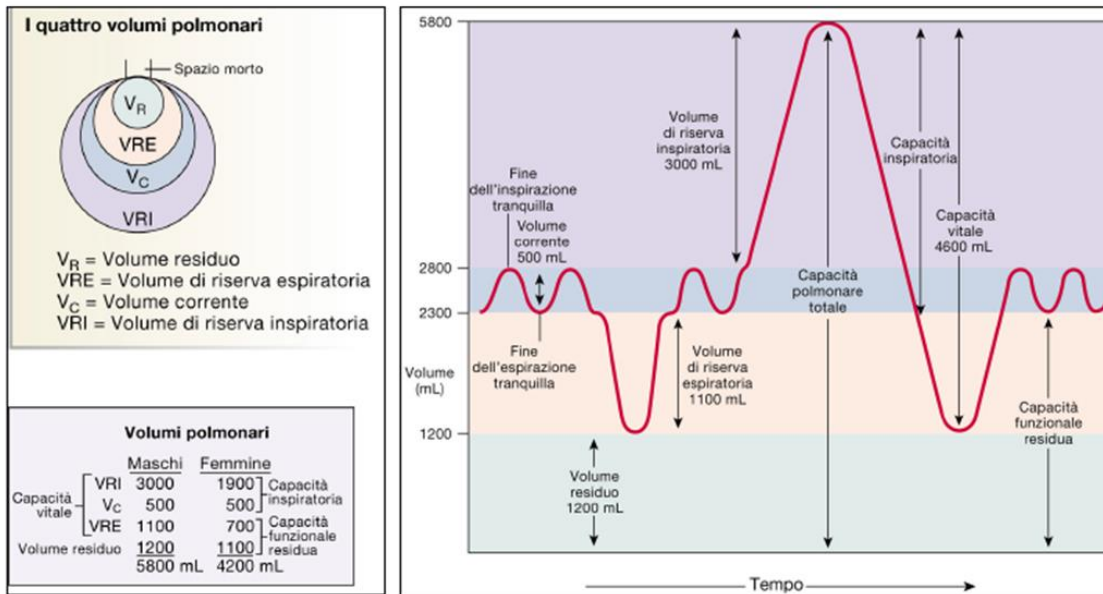
Figura 3: I flussi d'aria e la sua composizione

2.3 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:

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) Volume residuo (VR): 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.

Volumi respiratori



● Tabella semplificativa dei principali parametri respiratori ●

Figura 4

La somma di due o più volumi polmonari è detta capacità. Anche quest'ultima è suddivisa in quattro tipologie:

- 1) 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;
- 2) La capacità polmonare totale (CPT): è la somma di capacità vitale e volume residuo;
- 3) La capacità inspiratoria (CI): è la somma di volume corrente e volume di riserva inspiratoria;
- 4) La capacità funzionale residua (CFR): è la somma di volume di riserva espiratoria e volume residuo.

È importante che un ventilatore dia la possibilità di monitorare questi otto parametri, in quanto essi sono alla base del giusto funzionamento del macchinario.

2.4 L'AZIONE DELL'AGENTE SURFACTANTE

All'interno degli alveoli esiste una tensione superficiale che si sviluppa perché le 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 d'acqua. Per questo si sviluppa una forte tensione superficiale aria-acqua e gli alveoli, al fine di ridurre la superficie di 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 dalla forte tensione superficiale, essi potrebbero diventare un unico alveolo con scarsa funzione di scambio. A tale scopo viene prodotto, dagli 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.

2.5 COMPLIANCE, ELASTANZA E RESISTENZA POLMONARE

Altri tre parametri fondamentali per comprendere a fondo come deve essere il giusto funzionamento di un ventilatore per una respirazione ottimale sono: la compliance, l'elastanza e la 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.

Opposta ad essa è l'elastanza, cioè la capacità di tornare, in seguito ad un ritorno elastico, allo stato di riposo durante l'espiazione. Questi due parametri sono essenziali per una buona ventilazione; negli anziani infatti queste due proprietà si riducono: se i polmoni mancano di compliance allora si dilatano facilmente opponendo poca resistenza al flusso d'aria; mentre, 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'espiazione diviene faticosa. 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 (η), il raggio dei condotti del sistema (r).

La portata è direttamente proporzionale al gradiente di pressione e al quadrato della superficie, ed è inversamente proporzionale alla lunghezza del condotto e alla viscosità del fluido.

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 sostenuti da tessuto cartilagineo in modo che il diametro della loro sezione non subisca modifiche durante la ventilazione e la resistenza offerta rimanga costante.

Parametri		età pediatrica	adulti
Frequenza respiratoria	(per minuto)	30-40	13-16
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 ₂ O)	2,6-4,9	100
	(ml/cm H ₂ O/FRC)	0,04-0,06	0,04-0,07
"Compliance polmonare"	(ml/cm H ₂ O)	4,8-6,2	170-200
	(ml/cm H ₂ O/FRC)	0,04-0,074	0,04-0,07
Perdita respiratoria d'acqua	(ml/24 h)	45-55	300

Figura 5: Parametri

I VENTILATORI POLMONARI

3.1 CARATTERISTICHE GENERALI

Grazie allo studio di alcuni parametri significativi, il ventilatore polmonare riesce a compiere un pompaggio intelligente e, quindi, efficiente.

I principali parametri in gioco, molti dei quali precedentemente enunciati, sono:

- Volume [*litri*]: è la quantità di aria che entra o esce dai polmoni.
- Flusso [*litri al secondo*]: è la velocità che l'aria assume durante le fasi respiratorie.
- Pressione [*cmH₂O*]: è la forza motrice della movimentazione dell'aria.

Esistono altre due grandezze molto importanti, che sono derivate dai parametri principali:

- Resistenza: è la pervietà che l'aria incontra lungo il suo cammino.
- Compliance: è la cedevolezza delle pareti biologiche che l'aria incontra.



Figura 6

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 posto dalle vie aeree; definisce il valore di pressione che deve essere praticata per determinare un flusso nelle vie aeree

$$R = \frac{\Delta p}{\Delta F}$$

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

$$C = \frac{\Delta V}{\Delta p}$$

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

$$E = \frac{\Delta p}{\Delta V}$$

L'elastanza e la compliance sono relazionate da un rapporto inverso

$$E = \frac{1}{C}$$

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

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

la pressione, la quale è la forza motrice dei flussi d'aria, viene esercitata dal solo respiratore ($p_{\text{respiratore}}$) nelle forme di sola ventilazione controllata e dalla muscolatura respiratoria del paziente (p_{paziente}) nelle forme di sola ventilazione spontanea, oppure attraverso entrambe, nelle ventilazioni parziali.

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

dove V =volume, E =elastanza, F =frequenza respiratoria e R =resistenza.

Da queste definizioni si deduce che, quanto più elevati sono i valori di elastanza (cioè tanto più bassa è la "Compliance") e 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. 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.

Gli obiettivi di un ventilatore polmonare, quindi, possono essere riassunti come segue:

- insufflare nei polmoni quantità controllate di aria o miscele gassose.
- arrestare l'insufflazione.
- lasciare espirare i gas insufflati
- ripetere queste operazioni continuativamente e anche per lunghi periodi.

3.2 ELEMENTI PRINCIPALI-SCHEMA A BLOCCHI

Dopo aver considerato quali sono gli scopi principali che un ventilatore ha l'obiettivo di raggiungere, possiamo passare allo studio di esso analizzando la sua struttura interna, semplice ma efficiente.

Il ventilatore polmonare può essere schematizzato considerando due unità fondamentali:

- l'unità pneumatica, dove circolano i gas che, attraverso i tubi, arrivano ai polmoni del paziente;
- l'unità elettronica, che compie operazioni di logica in base alla scelta del modello, misura le grandezze oggetto del modello prescelto al fine di realizzare le condizioni impostate e fornisce gli allarmi all'esterno.

Un terzo blocco è costituito dall'alimentazione, che può essere attuata tramite motore elettrico o aria compressa.

1. Andiamo ora a vedere nel dettaglio gli elementi costituenti di un ventilatore polmonare:

Generatore di pressione positiva: genera una differenza di pressione tra l'ambiente esterno e gli alveoli, determinando la quantità di flusso che deve essere insufflato.

2. Sistemi di dosaggio del volume corrente.
3. Dispositivi di temporizzazione del ciclo respiratorio: aprendo e chiudendo opportunamente le valvole, si può passare dalla fase inspiratoria a quella espiratoria.
4. Circuito paziente: comprende tutto ciò che connette il ventilatore con il sistema respiratorio del paziente e che convogliano la miscela di gas.
5. Elementi resistivi: tutti i condotti interposti tra generatore di pressione positiva e sistema respiratorio del paziente che producono una resistenza all'avanzamento del gas.
6. Elementi capacitivi: elementi elastici che determinano una compliance aggiuntiva. Rappresentano lo spazio morto del sistema di ventilazione.

I recenti sviluppi dei ventilatori polmonari rivolgono l'attenzione a un'attivazione del ventilatore sempre più dipendente da un trigger dettato dal paziente. Ad esempio, considerando un trigger pressorio, il ventilatore si attiverà solo quando *sentirà* una pressione creata dal paziente, che ne indica la *volontà* di inspirare.

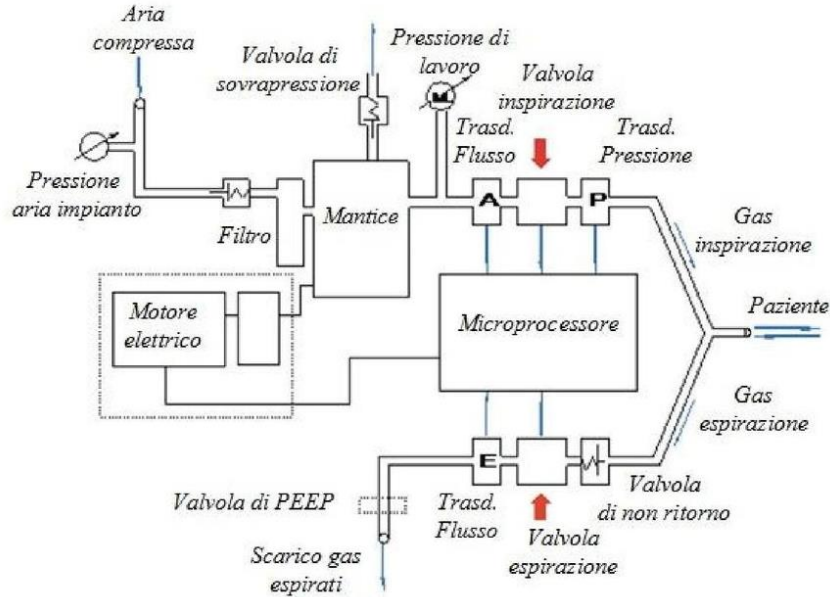


Figura 7: Schema a blocchi

3.3 MODALITÀ DI VENTILAZIONE

Dopo aver compreso come è strutturato internamente un ventilatore polmonare, è interessante capire le diverse tipologie di meccanica respiratoria esistenti.

Le due modalità di ventilazione principali sono:

- ventilazione a pressione negativa
- ventilazione a pressione positiva

3.3.1 VENTILAZIONE 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

3.3.2 VENTILAZIONE A PRESSIONE POSITIVA

La ventilazione meccanica a pressione positiva rappresenta la moderna metodica di supporto alla respirazione spontanea.

Esso è un dispositivo elettronico regolabile che pompa aria nelle vie respiratorie del paziente a intervalli regolari (12-25 pompate al minuto), mimando a tutti gli effetti gli atti respiratori di inspirazione.

Gli attuali ventilatori meccanici a pressione positiva sono strumenti così tecnologicamente avanzati, che sono in grado di:

- registrare la pressione interna alle vie respiratorie;
- calcolare, in base alla pressione presente all'interno delle vie respiratorie, l'esatto volume di aria da pompare;
- capire se il paziente presenta una minima capacità di respiro spontaneo (in questo frangente, fungerebbe da aiuto alla respirazione) o se, invece, il paziente è completamente incapace di respirare spontaneamente (in questa circostanza, agirebbe come vero e proprio sostituto della respirazione spontanea).
- avvertire se l'azione di pompaggio è inefficace.

Il pompaggio dell'aria nelle vie respiratorie può avvenire in tre modi distinti:

1. attraverso una maschera apposita, applicabile sul volto del malato
2. attraverso un tubo da introdurre in trachea per bocca (tubo endotracheale)
3. apertura sul collo (tubo per tracheotomia).

La scelta di ricorrere alla maschera o al tubo in trachea dipende dalle condizioni del paziente: se quest'ultimo possiede le vie respiratorie completamente libere, sussistono le circostanze per far uso della maschera (in quanto non c'è alcun impedimento al passaggio dell'aria); se invece il malato presenta una qualche ostruzione lungo le prime vie respiratorie, è necessario inserire un tubo in trachea, per avere la certezza di bypassare l'ostruzione.

Chiaramente, l'utilizzo della maschera rende la ventilazione meccanica a pressione positiva una metodica non invasiva, mentre l'applicazione di un tubo in trachea la rende una metodica invasiva.

Infine, l'ultima annotazione riguarda l'espiazione dell'anidride carbonica: l'espulsione dell'aria impoverita dell'ossigeno ha luogo al termine della fase di pompaggio, per effetto dell'elasticità di polmoni e muscoli respiratori.



Figura 8

Nel seguente schema riassuntivo è possibile cogliere le caratteristiche principali che permettono il giusto confronto tra le due modalità:

TIPO DI VENTILAZIONE	STORIA	VANTAGGI	SVANTAGGI
A PRESSIONE NEGATIVA	Ideata attorno agli anni '20 del 900.	Si rivelò molto utile nel trattamento di pazienti con poliomielite.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Il paziente è confinato all'interno di uno strumento a forma di cisterna. 2. Il meccanismo di funzionamento del ventilatore meccanico fa sì che ci sia una riduzione dell'afflusso di sangue agli arti inferiori.
A PRESSIONE POSITIVA	Progettata attorno agli anni '50 del 900. Da allora è diventata la più utilizzata metodica di supporto alla ventilazione spontanea.	Utile durante le operazioni di chirurgia maggiore, quando il paziente è sottoposto ad anestesia generale e necessita di un aiuto alla respirazione.	Se il supporto alla respirazione spontanea deve durare a lungo, è necessario ricorrere alla tracheotomia e all'inserimento di un tubo in trachea attraverso il collo (tecnica molto invasiva).

3.4 TIPOLOGIE DI VENTILATORI

In particolare, i 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 ventilatori 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.

Con il seguente schema sono state raccolte le principali caratteristiche riguardanti i ventilatori per terapia intensiva e quelli di tipo domiciliari, che sono le due tipologie più comuni:

VENTILATORI PER TERAPIA INTENSIVA	VENTILATORI DOMICILIARI
<ul style="list-style-type: none"> • fonte di energia pneumatica • Funzionano con gas compressi ad alta pressione (4 BAR) • Garantiscono stabilità di FiO₂ • Garantiscono erogazione di volume anche in caso di impedenza elevata (paziente obeso) 	<ul style="list-style-type: none"> • Fonte di energia elettromeccanica • A pistone o pompa alternata: <ol style="list-style-type: none"> 1. raccoglie i gas anche a bassa pressione, li miscela e li spinge nel circuito esterno durante la fase inspiratoria . 2. Meno efficaci nel compensare le perdite • A turbina: aspira i gas, li comprime e li invia al paziente tramite una valvola inspiratoria unidirezionale. Sono in grado di controllare la pressione mediante erogazione di flusso e di volume

3.4.1 VENTILATORI DOMICILIARI

I miglioramenti tecnologici adottati nelle più recenti protesi ventilatorie hanno determinato un allungamento medio della vita nei pazienti che necessitano di ventilazione meccanica a lungo termine, influenzandone la mortalità che rimane, per lo più, legata alle fasi di acuzie.

La diffusione di questi macchinari innovativi riconosce motivazioni di ordine diverso:

- la necessità di ridurre i costi assistenziali e migliorare la qualità di vita dei pazienti, accelerando i tempi della dimissione da strutture di terapia intensiva e semintensiva;
- la possibilità di evitare le complicanze della ventilazione invasiva iniziata in condizioni di emergenza, adottando tecniche di ventilazione assistita non invasiva, utilizzabili sia nell'insufficienza respiratoria acuta (IRA) che in quella cronica (IRC);
- l'esistenza di programmi territoriali/ospedalieri per l'assistenza domiciliare di pazienti con ventilazione meccanica invasiva;
- la longevità della maggioranza dei pazienti in ventilazione meccanica domiciliare.

La ventilazione meccanica ha come principali obiettivi l'ottimizzazione dei volumi polmonari, il miglioramento dello scambio gassoso e, quindi, delle alterazioni emogasanalitiche, la riduzione del lavoro respiratorio, il miglioramento della qualità della vita, la riduzione della morbilità e della mortalità.

La VMD mira, inoltre, a ridurre l'ospedalizzazione, ottimizzando la gestione del paziente pneumopatico in insufficienza respiratoria cronica (IRC).

L'indicazione all'applicazione del supporto ventilatorio risponde a due esigenze terapeutiche: evenienze in cui il supporto ventilatorio si rende indispensabile "quoad vitam", per la maggior parte delle ore del giorno; evenienze in cui il

supporto ventilatorio è senza dubbio utile, ma un'eventuale interruzione del trattamento non determina un rischio immediato per la vita del paziente.

L'efficacia della ventiloterapia è variabile a seconda del quadro morboso che è alla base dell'IRC. La compliance dei pazienti ventilati a lungo termine varia a seconda del tipo di patologia, del settaggio del ventilatore, dell'interfaccia e del "follow up". La VMD è stata valutata nell'IRC secondaria a condizioni morbose diverse, dimostrandosi notevolmente efficace nel trattamento a lungo termine di alcune di esse.

Nei disturbi respiratori che insorgono nel sonno la correzione delle turbe degli scambi gassosi, ottenuta mediante ventilazione meccanica, può avere diverse positive ripercussioni sul paziente durante il periodo di veglia, la più importante delle quali è probabilmente rappresentata dal miglioramento della PaO₂ e della PaCO₂, attribuibili almeno in parte ad un miglioramento della chemosensibilità recettoriale centrale. Inoltre, sono documentati effetti favorevoli sulla qualità della vita dei pazienti e sulla riduzione del rischio cardiovascolare.

Nelle malattie polmonari ostruttive e restrittive i benefici potenziali della ventilazione meccanica a lungo termine differiscono notevolmente in termini di risultati sul piano clinico, fisiopatologico e di prognosi.

Nei pazienti affetti da patologie restrittive, il miglioramento dell'ipercapnia e dell'ipossiemia, indotto dalla ventilazione meccanica, è generalmente rapido e tale da evitare in molti pazienti il ricorso alla somministrazione di ossigenoterapia a lungo termine.

Nei pazienti affetti da patologie ostruttive, fondamentalmente IRC secondarie a BPCO (broncopneumopatia cronica ostruttiva) di grado severo, la VMD ha un ruolo fondamentale nel ridurre l'ipercapnia, il carico di lavoro dei muscoli respiratori e nel trattare i disturbi del sonno.

Questi ultimi, in questi pazienti, frequentemente sono rilevabili con quadri che vanno dall'ipoventilazione all'apnea ostruttiva, responsabili spesso, di significative desaturazioni ossiemoglobiniche.

La ventilazione meccanica notturna è in grado di prevenire tali eventi, migliorando così la qualità del sonno e la qualità della vita.

L'impegno di risorse per la VMD da parte del Sistema Sanitario Nazionale è sempre più rilevante, per cui diventa indispensabile definire quali condizioni morbose possano realmente beneficiarne. Studi epidemiologici hanno evidenziato una notevole disomogeneità regionale nel numero, nel criterio di selezione e nel "followup" dei pazienti trattati, una volta impostata la ventilazione.

Gli scopi della ventilazione meccanica domiciliare a lungo termine (VMDLT) sono:

- l'aumento della sopravvivenza
- il miglioramento della qualità della vita
- la diminuzione delle morbidità (riacutizzazioni, episodi di scompenso, numero di giorni di degenza in ospedale e numero di giorni di degenza in terapia intensiva)
- il miglioramento delle condizioni cardio-respiratorie e neuropsichiche
- la riduzione dei costi/anno dell'"handicap respiratorio".

La VMDLT si definisce:

- non invasiva, se l'interfaccia paziente-ventilatore è la maschera nasale, le olive nasali, il boccaglio o la maschera facciale
- invasiva, se effettuata per via tracheostomica

VENTILATORI POLMONARE DOMICILIARE PIÙ COMUNI:

<p>CPAP /AUTOCPAP</p> <p>Continuous Positive Airway Pressure (CPAP) Machine</p>  <p>CPAP machine with nasal pillow mask, ballcap-style straps</p> <p>Full face mask, side straps</p> <p>Nasal pillow mask, ballcap-style straps</p> <p>Nasal pillow mask, side straps</p> <p><i>Figura 9</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Si utilizzano per il trattamento dei disturbi del sonno ; • La CPAP fornisce un predeterminato livello di pressione positiva uguale in entrambe le fasi del respiro che impedisce il collasso delle vie aeree • L'auto CPAP invece eroga una pressione positiva in entrambe le fasi del respiro a secondo le esigenze del paziente in quel determinato momento (si imposta una forchetta di pressione)
<p>BI-LEVEL</p>  <p><i>Figura 10</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Macchina di ventilazione non invasiva che offre due livelli di pressione: IPAP (pressione positiva in fase inspiratoria) e EPAP (pressione positiva in fase espiratoria). • Non consentono il monitoraggio dei parametri ventilatori • Si utilizzano per il trattamento dei disturbi del sonno quando la CPAP non corregge le apnee

In commercio tra i migliori ventilatori polmonari per uso domestico c'è il Falco 101, il quale è un ventilatore polmonare equipaggiato da un innovativo sistema pneumatico che prevede una turbina con raffreddamento differenziato la quale garantisce una maggiore durata di funzionamento nel tempo ed una migliore precisione nella erogazione e concentrazione dell'ossigeno.

Il Falco 101 può essere impiegato su pazienti Adulti e Bambini ed è stato appunto concepito espressamente per l'utilizzo a domicilio e per il trasporto.

3.4.2 VENTILATORI OSPEDALIERI

I ventilatori polmonari che ritroviamo nelle aziende ospedaliere , a differenza di quelli domiciliari che sono ventilatori di fisioterapia respiratoria, possono essere di tre tipologie differenti:

1. Emergenza e trasporto del paziente
2. Terapia intensiva sia per adulti che per neonati
3. Anestesia

1) VENTILATORI POLMONARI TRASPORTABILI E D'EMERGENZA

È fondamentale che ambulanze e veicoli di soccorso siano dotati di sistemi per la ventilazione meccanica automatica, al fine di garantire migliori esiti e rispondere alle esigenze di criticità vitale dei pazienti. La tecnologia ha fatto diversi passi avanti negli ultimi anni permettendo di avere a disposizione, tra le altre cose, anche ventilatori polmonari maneggevoli e trasportabili sul luogo dell'evento, come il ventilatore polmonare a volume controllato e il ventilatore con modalità assistita e ventilazione a pressione.

La prima distinzione da fare riguarda l'autonomia dei ventilatori da trasporto: ne esistono sia con bombola portatile annessa che senza bombola portatile e, quindi, vincolati alla fonte di ossigeno dell'ambulanza.

Nel primo caso l'unità di ventilazione dispone di una certa autonomia data dalla bombola portatile collegata. Di norma questo permette di trasportare il macchinario nei pressi del paziente in strada, domicilio o in spazi angusti ed è la soluzione ideale per le ambulanze di emergenza.

Nel secondo caso il ventilatore è fisso in ambulanza e si alimenta con le bombole più capienti del veicolo, garantendo più autonomia e quindi si adatta maggiormente ai trasporti secondari di pazienti intubati. Anche i ventilatori portatili si possono collegare nella maggior parte dei casi alla fonte di ossigeno dell'ambulanza offrendo i vantaggi di entrambe le tipologie.

Prima di procedere è necessario comprendere come mai è importante utilizzare il ventilatore polmonare in urgenza.

Diversi studi dimostrano che durante un soccorso di un paziente che deve essere ventilato meccanicamente (soprattutto tramite tubo endotracheale o maschera laringea) c'è la tendenza a iperventilare con conseguente ipocapnia, che causa vasocostrizione a livello cerebrale riducendone la perfusione e alterando gli equilibri acido base (anche l'iper-ossigenazione causa vasocostrizione cerebrale e coronarica peggiorando eventuali esiti in pazienti con IMA o con insulti cerebrali).

Emerge dunque la necessità di ventilare regolarmente e meccanicamente i pazienti per evitare complicanze, impostando i valori corretti di volume/minuto (o di pressione) adatti al tipo di paziente, togliendo la discrezionalità che porta agli errori della ventilazione manuale.

Oltre all'aspetto fisiopatologico bisogna tenere anche conto del vantaggio di liberare un operatore dall'onere della ventilazione, avendo a disposizione due mani in più per assicurare il tubo tracheale oppure per svolgere altre manovre.

In assenza di emogasanalisi i parametri standard da impostare mirano a mantenere un valore di EtCO₂ (anidride carbonica di fine espirazione) di circa 35 mmHg (eucapnia).



Figura 11: Ventilatore per trasporti urgenti

➤ Ventilatore polmonare a volume controllato:

Questo tipo di impostazioni vengono offerte dal tipo più semplice di ventilatore polmonare da trasporto, il ventilatore a volume controllato, che eroga un'unica modalità, ovvero la IPPV (intermittent positive pressure ventilation).

Questo apparecchio di solito dispone di una sezione per l'inalazione dell'ossigeno (il normale ugello che distribuisce i litri al minuto desiderati di O₂ attraverso la regolazione di un flussimetro) e di un pannello di comandi per impostare la ventilazione meccanica.

Questi comandi sono il volume/minuto, la frequenza e la FiO₂ (100% no air mix, oppure 50% air mix).

Nei modelli più evoluti esiste la possibilità di erogare la CPAP non invasiva con un modulo dedicato.



Figura 12: Ventilatore polmonare a volume controllato

➤ Ventilatore con modalità assistita e ventilazione a pressione:

Un altro tipo di ventilatore portatile è quello che permette di erogare, oltre alla IPPV, anche le modalità di ventilazione assistita e a pressione.

In questo caso il paziente può anche respirare parzialmente o totalmente da solo e la macchina lo assiste raggiungendo il volume o la pressione desiderate.

Nel caso si volesse utilizzare la modalità IPPV (a volume controllato intermittente), le impostazioni da settare rimangono le stesse, mentre cambiano se si volesse impostare una ventilazione a pressione.

In questo caso si regolano i valori di pressione che la macchina deve erogare nei polmoni del paziente ad ogni atto respiratorio, indipendentemente dal volume necessario per raggiungerlo.

Si parte con una pressione di supporto di circa 8-10 cm/H₂O e una PEEP di 5 cm H₂O e si incrementano i valori fino ad avere un volume/minuto accettabile per il peso del paziente.

Questo tipo di ventilatore può erogare anche una ventilazione CPAP o Bi-Level (BiPap) non invasiva, in caso di pazienti che possono beneficiare di questo tipo di ventilazione senza il ricorso all'intubazione tracheale (edema polmonare cardiogeno o BPCO riacutizzata, ecc).

L'autonomia è riportata sullo schermo del dispositivo e dipende dal FiO₂ impostata e dalla carica della batteria.



Figura 13: Ventilatore polmonare a pressione e con modalità assistita

2) VENTILATORI POLMONARI PER TERAPIA INTENSIVA

I ventilatori polmonari che ritroviamo in terapia intensiva assicurano che i pazienti, giovani e anziani, siano assistiti in modo sicuro e affidabile. Sono infatti progettati e attrezzati per funzionare autonomamente, in modo facile da usare e versatile. Utilizzando solitamente la più moderna tecnologia a turbina, producono autonomamente l'aria per la ventilazione del paziente e questo rende i respiratori ideali per il trasporto all'interno della clinica. Grazie alla staffa di montaggio multifunzionale, possono essere facilmente e in tutta sicurezza fissati ai letti dei pazienti e ai carrelli di trasporto. Nell'unità di terapia intensiva stessa, possono essere integrati nell'intera infrastruttura di cura del paziente tramite una docking station.

➤ Terapia intensiva per adulti

Uno dei migliori ventilatori polmonari che possiamo ritrovare nei reparti di terapia intensiva per adulti è il EVE-IN; quest'ultimo infatti riesce sempre a garantire una ventilazione ottimale per i pazienti. Funziona utilizzando la tecnologia delle turbine all'avanguardia, quindi è indipendente dalla generazione di aria esterna.

- Nessun dispositivo aggiuntivo è richiesto per il trasporto intra-ospedaliero.
- Una speciale docking station trasforma EVE IN, in un respiratore versatile per terapia intensiva nell'unità di terapia intensiva.

La ventilazione meccanica ottimale naturalmente varia da paziente a paziente ma EVE IN è pronto per questa sfida:

- opera in modalità sia a pressione che a volume;
- è possibile aggiungere facilmente opzioni aggiuntive come PRVC, PSV e compensazione del tubo;
- è possibile attivare ulteriori opzioni con la semplice pressione di un pulsante, inclusa una serie di diverse manovre di respirazione;
- il display ad alta risoluzione di EVE IN offre in ogni momento una panoramica delle condizioni del paziente e consente di eseguire un'ampia varietà di valutazioni. Puoi farlo in modo semplice e conveniente utilizzando il touchscreen e una manopola.

In altre parole, EVE IN non solo garantisce una ventilazione ottimale, ma supporta anche la diagnostica e monitora in modo affidabile i pazienti.

Diagnostica polmonare precisa e completa grazie alla misurazione espiratoria della CO₂ e ai loop.

Sempre la vista ottimale: tre display di curve liberamente configurabili. Situazione attuale e tendenze sempre disponibili: visualizzazione di tutti i parametri di ventilazione comuni e visualizzazione delle tendenze.

Per di più, non appena il paziente e il ventilatore arrivano nell'unità di terapia intensiva, EVE IN si trasforma nel respiratore per terapia intensiva perfetto, in quanto esso è collegato direttamente all'alimentazione tramite una docking station e presenta tutti i componenti importanti per una terapia intensiva ottimale.

Docking station con tutti gli extra: alimentatore, portabombola, sistema di gestione dati paziente e chiamata infermiere. È possibile inoltre collegare monitor esterni aggiuntivi. La ventilazione paziente risulta affidabile e sicura durante il trasporto intra-ospedaliero. Facilità di montaggio: staffa di montaggio multifunzionale, compatibile con i letti dei pazienti, carrelli di trasporto e guide standard. Il sistema di tubi, i sensori, ecc. Possono essere trasferiti dal respiratore di emergenza EVE TR a EVE IN. Dotato delle ultime tecnologie e progettato per un uso flessibile, EVE IN è un respiratore facile da usare, potente e assolutamente affidabile sia per i trasporti intra-clinici che per le unità di terapia intensiva.



Figura 14: Ventilatore polmonare Eve-In

Ulteriori informazioni sulle caratteristiche e funzionalità più importanti :

GRUPPO DI PAZIENTI	Adulti e non solo, possibilità di uso in pediatria
ALIMENTAZIONE ELETTRICA	<ul style="list-style-type: none"> • Alimentazione di rete • Batteria (circa 6 ore)
FORNITURA DI GAS	Turbina integrata
MODALITÀ OPERATIVA	Ventilazione invasiva e non invasiva
MODULI DI VENTILAZIONE	<p>Tutte le forme di ventilazione convenzionali, controllate a pressione e volume Terapia O₂ ad alto flusso Selezione della forma di ventilazione tramite un menu chiaramente strutturato: semplice e veloce Volume di ventilazione garantito con PRVC opzionale</p>
CENTRALINA	<ul style="list-style-type: none"> • Display: touchscreen a colori da 8,4" • Comandi: pulsanti, touch screen e manopola
ACCESSORI	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemi di tubi paziente • Sensori di flusso e accessori • Nebulizzatore per farmaci • Maschere e accessori • Supporti mobili e staffe di montaggio • Kit di manutenzione • Tubi di collegamento • Sistemi nCPAP EasyFlow • Spacesuit

➤ Terapia intensiva neonatale

Per quanto riguarda invece la terapia intensiva neonatale, uno dei migliori ventilatori polmonari che vengono utilizzati nelle aziende ospedaliere è il Giulia. Il Giulia è un Ventilatore da terapia intensiva per neonati, anche di basso peso alla nascita e prematuri, ciclato a tempo, con trigger di flusso che permette di effettuare le modalità ventilatorie convenzionali, anche con modalità volume garantito ed una lista unica di ventilazioni non invasive: oltre alla modalità nCPAP e nIPPV, il Giulia è infatti l'unico ventilatore neonatale con flusso sincronizzato in grado di effettuare le modalità non invasive nCPAP+backup apnea, nSIMV, e nSIPPV.

Per la sincronizzazione con l'atto spontaneo viene utilizzato un trigger di flusso estremamente sensibile con un livello minimo di 0.05 l/min:

Il passaggio tra le modalità invasive e non invasive è rapido e agevole, infatti avviene sostituendo solo l'interfaccia paziente senza dover sostituire l'intero circuito, riducendo notevolmente i tempi ed i costi per lo svezzamento del paziente.



Figura 15: Ventilatore Giulia, Ginevri

Il Giulia è dotato di display touch-screen a colori da 10,4" su cui è possibile visualizzare tutti i parametri fisiologici utili per la ventilazione, i valori impostati, i limiti e gli allarmi e fino a 3 curve/loop simultanee. Il Giulia inoltre consente l'esportazione di tutti i parametri (Misurati e Impostati) e lo screen-shot del display inserendo semplicemente una pen drive, senza particolari procedure, anche durante la ventilazione.

<p>CARATTERISTICHE</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Modalità di ventilazione invasiva e non invasiva - Sensori di flusso ad alte prestazioni - Due diversi modelli di interfacce paziente per ventilazione non invasiva - Trattamento di pazienti fino a 5 kg di peso - Encoder e impostazioni digitali attraverso touch-screen a colori da 10,4" - Allarmi manuali e automatici - Tendenze grafiche di pressione, flusso, volume e loop - Misure di conformità e resistenza - Segnale acustico di attivazione del trigger - Modalità standby - Esportazione dati
<p>MODALITÀ DI VENTILAZIONE POSSIBILE (INVASIVA E NON)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1)CPAP - NCPAP 2) SIMV - NSIMV 3) IPPV - NIPPV 4)SIPPV - NSIPPV 5) VTV (solo invasivo) 6)HHFNC (solo non invasivo)
<p>SENSORE DI FLUSSO PER LA VENTILAZIONE INVASIVA</p>	<p>Il sensore di flusso per la ventilazione invasiva è un trasduttore di pressione differenziale senza componenti elettrici, che garantisce un tempo di risposta inferiore a 80 ms. È autoclavabile e riutilizzabile.</p>

<p>SENSORI DI FLUSSO E KIT PER VENTILAZIONE NON INVASIVA</p>	<p>La ventilazione non invasiva può essere eseguita con due diversi set monouso:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sync Flow Cannula, la nuova interfaccia, la quale è la soluzione più comoda per il paziente e la più facile da attuare per gli infermieri. -Smart-Flow Kit NIV, l'interfaccia classica, con nasale <p>Entrambi questi dispositivi hanno un sensore di flusso, un trasduttore di pressione differenziale semplice e leggero che garantisce un tempo di risposta inferiore a 80 ms e punte di misure differenti.</p>
<p>CANNULA NASALE PER HHFNC</p>	<p>La "cannula nasale ad alto flusso" monouso per alto flusso la terapia con gas riscaldato e umidificato è disponibile in tre diverse dimensioni.</p>
<p>SISTEMA D'ALLARME</p>	<p>Il ventilatore GIULIA ha tutti gli allarmi per una corretta e sicura gestione delle cure respiratorie invasive e non invasive.</p> <p>Gli allarmi sono sia visivi che acustici e sono colorati per priorità.</p>
<p>UMIDIFICATORE</p>	<p>Il ventilatore GIULIA è compatibile con tutti gli apparecchi commerciali umidificatori, tuttavia GINEVRI consiglia vivamente di utilizzare con il nuovo umidificatore WETTY, che garantisce un alto livello di umidità nel circuito respiratorio con un livello molto basso quantità di umidità.</p>
<p>FLUSSO O₂</p>	<p>Il flusso di O₂ fornisce una concentrazione di ossigeno preimpostata per a tempo predeterminato.</p>

VENTILATORI OPEN SOURCE

4.1 INTRODUZIONE

Un ventilatore Open Source è un ventilatore realizzato per risolvere situazioni di emergenza, utilizzando un design con licenza gratuita (“open source”) e, idealmente, componenti liberamente disponibili. La particolarità, infatti, di questi progetti del tutto innovativi, è che essi possono essere costruiti a partire da prodotti a basso costo già presenti nel mercato oppure, in caso fossero di difficile acquisizione, possono essere direttamente realizzati attraverso l’uso di stampanti 3D.

Altra caratteristica fondamentale è la politica di utilizzo, sia del software che dell’hardware del ventilatore Open Source, in quanto consente teoricamente la possibilità di revisionare e di correggere i bug e i guasti nei ventilatori.

All’inizio del 2020 durante la quarantena dovuta al COVID-19 è aumentato esponenzialmente l’uso di questa tipologia di ricerca, in quanto la pandemia avrebbe motivato lo sviluppo di quest’ultima e migliorato in modo significativo i ventilatori open-source con l’obiettivo di raggiungere determinati standard per sostenere le cure mediche che la popolazione necessitava.

Come si può notare dal grafico a torta nella Figura 16 a pagina seguente, il numero di ricoverati, sia in terapia intensiva che non, a Marzo 2020 corrispondeva a circa un 51,6% (7,6% + 44,0%). Questi numeri sono necessari per comprendere a fondo l’urgenza che si era creata, nel giro di pochissime settimane, nel trovare nuovi ventilatori polmonari, realizzabili con finanziamenti minimi e di facile prodizione/riproduzione

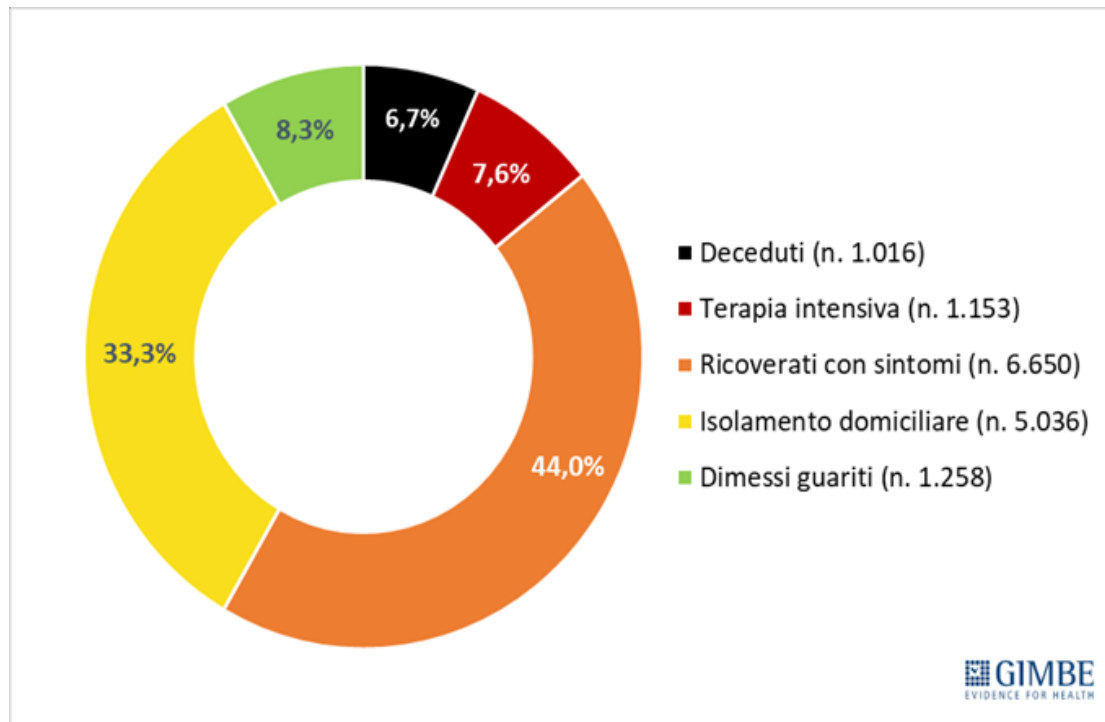


Figura 16: Grafico a torta malati di coronavirus, marzo 2020

Con la pandemia è sorta infatti una nuova sfida: non si trattava più di fabbricare un ventilatore, ma di progettare un prototipo che avrebbe dovuto risolvere un problema su scala globale, un prodotto su larga scala ma con materiali reperibili anche in piccole città e villaggi.

Numerosi progetti hanno iniziato ad emergere in questo settore, molti dei quali con un approccio ingegneristico, molti altri a seguito di rigide convalide con le normative. Lo scopo di questa seconda parte sarà infatti quello di analizzare i vari progetti Open Source attualmente creati e di studiarne il funzionamento, così da poterne poi ricercare il migliore o i migliori.

4.2 SPECIFICHE CHIAVE E MATERIALI

Dei pazienti con infezione da COVID-19 tra lo 0,3% e lo 0,6% sviluppa una sindrome da “distress” respiratorio acuto (ARDS) abbastanza grave da richiedere un ventilatore meccanico. Questi pazienti moriranno se non è disponibile un ventilatore per trattarli. Man mano che la pandemia aumenta in varie località del mondo e quando le restrizioni vengono alleggerite, è probabile che il numero di pazienti che necessitano di un ventilatore superi l’offerta di ventilatori tradizionali a funzionalità complete. Pertanto, molte migliaia o milioni di vite possono essere salvate da un semplice ventilatore che può essere costruito rapidamente con parti pronte all’uso o fabbricate facilmente.

Un ventilatore di risposta alle emergenze deve essere semplice, economico e facile da montare. Allo stesso tempo, deve fornire almeno le funzionalità necessarie per trattare la maggior parte dei pazienti con COVID-19. Ciò include almeno la capacità di misurare con precisione il flusso d’aria e il volume mentre si regola la pressione massima. I ventilatori di emergenza che non sono in grado di regolare sia il flusso che la pressione sono inadeguati per soddisfare la necessità.

La figura seguente mostra perché è fondamentale regolare sia il flusso che la pressione durante il trattamento di pazienti COVID-19.

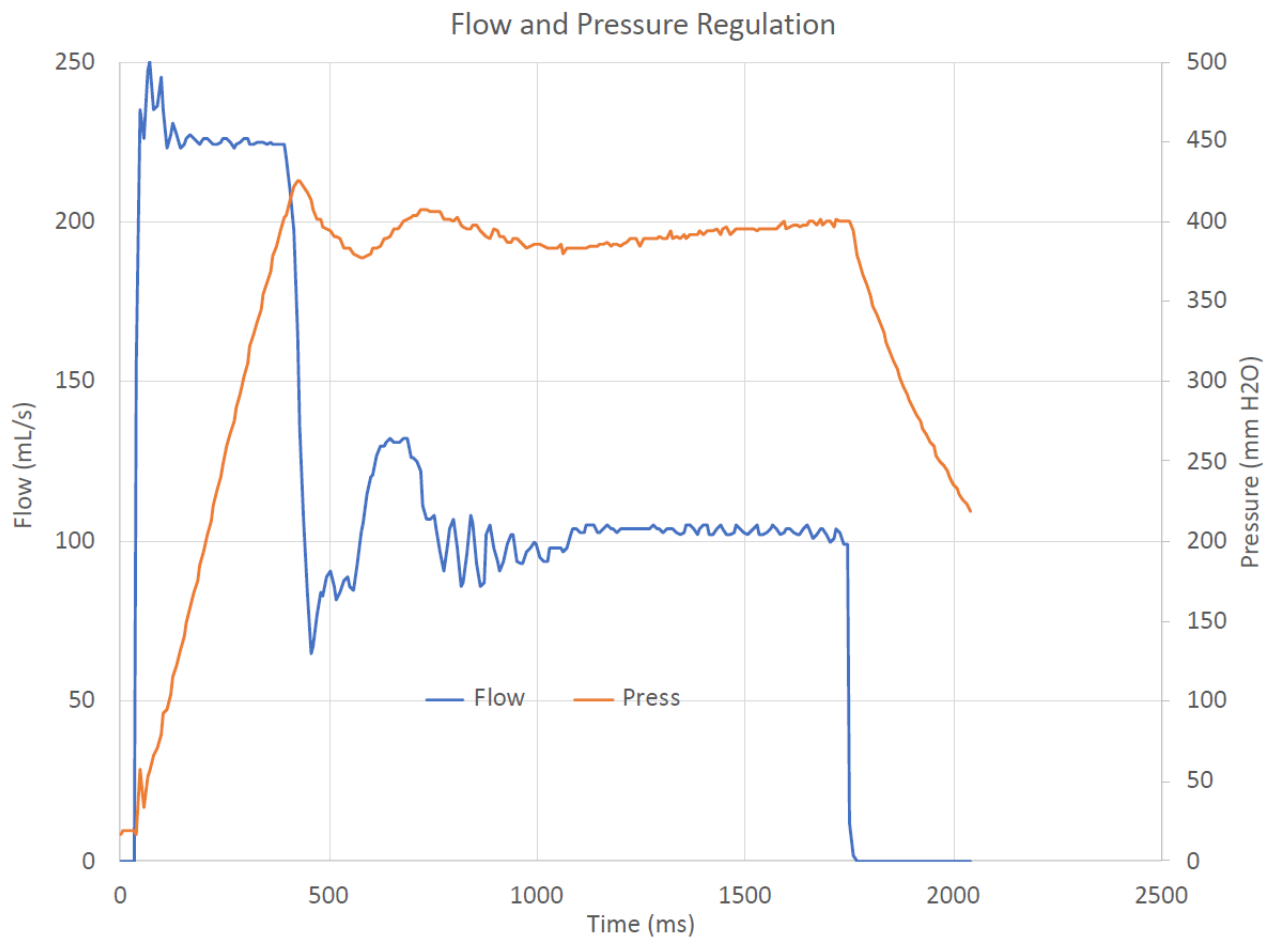


Figura 17: Grafico flusso-pressione malati di coronavirus

I polmoni di questi pazienti hanno spesso una compliance molto bassa e quindi la pressione può accumularsi rapidamente quando l'aria viene pompata nei polmoni. La figura mostra il flusso e la pressione per impostazioni di volume corrente di 300 ml, I: E di 1: 2 e una frequenza respiratoria di 15 su un polmone simulato con bassa conformità. La pressione massima è programmata su 40 cm H₂O. Il ventilatore si avvia regolando il flusso a 225 ml / s per raggiungere il volume corrente programmato. La pressione, tuttavia, aumenta rapidamente e il flusso deve essere ridotto a circa 450 ms per evitare il superamento della pressione massima. La pressione viene quindi regolata a 40 cm H₂O per il resto del periodo inspiratorio. Un ventilatore che fornisce semplicemente un flusso o un volume fisso qui supererebbe la pressione massima, forse danneggiando il paziente. Si potrebbe interrompere il suo funzionamento quando si colpisce la massima

pressione, ma il paziente non riceverà abbastanza ossigeno. È fondamentale regolare quindi con precisione sia il flusso che la pressione.

Un ventilatore meccanico mantiene in vita un paziente con insufficienza respiratoria pompando con precisione quantità controllate di aria a pressione controllata nei polmoni dei pazienti. Durante l'aspirazione (inspirazione), il ventilatore misura il flusso d'aria e la durata del flusso per fornire un volume corrente controllato che varia da 0,2 a 0,8 L. Durante la fase di scarico (scadenza), il flusso viene disattivato e viene aperto un percorso per consentire al paziente di espirare nell'atmosfera - possibilmente con una pressione positiva mantenuta (tramite una valvola PEEP). La tempistica dei respiri può essere interamente gestita dal ventilatore o un nuovo respiro può essere avviato dal paziente.

Un ventilatore è fondamentalmente un controller del flusso d'aria con vincoli di pressione. La frequenza respiratoria, respiri al minuto (bpm), è regolabile da 10 a 40 e il rapporto tra inspirazione e tempo di scadenza (i: e) è regolabile da 1 a 4. Ciò fornisce un tempo di assunzione che varia da 300ms a 3s. La portata richiesta è il volume corrente diviso per il tempo di aspirazione. La gamma utilizzabile di impostazioni può essere raggiunta con una portata di aspirazione di 50L / min. Durante l'aspirazione, la pressione viene monitorata e la portata viene ridotta in base alle necessità per mantenere la pressione al di sotto di una pressione massima (nell'intervallo 20-60 cm H₂O).

Riassumendo, quindi, le specifiche chiave che dovrebbe avere un ventilatore polmonare per assistere i malati di Covid sono:

1. Frequenza respiratoria (RR) (respiri al minuto): tra 10 e 40 . Si noti che i RR bassi di 6 - 9 sono applicabili solo al controllo di assistenza.
2. Volume corrente (TV) (volume d'aria spinto nel polmone): tra 200 e 800 ml in base al peso del paziente.
3. Rapporto I / E (rapporto inspiratorio / tempo di scadenza): si consiglia di iniziare intorno a 1: 2; meglio se regolabile tra 1: 1 - 1: 4 * .
4. Il controllo di assistenza si basa su una sensibilità di trigger : quando un paziente cerca di ispirare, può causare un calo dell'ordine di 2-7 cm H₂O,

rispetto alla pressione PEEP (non necessariamente uguale alla pressione atmosferica).

5. La pressione delle vie aeree deve essere monitorata continuamente. La pressione massima deve essere limitata a 40 cm H₂O in qualsiasi momento
6. Pressione di plateau dovrebbe essere limitata ad un massimo di 30 centimetri H₂O .
7. PEEP di 5–15 cm H₂O richiesto; molti pazienti hanno bisogno di 10-15 cmH₂O.
8. Le condizioni di guasto devono comportare un allarme e consentire la sostituzione manuale, vale a dire se la ventilazione automatica fallisce, la conversione in ventilazione immediata deve essere immediata.

*** Gamma determinata in base alle impostazioni del ventilatore di diversi pazienti COVID-19 riportate dalle ICU dell'area di Boston.**

Questi sono dei requisiti minimi impostati per l'uso di emergenza. Le apparecchiature progettate per un uso più regolare, anche se per i mercati emergenti, richiederanno funzionalità aggiuntive per essere utilizzate su base regolare.

È importante sottolineare anche che la ventilazione nell'aria ambiente è migliore di nessuna ventilazione . La miscelazione della miscela di ossigeno e aria-gas per regolare FiO₂ non è importante in uno scenario di emergenza. È certamente bello avere questa capacità e può essere facilmente implementato con un frullatore di ossigeno / gas che alcuni ospedali già possiedono.

COVID-19 può diventare aerodisperso, quindi è necessaria inoltre la filtrazione HEPA sull'espiazione del paziente o tra l'unità di ventilazione e il paziente (alla fine del tubo endotracheale) per proteggere il personale clinico da determinate infezioni. Questo può servire a fornire uno scambio di calore e umidità tra l'aria espirata e inspirata. I filtri HEPA in linea possono generalmente essere acquistati insieme ai sacchetti per rianimatore manuali.

4.3 ANALISI DEI VENTILATORI POLMONARI OPEN-SOURCE

Per poter analizzare al meglio gli innumerevoli ventilatori polmonari Open-Source che sono stati progettati o anche semplicemente rinnovati in questo periodo di grande richiesta a livello mondiale, mi avvarrò di sette attributi che aiuteranno il lettore nella conoscenza del macchinario a livello complessivo. Le sette specifiche scelte sono:

1. Openness
2. Buildability
3. Supporto comunitario
4. Test di funzionalità
5. Test di affidabilità
6. Idoneità COVID-19
7. Clinical friendly

Ad ognuno dei ventilatori polmonari verrà così affiancato un punteggio da uno a cinque per poter al meglio comprendere le qualità e le problematiche di ognuno di essi, creando un confronto su criteri universali.

VOTI	«OPENNESS»	«BUILDABILITY»	SUPPORTO	TEST DI FUNZIONALITÀ	TEST DI AFFIDABILITÀ	IDONEITÀ COVID-19	«CLINICIAN FRIENDLY»
1	Non aperto	Non costruibile	Non attivo	Non sperimentato	Non testato (funziona per 1h)	Con Ossigeno supplementare	Nessun controllo
2	Dichiarato aperto	Documenti disponibile ma richiedono congetture	Comunicazione senza riscontri	Testato con un polmone di prova	Funziona per 12h	Controllo di pressione e volume	Controllo della frequenza respiratoria e volume, prefissati
3	Repository con qualche pubblicazione	Istruzioni suggerite per la costruzione	Partecipazione di più di un volontario	Limiti di pressione, volume testati	> 12h superamento di tutti i test	PEEP	“ Possibilità di impostare e cambiare
4	Continui aggiornamenti	Istruzioni complete per la costruzione	Report settimanali	“ Allarmi testati	> 48h	Allarmi funzionanti e sanificazione continua	Interfaccia Utente, Impostazione libera degli allarmi
5	Completament e aperto	Produzione e riproduzione già effettuata	Report giornalieri	Tutti test effettuati	Senza limiti di tempo	Soddisfa tutti gli standard	Backup batteria, memorizzazione dati

LEGENDA PER L'ATTRIBUZIONE DELLE VOTAZIONI

Apertura-Openness

1. Non aperto
2. Dichiarato aperto, ma nessun piano pubblicato
3. Avere un repository con almeno alcuni piani
4. Ha una chiara strategia di licenza, aggiornamenti regolari ai piani
5. Completamente aperto, tutto documento, comunità reattiva, licenza chiara

Costruibilità-Buildability

1. Non costruibile
2. Documenti disponibili ma richiedono congetture
3. Tutto il software e l'hardware trasparenti e documentati. Alcune istruzioni di produzione, come un video di costruzione
4. Documentazioni complete suggerite riproducibilità
5. È stato riprodotto con successo da un'altra squadra puramente dalla documentazione

Supporto comunitario

1. Non attivo; non punto di contatto
2. Punto di contatto, ma non risponde
3. Responsabile o manager, più di un volontario
4. Community attiva, attività e report settimanali
5. Grande, attiva, comunità aperta

Test funzionali

0. In fase di progettazione, non elencato / testato
1. Fa muovere una borsa
2. Testato con un polmone di prova
3. Testato per limiti di pressione e volume, con controllo della frequenza respiratoria
4. Testato per allarmi, modalità multiple, miscelazione di O₂
5. Tutti i test sono verdi (se asserito come funzione)

Test di affidabilità

0. Non elencato
1. Funziona per un'ora
2. Funziona per 12 ore
3. Funziona per 12 ore superando tutti i test funzionali in modo accettabile (basso tasso di eccezione)
4. Il team indipendente opera per 48 ore superando tutti i test funzionali, rivedendo i registri dei dati
5. Tempo medio tra i dati di errore che iniziano a diventare significativi

Idoneità COVID-19

0. In fase di progettazione / Non elencato
1. Funziona con ossigeno supplementare
2. Controllo della pressione o del volume o entrambi
3. SBIRCIARE
4. Funzionalità di allarme sofisticate e sanificabilità di tutti i punti di contatto del paziente
5. Soddisfa gli standard britannici RVMSv1

Clinical friendly

0. Controlli sconosciuti

1. Nessun controllo
2. Controllo della frequenza respiratoria e del volume, porte standard
3. Controllo della frequenza respiratoria, del volume e della pressione facile da impostare, porte standard, chiara etichettatura esterna graficamente e nella lingua prescelta
4. Allarmi facili da impostare e comprendere; replica all'ingrosso di un'interfaccia utente esistente o conformità a uno standard dell'interfaccia utente TBD
5. Registrazione dei dati, controllo informativo, facile, backup della batteria per lo spostamento. Nessuna formazione necessaria nel normale funzionamento a causa della somiglianza con i progetti familiari.

Dopo aver approfondito, quindi, ciò che si cela dietro ad un prodotto di tale importanza e, dopo aver analizzato le caratteristiche fondamentali sulle quali è possibile realizzare un confronto completo tra dispositivi differenti, è stato possibile elaborare la tabella di pagina seguente nella quale sono racchiusi i molteplici progetti di diversi ventilatori *Open Source* sviluppatasi negli ultimi mesi.

Nome	Opennesses	Buildability	Supporto	Test di funzionalità	Test di affidabilità	Idoneità Covid-19	Clinician friendly
Medtronic Puritan Bennett	4	2.5	4	5	5	4	5
CoroVent	3.5	2.5	4	4	3	5	5
Ambovent	5	5	5	4	3	4	4
Open Source Ventilator Project	4	3.5	5	3.5	2.5	4	3.5
Protofy Team OxyGEN	5	4	4	3	1	2	1
The Open Ventilator	3	2	3	2	0	2.5	2
RespiraWorks	5	4	5	3.5	3	3.5	3
MUR (Minimal Universal Respirator)	4	4	4	3.5	4	3.5	3.5
Rice OEDK Design: ApolloBVM	5	4	4	2.5	2.5	3	2.5
A.R.M.E.E. Ventilator	5	5	4	2	3	2	2.5
COVID-19 Rapid Manufacture Ventilator (BVM)	5	4	4	3	0	3.5	3.5
VentilAid	5	4	4	3	0	2.5	2.5
Breath4Life	4	3	5	2	0	2	2.5
OpenVentilator (PopSolutions)	5	3.5	4	3.5	3	2	2
Low-Cost Open Source	5	4	4	3	1	3	3
DIY-Beatmungsgerät	5	4	3	2.5	2	3	3
CoRescue	4	1	4	3.5	0	3	3.5
MakAir	4.5	2.5	5	3	2	2	3
OperationAIR	4	4	4	3	2	3	2
DRM127 Ventilator/Respirator	1	2.5	1	5	0	4	4
Mechanical Ventilator Milano (MVM)	2	2	1	3	1	3	3
PREVAIL NY	4.5	4	3	2.5	0	4	3.5
Vortran G02VENT	1	2	2.5	4	0	4	4
Flow-i Bridge Project	4	2.5	3	2	2	3.5	4
MVM	3	2.5	1	3.5	1.5	4	3.5
Fluxtronic	4	2	3.5	2	0	4	3
BLU3 VENT	1	2.5	2.5	3	3	3	3
Jeff Ebin's Prototpye	5	4	3	1	0	4	3
MARK-19 Ventilator	3	2	3	4	3	2	2
Rice OEDK Design: (2019) ApolloBVM	3	3	3	3	2	3	2
INSPIRE - OpenLung	5	2	4	3.5	0	3	0
Open Breath Italy	3.5	2.5	3.5	3	1	3.5	2.5
Worldwide Ventilator	4	2.5	3	1.5	3	1.5	2
OPVent	4	3.5	1	3.5	0	3.5	3
Lungmate Ventilator	1	1	3	1.5	0	2.5	2.5
Vent4us	3	2	3	2.5	2.5	4	2
VentCore Ventilator	5	4	3.5	2	0	2	2
S-VENT	4	2	2.5	2.5	0	3	2
COVID-19 Ventilator	4	2.5	2.5	1	0	2.5	2
Respirador-DQ3D-NICA	4	3.5	2.5	0	3.5	2	2.5
Zephyr Open Source Ventilator	4	3	2	4	1.5	1	2
The AIR Project	3	2	3	2	0	3	1.5
Farré Ventilator	3	2	3.5	0	0	4	2
NASA VITAL	3.5	2	1.5	2.5	0	2	2.5
MIT 2010 (Husseini et al)	1	1	2	2	0	4	2.5
CaRE-VENT	2	2	2	3	1	2	2
Crowdsourced-ventilator-covid-19	3	1	2	3	0	3	2
LIBV	3	2	3	3	0	2	2.5
RespiArt	4	2	3	0	0	4	2.5
MIT E-Vent	2.5	1	3.5	2	0	3	0
Open source ventilator Pakistan	3	1	2	0	0	3	3
MIT Low Cost Ventilator	3	2	2	1	0	0	2
COVID19 Respirador (Vaccarini)	3	2	3	0	0	0	0
MVP	4	1	0	0	0	1	1
Open Source Ventilator Ireland	4	2	0	0	0	0	1
Breathing Aid	2	2	2	0	0	0	1
Low-Cost-Medical-Ventilator	2.5	2	1	1.5	0	0	0
Projecto EAR Celso	2	1	0	0	0	0	2
OxVent	1	1	1	3	0	0	0

Dalla tabella si può notare che il valore di *Openness*, cioè la condivisione di dati, file, idee, che è la colonna portante della filosofia che si cela dietro a questa tipologia di ventilatori, difficilmente ha ottenuto un basso punteggio . Sfortunatamente però ciò non vale per tutti i team di ricerca e ciò sicuramente è andato a discapito dei progetti stessi. Durante la review infatti, si sono analizzati i potenziali macchinari che avrebbero potuto avere ottimi margini di crescita, ma la mancanza di informazioni concesse e/o l'uso di una lingua non universale non ne ha premesso il corretto studio e approfondimento. Altra caratteristica che sarebbe importante implementare è la *Buildability*, in quanto, spesso, le idee protagoniste di un eventuale progetto non sono purtroppo realizzabili concretamente: ad esempio l'uso di materiali non reperibili facilmente, comporterebbe una difficoltà nella riproduzione immediata del prodotto; oppure, lo sviluppo di determinate ipotesi che cozzano con la dura realtà delle norme sanitarie. Per quest'ultimo concetto è ovvia la conclusione: i *Test di funzionalità* e i *Test di affidabilità* sono assolutamente necessari per poter sviluppare un progetto al meglio, ma come si può notare, purtroppo, anche in seguito ai suddetti test, spesso sono state date basse votazioni. Per quanto riguarda le ultime due caratteristiche, ovvero la *Clinician Friendly* e l'*Idoneità al Covid-19*, sicuramente c'è ancora un buon margine di miglioramento e la volontà di migliorarsi.

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

I ventilatori Open Source sono da anni in fase di sviluppo ma, purtroppo, il mondo della ricerca fino ad ora non è stato pronto ad accogliere questi progetti così innovativi. La filosofia alla base della tecnologia Open Source ha creato infatti preoccupazione, soprattutto per chi, orgogliosamente e avidamente, ha mantenuto riservate le informazioni riguardanti progetti in fase di sviluppo, scontrandosi direttamente con il significato di condivisione che “Openness” e “Community” rappresentano. Sicuramente la crisi sanitaria degli ultimi mesi ha lasciato il segno, facendo emergere un piccolo spiraglio di luce, spingendo forzatamente il singolo ricercatore a confrontarsi unicamente con il mondo di internet, proibendogli di recarsi fisicamente in laboratorio, o altri luoghi di ricerca, o di confrontarsi direttamente con colleghi e datori di lavoro. Spinti quindi dalla necessità e dall’urgenza di cercare una soluzione comune che potesse sopperire alla numerosissima richiesta di ventilatori polmonari per malati di Covid-19, si sono così trovati costretti a dover collaborare, attraverso l’unico mezzo disponibile, ovvero l’utilizzo di piattaforme online, con persone provenienti da tutto il mondo, uniti da uno scopo comune. Pneumologi, ingegneri, infermieri o anche ricercatori indipendenti si sono potuti unire ad un progetto in condivisione, cercando di dare il rispettivo contributo per un problema mondiale.

Per il futuro è perciò auspicabile che questa spinta possa continuare a protrarsi, fino al raggiungimento del suo apice, ovvero, finché un ventilatore Open Source potrà avere gli stessi finanziamenti e la stessa credibilità di un qualsiasi altro ventilatore realizzato da enti privati. Meglio ancora, che siano proprio i privati stessi a voler immergersi in questa nuova filosofia di commercio e progettazione

BIBLIOGRAFIA

Capitolo 2.1: Figura 1, slides della professoressa Valeria De Cristofaro, Docente presso Ic Calcinatè
<https://www.slideshare.net/ValeriaDeCristofaro/apparato-respiratorio-59728164>

Capitolo 2.2: Figura 2, immagine del sito web Wikipedia
<https://it.wikipedia.org/wiki/Respirazione>

Capitolo 2.3: Articolo “Il monitoraggio dei parametri respiratori con l’ausilio del ventilatore meccanico”, Redazione Nurse Times 28/06/2018 ,
<https://www.nursetimes.org/il-monitoraggio-dei-parametri-respiratori-con-lausilio-del-ventilatore-meccanico/51517>

Capitolo 3.1: Sito web “Close-up engineering, daily biomed magazine”, articolo sui Ventilatori Polmonari <https://biomedicalcue.it/ventilatore-polmonare/10600/>

Capitolo 3.2: Articolo “Tecnologie GSM, WiFi e DECT in ambiente ospedaliero: valutazione della compatibilità elettromagnetica con dispositivi medici di supporto vitale” di Eugenio Mattei, Istituto Superiore della sanità
https://www.researchgate.net/publication/237764732_Tecnologie_GSM_WiFi_e_DECT_in_ambiente_ospedaliero_valutazione_della_compatibilita_elettromagnetica_con_dispositivi_medici_di_supporto_vitale

Capitolo 3.3: Articolo sui Ventilatori a pressione positiva della Dr. Ananya Mandal, pubblicato dalla Sally Robertson, B.Sc. [https://www.news-medical.net/health/What-is-a-Positive-Pressure-Ventilator-\(Italian\).aspx](https://www.news-medical.net/health/What-is-a-Positive-Pressure-Ventilator-(Italian).aspx), Articolo “Panoramica sulla ventilazione meccanica” di Bhakti K. Patel , MD, University of Chicago <https://www.msmanuals.com/it-it/professionale/medicina-di-terapia-intensiva/insufficienza-respiratoria-e-ventilazione-meccanica/panoramica-sulla-ventilazione-meccanica>, Articolo “Ventilazione Meccanica” dal sito web My Personal Trainer <https://www.my-personaltrainer.it/salute/ventilazione-meccanica.html>

Capitolo 3.4: Articolo sui ventilatori domiciliari preso dal sito web Medicaire <https://www.medicair.it/che-cos-e-la-ventilazione-polmonare/>, Slides della Dott.ssa Chiara Rivera Geriatra presso Policlinico Universitario Campus Bio-Medico Roma https://www.sigg.it/assets/congressi/63-congresso-nazionale-sigg/slide/07_Chiara%20Rivera.pdf, le informazioni riguardante il ventilatore polmonare Giulia sono state prese dal sito ufficiale Ginevri <http://www.ginevri.com/Prodotti.aspx?id=11&l=it-IT>

Capitolo 4.1: Articolo “Coronavirus: la pressione sulla terapia intensiva. E come ci stiamo preparando a un forte impatto del contagio” del sito web Valigia blu <https://www.valigiablu.it/coronavirus-terapia-intensiva-ospedali/>

Capitolo 4.2: Slides “Gestione del paziente critico affetto da coronavirus: raccomandazioni per la gestione locale” pubblicate dalla SIAARTI <http://www.siaarti.it/SiteAssets/News/COVID19%20-%20documenti%20SIAARTI/SIAARTI%20-%20Covid19%20-%20Gestione%20del%20paziente%20critico%20affetto%20da%20coronavirus%20-%20Raccomandazioni%20per%20la%20gestione%20locale.pdf>

Capitolo 4.3: Tratto dai singoli siti web delle varie aziende, in ordine: Medtronic Puritan Bennett, ,Ambovent, Open Source Ventilator Project, Profoty Team OxyGEN, The Open Ventilator, RespiraWorks, MUR (Minimal Universal Respirator), Rice OEDK Design: ApolloBVM, A.R.M.E.E. Ventilator, COVID-19 Rapid Manufacture Ventilator (BVM), VentilAid, Breath4Life, OpenVentilator (PopSolutions), Low-Cost Open Source, DIY-Beatmungsgerät , CoRescue, MakAir, OperationAIR, DRM127 Ventilator/Respirator, Mechanical Ventilator Milano (MVM), PREVAIL NY, Vortran G02VENT, Flow-i Bridge Project, MVM, Fluxtronic, BLU3 VENT, Jeff Ebin's Prototpye, MARK-19 Ventilator, Rice OEDK Design: (2019) ApolloBVM, INSPIRE – OpenLung, Open Breath Italy, Worldwide Ventilator, OPVent, Lungmate Ventilator, Vent4us, VentCore Ventilator, S-VENT, COVID-19 Ventilator,Respirador-DQ3D-NICA, Zephyr Open Source Ventilator, The AIR Project, Farré Ventilator, NASA VITAL, MIT 2010 (Husseini et al), CaRE-VENT, Crowdsourced-ventilator-covid-19, LIBV, RespiArt, MIT E-Vent, Open source ventilator Pakistan, MIT Low Cost Ventilator, COVID19 Respirador (Vaccarini), MVP, Open Source Ventilator Ireland, Breating Aid, Low-Cost-Medical-Ventilator, Projecto EAR Celso, OxVent