

Armando Ferraioli

Ingegneria dell'apparato respiratorio e ventilazione artificiale meccanica

Principi, progettazione e gestione degli strumenti
per la respirazione artificiale

TOMO PRIMO

L'INGEGNERIA DELL'APPARATO RESPIRATORIO



Dario Flaccovio Editore

*Il voler conoscere è una disposizione
dell'animo, una passione.
L'esser costretti a conoscere
è una mania, un'ossessione.
Non è affatto vero che è lo scienziato
a rincorrere la verità, è questa piuttosto
che rincorre lo scienziato
e gli crea una esistenziale
sofferenza.*

Søren Kierkegaard

Sovente penso a quanto meravigliosa possa essere la vita
nel lasciarsi pervadere da quell'infinita sete di conoscenza
che non conosce appagamento, fino a restarne (come me)
consapevolmente prigioniero.
Da sempre dedico gran parte del mio tempo migliore allo studio,
alla progettazione ospedaliera e alla ricerca "mio primo amore"
nel campo delle scienze biomediche in costante evoluzione.
Nutro il desiderio costante di trasmettere condividendo tutto
quanto appreso e personalmente elaborato nel corso degli anni.

*To Leo,
my beloved nephew,
with the hope and wish
that in the course of his life, he will love and appreciate
the pleasure of science to achieve even more
than what I have achieved in my life...*



- ▶ entra su Instagram
- ▶ clicca sulla lente di ingrandimento
- ▶ clicca in alto a destra sul nametag
- ▶ inquadra questo nametag DF
- ▶ e seguici!

Armando Ferraioli

Ingegneria dell'apparato respiratorio e ventilazione artificiale meccanica

PRINCIPI, PROGETTAZIONE E GESTIONE
DEGLI STRUMENTI PER LA RESPIRAZIONE ARTIFICIALE

TOMO I

L'ingegneria dell'apparato respiratorio



Dario Flaccovio Editore

Armando Ferraioli

INGEGNERIA DELL'APPARATO RESPIRATORIO E VENTILAZIONE ARTIFICIALE MECCANICA

ISBN 9788857913599

© 2022 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686



linktr.ee/DarioFlaccovioEditore

Prima edizione: febbraio 2022

Ferraioli, Armando <1979->

Ingegneria dell'apparato respiratorio e ventilazione artificiale meccanica : principi, progettazione e gestione degli strumenti per la respirazione artificiale / Armando Ferraioli. - Palermo : D. Flaccovio, 2022.

ISBN 978-88-579-1359-9

1. Respirazione artificiale.

615.8362 CDD-23

SBN PAL0350615

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.

La fotocopiatura dei libri è un reato.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.

Struttura dell'opera

• TOMO I • *L'ingegneria dell'apparato respiratorio*

1. Leggi fondamentali rilevanti sui gas per la terapia intensiva	pag. 28
2. Anatomia del sistema respiratorio	» 52
3. Controllo della ventilazione	» 95
4. Meccanismo della respirazione	» 108
5. Capacità e volumi polmonari.....	» 161
6. Circolazione polmonare.....	» 183
7. Relazioni ventilazione-perfusione	» 199
8. Trasferimento diffusivo dei gas respiratori	» 248
9. Trasporto di ossigeno nel sangue	» 277
10. Misurazione e proprietà delle specie di emoglobina	» 307
11. Equazioni e test della funzione polmonare.....	» 317
12. Misurazione e monitoraggio della funzione respiratoria.....	» 338
13. Progetto del ventilatore meccanico e sua funzione	» 367
14. Apparecchiature di umidificazione a circuito attivo.....	» 398
15. Sensori per il monitoraggio della ventilazione meccanica	» 417
16. Allarmi e dispositivi di sicurezza nella ventilazione meccanica	» 424
17. Fisiologia della ventilazione a pressione positiva	» 427
18. Vantaggi e limiti della ventilazione non invasiva (NIV).....	» 456
19. Impostazioni sul ventilatore	» 460
20. Modalità della ventilazione meccanica.....	» 502
21. Analisi della forma d'onda del ventilatore	» 515
22. La normale forma d'onda del capnografo	» 541
23. Cambiamenti legati all'età nella fisiologia respiratoria.....	» 550
24. Effetti fisiologici della pressione barometrica alta e bassa.....	» 554
25. Fisiologia respiratoria neonatale.....	» 558

• TOMO II • *La ventilazione artificiale meccanica*

26. Sinossi dell'apparato respiratorio	» 16
27. Apparato respiratorio.....	» 22
28. Terminologia delle pressioni respiratorie.....	» 42
29. Obiettivi della ventilazione meccanica.....	» 53
30. Concetti basilari.....	» 74

31. Ventilazione, diffusione, perfusione, elastanza, compliance.....	» 82
32. Compliance, resistenza e costanti di tempo.....	» 85
33. Sinossi della ventilazione meccanica	» 89
34. Introduzione alla ventilazione meccanica.....	» 98
35. Schematizzazione della ventilazione meccanica	» 107
36. Schema basilare del ventilatore	» 115
37. Classificazione delle modalità di alimentazione del ventilatore meccanico	» 117
38. Nozioni di ventilazione meccanica.....	» 125
39. La ventilazione meccanica	» 132
40. Modalità di base di ventilazione.....	» 144
41. Variabili essenziali e tipologie di respiri	» 150
42. Un approccio moderno alle modalità di ventilazione meccanica.....	» 169
43. Principi ingegneristici applicati alla ventilazione meccanica.....	» 174
44. Classificazione dei ventilatori meccanici	» 185
45. Composizione del sistema di ventilazione	» 193
46. Variabili di fase	» 219
47. Modalità di base della ventilazione meccanica	» 230
48. Modalità operative della ventilazione meccanica.....	» 245
49. Visualizzazione delle forme d'onda di base.....	» 283
50. Analisi delle forme d'onda del ventilatore	» 319
51. Effetti del flusso costante durante la ventilazione controllata a volume	» 323
52. Ventilazione spontanea durante la ventilazione meccanica	» 337
53. Effetti del flusso, del circuito e delle caratteristiche polmonari sulle forme d'onda pressione-tempo	» 340
54. Forme d'onda sviluppate durante la ventilazione a pressione controllata.....	» 353
55. Supporto della pressione e ventilazione spontanea	» 357
56. Effetti delle caratteristiche polmonari sulle forme d'onda della ventilazione a pressione controllata.....	» 362
57. Utilizzo delle forme d'onda per la valutazione del sistema paziente-ventilatore	» 364
58. Uso delle forme d'onda del flusso espiratorio e della pressione come strumenti diagnostici	» 373
59. Risoluzione dei problemi della funzione del ventilatore.....	» 379
60. Loop pressione-volume (LPV) e loop flusso-volume (LFV).....	» 381
61. Parametri di controllo del ventilatore	» 387
62. Monitoraggio della meccanica respiratoria mediante il ventilatore	» 397
63. Sistema di sincronizzazione	» 402
64. Asincronia paziente-ventilatore.....	» 408

65. Ventilazione ad alta frequenza	» 418
66. Ventilazione a rapporto inverso (IRV)	» 423
67. Problemi ed errori legati alla ventilazione meccanica	» 426
68. Monitoraggio del ventilatore	» 447
69. Monitoraggio della pressione esofagea	» 471
70. Funzioni speciali di ventilazione	» 474
71. Reclutamento e manovre di reclutamento polmonare	» 492
72. Umidificazione e filtraggio durante la ventilazione meccanica	» 499
73. La nebulizzazione dei gas respiratori	» 513
74. Danni polmonari indotti dalla ventilazione meccanica	» 522
75. Effetti fisiologici della NPPV	» 525
76. Supporto vitale extracorporeo	» 537
77. Ossigenoterapia	» 544
78. L'apparecchio per anestesia	» 547
79. Circuiti di ventilazione in anestesia	» 567
80. Emogasanalisi (EGA)	» 571
Nomenclatura delle tecniche di ventilazione italiano/inglese	» 586
Modalità standard ed alternative di ventilazione	» 588
Glossario	» 590
Glossario specifico della ventilazione meccanica	» 601
Abbreviazioni – Simbologia	» 608
Simboli ed equazioni delle variabili respiratorie	» 615
APPENDICE 1 - Calcoli respiratori	» 617
APPENDICE 2	» 637
APPENDICE 3	» 638
APPENDICE 4	» 639
APPENDICE 5	» 640
Bibliografia	» 641

Indice TOMO I

<i>Premessa</i>	pag. 17
<i>Introduzione</i>	» 21
1. Leggi fondamentali rilevanti sui gas per la terapia intensiva	» 28
1.1. Fisica rilevante per la fisiologia respiratoria	» 28
1.2. Pressione parziale e solubilità dei gas nei sistemi biologici	» 31
1.3. Fisica dell'umidità e dell'evaporazione	» 36
1.4. Riscaldamento e umidificazione nel tratto respiratorio normale	» 48
2. Anatomia del sistema respiratorio	» 52
2.1. Struttura e funzione delle vie aeree superiori	» 52
2.2. Struttura e funzione delle vie aeree inferiori	» 59
2.3. Anatomia della circolazione polmonare e bronchiale	» 64
2.4. Struttura e funzione dell'alveolo	» 72
2.5. Proprietà, produzione e regolazione del surfattante polmonare	» 78
2.6. Ruoli della parete toracica e del diaframma nella meccanica respiratoria ..	» 82
2.6.1. Muscoli della respirazione	» 82
2.7. Funzioni non respiratorie dei polmoni	» 89
3. Controllo della ventilazione	» 95
3.1. Controllo della ventilazione e dell'ossigenazione	» 95
3.2. Relazione tra anidride carbonica arteriosa e ventilazione alveolare	» 98
3.3. Relazione tra ossigeno arterioso e ventilazione alveolare	» 103
3.4. Fattori che influenzano la frequenza respiratoria e il volume corrente	» 105
3.5. Percorsi e importanza del riflesso della tosse	» 106
4. Meccanismo della respirazione	» 108
4.1. Il processo inspiratorio ed espiratorio	» 108
4.2. Compliance statica, dinamica e specifica	» 110
4.3. Misurazione della compliance respiratoria	» 117
4.4. Proprietà elastiche del sistema respiratorio	» 123
4.5. Costanti di tempo	» 127
4.6. Resistenza del sistema respiratorio	» 132
4.7. Fattori che influiscono sulla resistenza delle vie aeree	» 140
4.8. Misurazione della resistenza respiratoria	» 143
4.9. Gradiente verticale della pressione pleurica	» 147
4.10. Gli effetti del posizionamento sulla meccanica della respirazione	» 150
4.11. Lavoro della respirazione e dei suoi componenti	» 154

5. Capacità e volumi polmonari	» 161
5.1. Generalità	» 161
5.2. Volumi e capacità polmonari.....	» 163
5.3. Misurazione dei volumi e delle capacità polmonari.....	» 168
5.4. Capacità residua funzionale (CFR)	» 173
5.5. Significato clinico e misurazione della capacità di chiusura.....	» 176
5.6. Misurazione della capacità di chiusura.....	» 178
6. Circolazione polmonare	» 183
6.1. Caratteristiche fisiologiche dei vasi sanguigni polmonari.....	» 183
6.2. Differenze tra le circolazioni polmonari e sistemiche	» 193
6.3. Fattori che influenzano la resistenza vascolare polmonare	» 193
7. Relazioni ventilazione-perfusione	» 199
7.1. Ventilazione e perfusione globale e regionale.....	» 199
7.2. Le zone ovest del polmone	» 202
7.3. Corrispondenza ventilazione-perfusione e mancata corrispondenza.....	» 205
7.4. Metodi di misurazione della mancata corrispondenza ventilazione-perfusione	» 209
7.5. Effetti della mancata corrispondenza ventilazione-perfusione sullo scambio di gas.....	» 211
7.6. Spazio morto e suoi componenti	» 221
7.7. Misurazione dello spazio morto	» 229
7.8. Conseguenze fisiologiche dell'aumento dello spazio morto	» 234
7.9. I concetti di miscela venosa e shunt	» 236
7.10. Misurazione e stima dello shunt	» 239
7.11. Conseguenze fisiologiche di un aumento dello shunt	» 244
8. Trasferimento diffusivo dei gas respiratori	» 248
8.1. La cascata di ossigeno	» 248
8.2. Movimento di anidride carbonica dalle cellule all'atmosfera	» 253
8.3. Diffusione di gas attraverso la membrana alveolare	» 256
8.4. Diffusione della capacità e della sua misurazione.....	» 266
8.5. Trasferimento di gas limitato alla perfusione e limitato alla diffusione.....	» 272
9. Trasporto di ossigeno nel sangue	» 277
9.1. Trasporto di ossigeno nel sangue	» 277
9.2. Frazione di emoglobina ossigenata	» 280
9.3. Misurazione della saturazione dell'ossigeno da parte dell'analizzatore di gas nel sangue	» 281
9.4. La curva di dissociazione dell'ossi-emoglobina.....	» 282
9.5. Fattori che influenzano l'affinità dell'emoglobina per l'ossigeno	» 285
9.6. Il valore p50 di un campione di gas sanguigno	» 287

9.7. Trasporto di anidride carbonica nel sangue.....	» 288
9.8. La curva di dissociazione dell'anidride carbonica	» 292
9.9. L'effetto Haldane.....	» 296
9.10. L'effetto Bohr.....	» 300
9.11. Lo spostamento del cloruro degli eritrociti (effetto hamburger).....	» 302
9.12. Stoccaggio di anidride carbonica nel corpo umano.....	» 305
9.13. Stoccaggio dell'ossigeno nel corpo umano	» 305
10. Misurazione e proprietà delle specie di emoglobina	» 307
10.1. Spettroscopia ad assorbimento delle specie di emoglobina	» 307
10.2. Concentrazione dell'emoglobina totale nel campione ABG.....	» 310
10.3. Misurazione dell'emoglobina totale mediante la spettrometria	» 310
10.4. Ematocrito: volume di eritrociti come frazione del volume totale.....	» 311
10.5. Misurazione della metaemoglobina mediante l'emogasanalizzatore	» 312
10.6. Proprietà biologiche della metaemoglobina	» 313
10.7. Cause e meccanismi legati alla metaemoglobina	» 314
10.8. Spettrofotometria della carbossiemoglobina	» 314
10.9. Proprietà della mioglobina	» 315
11. Equazioni e test della funzione polmonare.....	» 317
11.1. Equazioni respiratorie comuni.....	» 317
11.2. Equazione del gas alveolare	» 319
11.4. Interpretazione dei test della funzione polmonare.....	» 327
11.5. Curve di risposta all'anidride carbonica e all'ossigeno.....	» 334
12. Misurazione e monitoraggio della funzione respiratoria	» 338
12.1. Interpretazione del gas sanguigno arterioso	» 338
12.2. Principi di ossimetria a impulsi	» 340
12.3. Capnometria di fine volume corrente.....	» 348
12.4. Differenza tra PaCO ₂ di fine volume corrente e PaCO ₂ arteriosa	» 353
12.5. Misurazione della tensione di ossigeno mediante elettrolisi dell'ossigeno disciolto	» 357
12.6. Principi di misurazione dell'ossigeno con il sensore di Clark	» 362
12.7. Principi di misurazione della pCO ₂ con l'elettrodo Severinghaus	» 364
13. Progetto del ventilatore meccanico e sua funzione	» 367
13.1. Componenti di base di un ventilatore meccanico.....	» 367
13.2. Requisiti di alimentazione per i ventilatori meccanici	» 371
13.3. Metodi di generazione del flusso di gas per la ventilazione meccanica... ..	» 373
13.4. Controllo della concentrazione di gas e della portata del flusso	» 378
13.5. Circuiti respiratori per ventilazione manuale e meccanica.....	» 381
14. Apparecchiature di umidificazione a circuito attivo	» 398
14.1. Scambiatori passivi di calore e umidità.....	» 405

14.2. Metodi per generare pressione positiva nel circuito del ventilatore.....	» 410
15. Sensori per il monitoraggio della ventilazione meccanica	» 417
15.1. Filtri nel circuito del ventilatore meccanico	» 421
16. Allarmi e dispositivi di sicurezza nella ventilazione meccanica	» 424
17. Fisiologia della ventilazione a pressione positiva.....	» 427
17.1. Pressione positiva e pressione positiva di fine espirazione (PEEP).....	» 427
17.2. PEEP intrinseca e ventilazione a pressione positiva	» 431
17.3. Sintesi degli effetti fisiologici della ventilazione a pressione positiva....	» 436
17.4. Effetti della ventilazione a pressione positiva sulla fisiologia polmonare	» 437
17.5. Effetti della ventilazione a pressione positiva sulla fisiologia cardiovascolare	» 447
17.6. Cambiamenti emodinamici durante un respiro meccanico.....	» 452
17.7. Effetti della ventilazione a pressione positiva sui sistemi di organi extratoracici.....	» 455
18. Vantaggi e limiti della ventilazione non invasiva (NIV).....	» 456
18.1. Base fisiologica dell'effetto del trattamento.....	» 456
18.2. I vantaggi della NIV rispetto alla ventilazione meccanica invasiva.....	» 457
19. Impostazioni sul ventilatore.....	» 460
19.1. Flusso, volume, pressione, resistenza e compliance.....	» 460
19.2. Fasi del respiro meccanico	» 463
19.3. Variabili di fase: trigger, limiti, cicli e PEEP	» 464
19.4. Variabili di controllo: volume e pressione	» 468
19.5. Attivazione (triggering) di un respiro supportato meccanicamente	» 469
19.6. Variabili limite (target) nella ventilazione meccanica.....	» 481
19.7. Variabile ciclica dall'inspirazione all'espirazione	» 483
19.8. Selezione e regolazione della PEEP	» 489
19.9. Volume corrente e frequenza respiratoria	» 490
19.10. Pausa inspiratoria, rapporto I:E e tempo di salita inspiratorio	» 492
20. Modalità della ventilazione meccanica	» 502
20.1. Modalità e schemi di targeting della ventilazione meccanica	» 502
20.2. Differenze pratiche tra ventilazione controllata a pressione e a volume..	» 503
20.3. Modalità di ventilazione obbligatorie e spontanee	» 510
20.4. Ventilazione obbligatoria intermittente sincronizzata (SIMV)	» 513
21. Analisi della forma d'onda del ventilatore	» 515
21.1. Un'introduzione alla forma d'onda del ventilatore	» 515
21.2. Interpretazione della forma d'onda della pressione.....	» 517
21.3. Interpretazione della forma d'onda del flusso del ventilatore	» 520
21.4. Interpretazione della forma del ciclo pressione-volume.....	» 523
21.5. Interpretazione della forma del ciclo flusso-volume	» 532

21.6. La PEEP intrinseca e la manovra di attesa espiratoria	» 535
21.7. Pressione alveolare e manovra di attesa inspiratoria	» 537
22. La normale forma d'onda del capnografo	» 541
22.1. Forme d'onda anomale della capnografia e loro interpretazione	» 543
23. Cambiamenti legati all'età nella fisiologia respiratoria	» 550
24. Effetti fisiologici della pressione barometrica alta e bassa	» 554
24.1. Effetti fisiologici dell'aumento della pressione barometrica del gas	» 556
24.2. Influenza dell'obesità patologica sulla funzione respiratoria	» 557
25. Fisiologia respiratoria neonatale	» 558

Premessa

L'apparato respiratorio (o sistema respiratorio) è l'insieme di organi e tessuti deputati all'importante processo della respirazione. Esso consiste nell'assimilazione dell'ossigeno inspirato con l'aria e nella contemporanea espulsione dell'anidride carbonica, generata dall'attività cellulare che rappresenta un prodotto di scarto. L'apparato respiratorio è costituito da un gruppo di organi altamente specializzati a garantire la corretta ossigenazione del sangue e l'eliminazione della CO_2 . Poiché questi gas sono destinati ad immettersi nel circolo ematico e da questo poi essere espulsi, le vie respiratorie accoppiano necessariamente ventilazione e perfusione. Il processo meccanico definito comunemente *respirazione artificiale* prende il nome di *ventilazione polmonare*, mentre il termine "respirazione" indica l'intero processo che va dall'immissione dell'ossigeno alla sua utilizzazione, per l'ossidazione dei substrati e la conseguente produzione di energia.

L'apparato respiratorio è dotato di una organizzazione perfetta, unica nel suo genere, dove le vie aeree, se paragonate ad una rete autostradale di vitale importanza, risultano dotate di una "corsia preferenziale" di transito rapido per gas e molecole (ossigeno, anidride carbonica, idrogenioni, ecc.) per il controllo dell'omeostasi dell'organismo (equilibrio acido-base). In questa corsia preferenziale riservata sia al traffico di sangue che di aria, l'omeostasi può essere aumentata in pochi secondi di oltre dieci volte secondo le necessità metaboliche, senza che si verifichi alcun ingorgo o ritardo di circolazione poiché la viabilità dei bronchi e dei vasi può essere in realtà espansa reclutando aree normalmente non utilizzate, attivando in tal modo un'infinità di cortocircuiti o di strade accessorie. La corsia preferenziale per i gas e per il sangue rimane sempre libera anche quando il traffico bronchiale e vascolare polmonare risulta compromesso. Per tale motivo l'insufficienza respiratoria (ipossiemia, ipercapnia ed acidosi respiratoria) si instaura solo nelle forme avanzate e terminali di molte patologie ostruttive e restrittive delle vie aeree e vascolari polmonari. Le vie aeree sono dotate di un moderno sistema "semaforico" azionato da meccanismi di "feedback" neuro-chimici in grado di adeguare istantaneamente la circolazione di sangue e di gas alle necessità dei distretti periferici dell'organismo, con la rapida distribuzione della circolazione ematica verso le zone polmonari meglio raggiunte dal traffico dell'aria. Questi riflessi sono tutti riconducibili alle interazioni "ipossia alveolare-ipercapnia-acidosi-alcalosi respiratoria". Gli idrogenioni (come l'ossigeno e l'anidride carbonica) sono autorizzati a superare le

barriere emato-encefaliche-liquorali per raggiungere istantaneamente il centro respiratorio (SNC) paragonabile ad una stazione di monitoraggio tipo "tutor" (con verifica istantanea degli ingressi in transito) situato nel bulbo, nel ponte encefalico e nel sistema arterioso. La rete viaria bronchiale è dotata di innumerevoli "stazioni di servizio" (alveoli) che offrono: una superficie di oltre 200 m² per favorire scambi tra la totalità del sangue circolante e l'aria che incessantemente affluisce e defluisce dai polmoni; un sistema di "condizionamento dell'aria" che adegua la qualità dell'aria respirata in termini di temperatura, umidità, purezza e composizione chimica; un meccanismo di "smaltimento dei rifiuti" con trasporto automatico (depurazione muco-ciliare) su di un "nastro trasportatore" (ciglia vibratili) del muco prodotto; un servizio di "disinfezione e sterilizzazione" delle vie aeree in termini di batteriostasi e sterilizzazione (enzimi, defensine, surfactante, ecc.). Questi meccanismi di depurazione diventano poi inefficienti (come accade nella BPCO, nelle polmoniti e nel cancro del polmone), laddove si accumulano detriti cellulari, sostanze ossidanti e scorie nelle vie aeree ingombrando, dando luogo a bronchiti e polmoniti che rappresentano vere scariche "abusive", dove si accumula il materiale che dovrebbe essere invece asportato e distrutto.

La ventilazione artificiale meccanica costituisce il trattamento di prima scelta in presenza sia di gravi patologie a carico dell'apparato respiratorio che di patologie extrapolmonari, che determinano la compromissione della respirazione autonoma. Condizione quest'ultima di elevata instabilità clinica che, se non corretta tempestivamente, potrebbe comportare la morte del paziente. Qualunque sia l'eziopatogenesi nella compromissione della funzione respiratoria autonoma, la condizione che si determina è sempre costituita dall'incapacità/impossibilità per il paziente di svolgere/mantenere un lavoro respiratorio adeguato al fabbisogno di ossigeno metabolico. Si rende necessario pertanto l'applicazione di un supporto invasivo esterno alla funzione respiratoria. Tale supporto è costituito dalla Ventilazione Meccanica Artificiale (VAM) che mediante apposite apparecchiature (ventilatori meccanici) vicaria la respirazione autonoma nei soggetti in cui essa risulta alterata, compromessa o artificialmente inibita. Le indicazioni generali sulla ventilazione artificiale invasiva sono determinate sia dallo squilibrio tra lavoro respiratorio autonomo che dall'efficacia: dello scambio di gas a livello della membrana alveolo-capillare, del trasporto e dello scambio di ossigeno a livello tissutale, nonché della rimozione dell'anidride carbonica. Gli obiettivi della VAM comprendono la riduzione dell'ipossiemia, dell'ipercapnia, delle atelettasie polmonari nonché della fatica muscolare (ovvero il miglioramento della distress respiratoria, ecc.).

Da questa premessa traspare tutta la complessità che riveste l'apparato respiratorio e ancor più la ventilazione meccanica. Tantissimi aspetti correlati all'apparato respiratorio sono evidentemente "ingegneristici" così come tutto ciò che è correlato alla ventilazione meccanica. Questo testo, scritto da un bioingegnere, è stato suddiviso in tre parti.

La parte I "L'ingegneria dell'apparato respiratorio" è fondamentalmente una trattazione completa dell'apparato respiratorio anche da un punto di vista ingegneristico

che include: la fisica rilevante; l'anatomia e la fisiologia dell'apparato respiratorio; il controllo e i meccanismi della respirazione; la capacità e i volumi polmonari e relative relazioni con la circolazione; la ventilazione, la perfusione ed il trasferimento diffusivo dei gas respiratori; il trasporto dei gas nel sangue; le misurazioni e le proprietà delle specie di emoglobina; i test della funzione polmonare; le equazioni sottostanti; la misurazione e il monitoraggio della funzione respiratoria; la progettazione e la funzione del ventilatore meccanico; la ventilazione a pressione positiva; le impostazioni da effettuare sul ventilatore meccanico; le modalità delle ventilazioni meccaniche; l'analisi delle forme d'onda del ventilatore fino alle particolarità della fisiologia respiratoria.

La parte II "La ventilazione meccanica", dopo una breve sinossi dell'apparato respiratorio, traccia la terminologia delle pressioni respiratorie; gli obiettivi della ventilazione meccanica; i concetti basilari dei parametri ventilatori; un compendio della ventilazione meccanica con una sua introduzione particolareggiata, in cui si descrive lo schema di un ventilatore meccanico; la schematizzazione della ventilazione meccanica e la sua classificazione; le nozioni fondamentali ad essa correlate; le modalità di base della ventilazione meccanica; le variabili essenziali; le tipologie dei respiri; un approccio più moderno alle modalità di ventilazione meccanica ed i principi ingegneristici della stessa; la classificazione dei ventilatori meccanici; la composizione del sistema di ventilazione; le variabili di fase, le varie modalità e quelle operative; l'analisi delle forme d'onda del ventilatore e la loro visualizzazione; i parametri di controllo; la sincronizzazione e l'asincronia paziente-ventilatore; la ventilazione ad alta frequenza; i problemi e gli errori legati alla ventilazione meccanica; il monitoraggio del ventilatore; i danni polmonari indotti dalla ventilazione meccanica; le funzioni speciali; gli effetti fisiologici della NPPV; l'ossigenoterapia; l'umidificazione e la nebulizzazione; il supporto vitale extracorporeo; l'apparecchio per l'anestesia; l'emogasanalisi.

La parte III "Appendici" riporta la nomenclatura delle tecniche di ventilazione sia in italiano che in inglese; il listato delle metodiche di ventilazione sia standard che alternative; i simboli e le equazioni delle variabili respiratorie; il glossario dei termini relativi all'apparato respiratorio e quello specifico relativo alla ventilazione meccanica; le abbreviazioni e la simbologia; appendici relative ai calcoli respiratori e ai valori normali elettrolitici sia del trasporto dell'ossigeno che emodinamici, oltre ad un'ampia bibliografia della documentazione consultata nella stesura del testo.

Introduzione

Negli ultimi anni la ventilazione meccanica è stata oggetto di una notevole evoluzione che ha permesso di elaborare funzioni assai complesse in trattamenti divenuti particolarmente efficaci e ben tollerati dai pazienti.

Una tecnologia d'avanguardia ha consentito di introdurre nella ventilazione meccanica i concetti di sincronizzazione, proporzionalità, servocontrollo. La sincronizzazione è la capacità del ventilatore di "ascoltare" il paziente, armonizzandosi con le fasi del suo atto respiratorio. La proporzionalità è la capacità del ventilatore di adeguare il flusso di gas in relazione alle esigenze del paziente. Il servocontrollo è la capacità del ventilatore di regolare il flusso in tempo reale, integrando dati provenienti dal paziente e adattando il ciclo di lavoro all'attività spontanea dello stesso. Questa evoluzione tecnologica ha portato ad uno sviluppo dei ventilatori tale da renderli sempre più performanti, di piccole dimensioni, di più facile utilizzo, provvisti di molteplici funzioni automatiche che sempre meglio si adattano alle esigenze dei pazienti. La ventilazione meccanica di tipo "non invasivo", grazie alle nuove tecniche sperimentate, è diventata negli ultimi anni un caposaldo del trattamento dell'insufficienza respiratoria acuta e cronica.

Una buona ventilazione meccanica è legata alla scelta di un buon ventilatore, che sia adeguato all'ambito di utilizzo previsto, alla capacità degli operatori e alle diverse tipologie di pazienti da trattare. Non esistono in commercio ventilatori migliori di altri, ma macchine diverse con diverse tipologie di applicazione per cui una scelta sapiente, ben informata e consapevole, predispone ad un trattamento mirato e ad esiti squisitamente favorevoli per i pazienti. È di fondamentale importanza che ogni figura professionale addetta alla ventilazione meccanica conosca in dettaglio il ventilatore dato in dotazione al contesto in cui egli opera. Non è raro che le capacità operazionali del ventilatore a volte superino di gran lunga sia le prove scientifiche di efficacia che la comprensione di utilizzo dell'operatore. Il divario di conoscenza esistente tra produttori e utenti finali è dovuto in gran parte all'assenza di un lessico standardizzato. Un lessico condiviso dipende infatti dalla conoscenza di modelli analitici piuttosto semplici, di schemi di interazione e controllo ventilatore-paziente. Come è noto, l'istruzione sul tema della ventilazione meccanica è condotta prioritariamente dai rappresentanti delle aziende produttrici, di conseguenza i progettisti vantano una posizione di prestigio nel guidare il cambiamento nel settore della comunicazione. Tutti i produttori dovrebbero omologare di concerto il lessico utilizzato nei manuali destinati agli operatori, adot-

tando una terminologia informale standard che non induca in facili fraintendimenti, tanto da coinvolgere gli operatori in un'errata gestione del ventilatore a discapito del paziente. I ventilatori meccanici possono essere ben compresi in termini di semplici modelli fisici, essendo dotati di analogie con quelli elettrici. Questi modelli forniscono sia la base per la progettazione e la classificazione dei ventilatori che la possibilità di comprendere meglio le interazioni ventilatore-paziente.

Non essendo stato adottato dai produttori dei ventilatori e dalla comunità accademica di cure respiratorie un sistema standardizzato per classificare e descrivere le modalità di ventilazione, regna nel settore una sorta di confusione abbastanza diffusa, che potrebbe essere causa di rischio nell'assistenza ai pazienti. È pertanto necessario riassumere uno schema di classificazione delle modalità di ventilazione nonché un lessico completo di tutto quanto sia stato ampiamente pubblicato negli anni. Nello specifico, il sistema di classificazione consta di tre componenti: 1) descrizione del pattern respiratorio e variabili di controllo all'interno dei respiri; 2) descrizione della tipologia di controllo utilizzato "durante" e "tra i respiri"; 3) descrizione dettagliata degli algoritmi operazionali aggiuntivi. Questa specifica a tre livelli offre una scalabilità dei dettagli che rende più appropriata la descrizione della modalità da applicare alla particolare esigenza. Alla postazione del paziente è sufficiente fare un breve riferimento ad una modalità, utilizzando il primo componente. Per distinguere tra modalità simili e nomi di marchi bisognerebbe far riferimento almeno al primo e al secondo componente. Per una specifica di modalità completa ed unica bisognerebbe utilizzare tutti e tre i componenti. Il sistema di classificazione utilizza l'equazione del movimento per il sistema respiratorio come struttura teorica sottostante. Tutti i termini rilevanti per descrivere le modalità di ventilazione sono definiti in un ampio glossario riportato alla fine del testo.

Quattro sono le problematiche da tenere in debita considerazione:

1. La nomenclatura attuale relativa alle modalità del ventilatore meccanico è particolarmente confusa e obsoleta. La confusione è resa evidente da alcuni dei libri e dei manoscritti pubblicati al riguardo, riscontrabile nella letteratura pubblicata dai produttori e dalle organizzazioni addette ai controlli dei ventilatori. Tutto ciò è da tenere in debita considerazione perché la maggior parte della formazione dedicata all'uso del ventilatore è condotta dai produttori, ciascuno con le proprie preclusioni e i propri consensi di merito.
2. La confusione che si ingenera sulla nomenclatura arriva a contaminare l'applicazione clinica, influenzando negativamente sulla cura del paziente. Si riscontra infatti un vero divario di conoscenze da parte dei medici, sulla base di esempi imprecisi relativi alla funzionalità dei ventilatori. Questo divario si amplifica con l'accelerazione dell'evoluzione tecnologica. Il modello di riferimento del ventilatore è la funzionalità della modalità preposta. La possibile confusione non è limitata soltanto ai medici: i rappresentanti dei produttori sono spesso disinformati sui prodotti

della concorrenza e anche incapaci di articolare esaustivamente le specifiche della funzionalità del proprio prodotto. Dotare gli specialisti del prodotto, di strumenti che consentano una comunicazione ottimale con i clienti dovrebbe essere tanto importante quanto il completamento finale dedicato ad una buona formazione degli utenti. L'impossibilità di una comunicazione perfetta mette a rischio sia la vendita del prodotto che la cura del paziente.

3. La soluzione a questo problema dovrebbe essere universalmente applicabile. Qualsiasi standard per la denominazione e/o la descrizione delle modalità di ventilazione deve essere immediatamente applicabile ad una varietà di usi, anche tenendo conto di tutte le sue complessità. Se per i medici diventa di estrema necessità poter auspicare, comunicare e descrivere ordini di assistenza di base che siano di facile comprensione ed applicazione direttamente al posto letto del paziente, per l'operatore del ventilatore è fondamentale che sia ben chiara la completa descrizione operativa del ventilatore in uso, così come tutte le specifiche operative che dovranno essere riportate in modo esaustivo e senza possibili fraintendimenti nel manuale a corredo. Resta ovvia la necessità dell'ingegnere preposto alla progettazione di creare efficienti interfacce ventilatore-operatore. Un sistema di classificazione delle modalità ventilatorie che soddisfi queste esigenze deve essere applicabile a qualsiasi tipologia di ventilatore.
4. Tutta la terminologia proposta per un sistema di classificazione standard relativo alle modalità ventilatorie deve essere esplicitamente definita. Questa è senz'altro una delle questioni più importanti da affrontare visto che con l'evoluzione tecnologica il suo lessico si diversifica diventando inevitabilmente fuorviante.

Scopi della ventilazione meccanica

La ventilazione meccanica viene attuata applicando dall'esterno un flusso con pressione positiva che entra nelle vie aeree (trachea e polmoni) mediante l'utilizzo di una protesi respiratoria. Il paziente che necessita di una ventilazione meccanica, ha bisogno di un supporto per la ventilazione e/o per l'ossigeno. Questa tipologia di ventilazione è indicata quando l'attività respiratoria del paziente, non essendo in grado di sostenere un'adeguata ventilazione alveolare va a sostituire, integrare e supportare la ventilazione spontanea, fornendo l'energia necessaria ad assicurare un adeguato flusso, pressione e volume di gas negli alveoli durante l'inspirazione.

Le finalità della ventilazione meccanica sono:

- migliorare gli scambi gassosi, incrementando la PaO_2 e riducendo la $PaCO_2$ con conseguente correzione dell'acidosi respiratoria;
- mettere a riposo i muscoli respiratori con riduzione del consumo di ossigeno per ogni atto respiratorio;
- prevenire o risolvere un'atelettasia (alterazione di una zona polmonare caratteriz-

zata da mancata o imperfetta dilatazione del polmone), che può essere determinata da una mancata ventilazione, da un'occlusione bronchiale o da una compressione del polmone, in attesa che si risolva un'insufficienza respiratoria;

- ottimizzazione dei volumi polmonari;
- riduzione del lavoro respiratorio;
- miglioramento della qualità della vita.

L'indicazione principale alla ventilazione meccanica è l'insufficienza respiratoria, definita come "inabilità dei polmoni ad eseguire adeguatamente uno scambio di gas". I ventilatori meccanici utilizzano la pressione positiva sia per supportare lo scambio dei gas che per scaricare i muscoli respiratori. Nei pazienti che respirano spontaneamente, i muscoli respiratori forniscono una pressione alveolare sostanzialmente negativa per "trasportare" l'aria attraverso la componente resistiva (vie aeree) così come per "gonfiare" la componente elastica (polmoni e parete toracica). Se si verifica un aumento nella resistenza delle vie aeree, o polmonare o di rigidità toracica, i muscoli respiratori dovranno lavorare alacremente per raggiungere lo stesso grado di flusso d'aria. Questo aumento di lavoro può dar luogo ad una fatica muscolare respiratoria tanto da causare un danno respiratorio. L'aumentata resistenza delle vie aeree può essere originata non soltanto da disordini delle basse vie aeree (come ad esempio in caso di asma o bronco-pneumopatia cronica ostruttiva – BPCO) ma anche da disordini delle vie aeree superiori, come ad esempio l'edema laringeo. L'aumento della rigidità polmonare può essere causato da: accumulo di secrezioni nel parenchima polmonare (cardiogeno o edema polmonare non cardiogeno), infezione polmonare, emorragia polmonare e fibrosi polmonare. L'aumento della rigidità della parete toracica può svilupparsi a causa della cifoscoliosi. Da notare che la distensione addominale, se provocata da asciti massive, obesità o gravidanza, aumenta il lavoro respiratorio perché il diaframma deve spendere più energia per abbassarsi durante l'inspirazione. Con la ventilazione meccanica, il lavoro respiratorio viene gestito dal ventilatore in modo da "scaricare" i muscoli respiratori. Di conseguenza, essi richiederanno una minore percentuale di gittata cardiaca che permetterà di poter veicolare il sangue ad altri organi essenziali come il cervello, il cuore ed i reni. Un ventilatore è quindi soltanto una parte di un sistema di ventilazione.

La ventilazione meccanica è altamente rischiosa, non solo perché la respirazione è vitale e non permette interruzioni, ma anche perché con la IPPV un paziente ventilato respira esclusivamente attraverso un sistema di ventilazione a gas. Se la terapia non è corretta clinicamente (o tecnicamente), la sicurezza del paziente può essere messa immediatamente in pericolo. La ventilazione meccanica è complessa, perché richiede che un medico abbia competenze specialistiche oltre alle conoscenze e competenze proprie della medicina clinica generale. L'esito clinico di questa terapia dipende fortemente dalle conoscenze specialistiche acquisite dagli operatori sulla ventilazione meccanica. Un medico valente in medicina clinica non può ritenersi automaticamente qualificato

ad eseguire la ventilazione meccanica, cosa che risulta essere particolarmente laboriosa. Oltre a richiedere l'esperienza legata al lavoro di routine tipica del medico, la ventilazione meccanica richiede un lavoro specifico per la terapia ventilatoria da adottare. Ciò include la capacità di definire e modificare all'occorrenza la strategia terapeutica, l'assemblaggio e la manutenzione del sistema di ventilazione, il controllo e la regolazione delle impostazioni del ventilatore, la risposta agli allarmi e la risoluzione dei problemi, la gestione delle vie aeree e della nebulizzazione e dell'umidificazione nonché occuparsi della relativa documentazione. La ventilazione meccanica può indurre in errore, perché è complessa e laboriosa. Gli errori in questo campo si verificano molto più frequentemente di quanto si immagini ed alcuni di essi con esiti anche molto gravi. Un paziente in genere viene ventilato per un periodo che va da diverse ore a diversi giorni, fino a coprire periodi molto più lunghi. Diversi medici operano in alternanza perché legati a turnazioni diverse (esperti e novizi contemporaneamente) con l'onere di eseguire terapie anche sugli stessi pazienti. La qualità della terapia su un singolo paziente può variare relativamente all'esperienza dei medici preposti al servizio e di quanto bene essi riescano a comunicare tra loro ed a trasmettersi informazioni utili. In gran parte la ventilazione meccanica definisce la durata della degenza nell'unità di terapia intensiva. Per ottenere quindi il miglior risultato possibile dalla ventilazione meccanica, i medici devono essere dotati di due tipi di competenze: conoscenze cliniche e conoscenze specifiche della ventilazione meccanica.

Conclusioni

La progettazione del ventilatore meccanico ha avuto una rapida evoluzione negli ultimi 40 anni. Le capacità del ventilatore superano a volte sia le prove scientifiche di efficacia che la comprensione dell'operatore. Il divario di conoscenza esistente tra produttori e utenti finali è dovuto in gran parte all'assenza di un lessico standardizzato. Un vocabolario condiviso dipende dalla conoscenza di modelli analitici piuttosto semplici, di schemi di interazione e controllo ventilatore-paziente. La maggior parte dell'istruzione sul tema della ventilazione meccanica è condotta nelle sedi preposte alla formazione dai rappresentanti dei produttori. Per questo motivo, i progettisti sono in una posizione privilegiata che gli permette di guidare il cambiamento nel settore della comunicazione. Risultati positivi si ottengono semplicemente adottando standard e terminologie informali per i manuali degli operatori ad opera dei produttori. Pur essendo i ventilatori meccanici progettati e realizzati da un pool di ingegneri, quasi tutti i libri di testo sul tema della ventilazione meccanica, sono scritti da e per i medici. Evidente è il divario di comunicazione tra i produttori e gli operatori dei ventilatori cosa che molta frustrazione causa ad entrambi.

Scopo di questo libro è quello di contribuire a colmare questo divario chiarendo la terminologia in uso, omologandola e delineando i modelli concettuali adottati per pro-

gettare e utilizzare i ventilatori meccanici. Il testo si rivolge idealmente ad un'ampia fascia di lettori, che va dai "veterani" della ventilazione meccanica, a chi da poco si avvicina a questo affascinante mondo. Ed è per questa presupposta eterogeneità che si è ritenuto dettagliare episodicamente alcuni concetti fondamentali per taluni, ritenuti sicuramente superflui per gli altri. Essendo supportato da una solida base di studi ingegneristici, per deformazione professionale l'autore ha ritenuto di ben evidenziare i concetti fisici ed ingegneristici che sottintendono i temi trattati, per meglio chiarirne le dinamiche e le problematiche ad essi relativi.

TOMO I
L'ingegneria
dell'apparato respiratorio

1. Leggi fondamentali rilevanti sui gas per la terapia intensiva

1.1. Fisica rilevante per la fisiologia respiratoria

Legge di Boyle

Per una massa fissa di gas a temperatura costante, la pressione (P) e il volume (V) sono inversamente proporzionali, in modo tale che $P \times V = k$, dove k è una costante.

Legge di Charles

Il volume occupato da una massa fissa di gas a pressione costante è direttamente proporzionale alla sua temperatura assoluta ($V/T = k$).

Legge di Gay-Lussac (Terza legge sui gas)

La pressione di una massa fissa di gas a volume costante è direttamente proporzionale alla sua temperatura assoluta ($P/T = k$).

Legge di Avogadro

Gli stessi volumi di gas alla stessa temperatura e pressione contengono lo stesso numero di molecole ($6,023 \times 10^{23}$, numero di Avogadro).

Legge universale (ideale) dei gas

Lo stato di una massa fissa di gas è determinato dalla sua pressione, volume e temperatura ($PV = nRT$).

Legge di Henry

A temperatura costante, la solubilità di un gas è direttamente proporzionale alla pressione che il gas esercita sulla soluzione. Raggiunto l'equilibrio, il liquido si definisce saturo di quel gas a quella pressione:

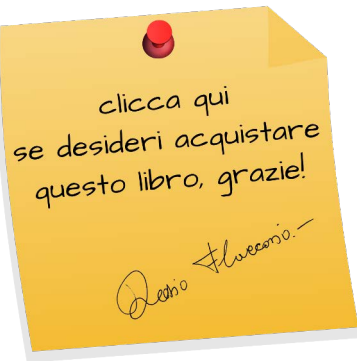
$$P = k \times M$$

dove

P è la pressione

M è la concentrazione molare di gas

k è la costante di proporzionalità di Henry.



clicca qui
se desideri acquistare
questo libro, grazie!

Dario Flacciano.