

Ventilador Artificial e os Conceitos Fundamentais

• Fernando Sabia Tallo • Hélio Penna Guimarães

Ventiladores artificiais

Os ventiladores artificiais são capazes de bombear os gases para dentro dos pulmões, vencendo as forças de oposição ao movimento de forma periódica, permitindo intervalos para a exalação passiva do volume inspirado.² O capítulo abordará apenas a forma de ventilação com pressão positiva.

Este capítulo pretende apresentar ao leitor as noções básicas do funcionamento de um ventilador artificial e os conceitos fundamentais da ventilação mecânica.

O ventilador

De forma simplificada, o ventilador moderno é constituído de válvulas reguladoras, válvulas de controle de fluxo, válvula de exalação, transdutores de pressão e fluxo, microprocessadores, monitor e painel de controle.

Habitualmente o fornecimento de gases em hospitais é feito por uma rede de gases de pressão nominal de trabalho. Os gases dessa rede deverão ter sistema de manometria de trabalho regulável entre 3,5 e 4,5 kgf · cm⁻² (343-441 Kpa).

O oxigênio e o ar comprimido entram no ventilador através de conexões rosqueadas, conforme norma NBR12188/2003 em uma pressão de alimentação que varia em diferentes ventiladores (pressão de trabalho do ventilador).

Os gases, oxigênio e ar comprimido, passam então pelas chamadas válvulas reguladoras para a redução das pressões de alimentação.

Depois, cada gás seguirá para o misturador de ar e oxigênio associado às válvulas de fluxo, o aparelho fornecerá para o paciente a quantidade de cada gás, a cada instante, conforme desejo do operador em relação à mistura pretendida. (fração inspirada de Oxigênio 21%-100%)

Os transdutores de pressão e fluxo transformam os sinais pneumáticos em sinais elétricos. As medidas de volume são obtidas através dos sinais de fluxo. Calculando a integral do fluxo em relação ao tempo.

A mistura de gases, dessa forma, nos ventiladores modernos é controlada eletronicamente através de válvulas nas quais se aplicam correntes elétricas que são reguladas para gerar fluxos proporcionais e, finalmente, proporcionar ao ramo inspiratório do circuito do paciente o fluxo pretendido.

O ramo expiratório do circuito do paciente é então conectado a outra válvula, a de exalação completando-se o circuito da ventilação.

Resumindo

Uma válvula de fluxo é alimentada por ar/ou oxigênio e sua saída é ligada ao ramo inspiratório do circuito respiratório do paciente. O ventilador inicia a fase inspiratória abrindo essa válvula e fechando a de exalação. (Expansão pulmonar)

Uma válvula de exalação é conectada a extremidade do ramo expiratório do circuito. Fecha-se a válvula de fluxo e abre-se a de exalação. (Esvaziamento pulmonar, força elástica do próprio pulmão a favor do esvaziamento)

Transdutores de pressão e fluxo são conectados ao sistema, o volume fornecido é medido através da integração do sinal de fluxo pelo microprocessador. "A taxa de fluxo nada mais é que a movimentação de determinado volume, em determinado tempo".

A partir de possíveis mudanças em tempo real da mecânica respiratória, e informações apresentadas ao microprocessador através de um sistema de "realimentação", (sensores) os parâmetros ventilatórios são realinhados conforme configurados no painel de controle.

O ventilador

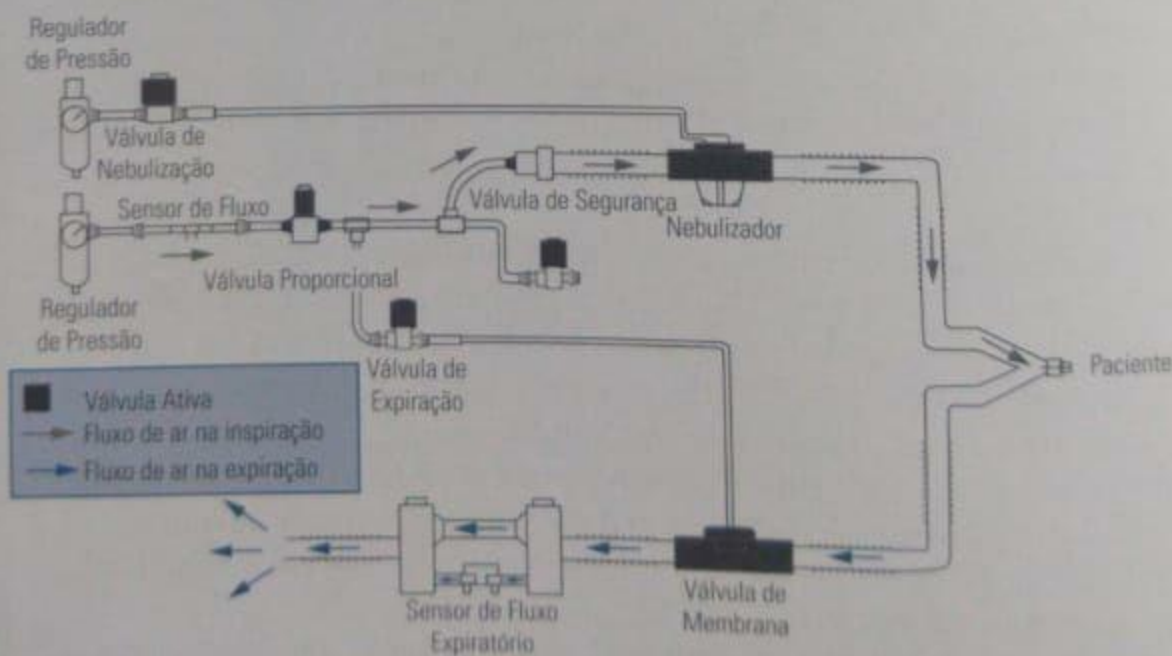


Figura 8.1 ♦ Modelo de um ventilador genérico.

Classificação dos ventiladores mecânicos¹

A ventilação mecânica basicamente é feita através do uso de pressão positiva nas vias aéreas, ao contrário do que se utilizava no início do seu uso clínico que era a pressão negativa. Dessa forma, pode-se dividir a ventilação da pressão positiva em quatro fases: (Figura 8.2)

1. Fase inspiratória;
2. Mudança da fase inspiratória para a fase expiratória;
3. Fase expiratória;
4. Mudança da fase expiratória para a inspiratória;

O ventilador pode ser classificado:

- a) Quanto à forma de insuflação do gás:

- **Gerador de fluxo constante:** vence qualquer obstáculo e é interrompido apenas quando o volume desejado for alcançado, o fluxo não pode ser alterado durante a insuflação.
- **Gerador de força constante:** o fluxo será variável com as condições de complacência e resistência estando vulneráveis as modificações da mecânica respiratória.

Observação

Atualmente, o fluxo decrescente é obtido através de um sistema eletrônico aplicado diretamente na saída de um gerador de fluxo constante, fechando esse último de modo estereotipado, sempre do mesmo modo, ciclo a ciclo. Desse jeito obtém-se eletronicamente um fluxo em desaceleração.

- b) Quanto à ciclagem (passagem da fase inspiratória para expiratória)

- **Volume:** transdutores de fluxo acoplados a circuitos eletrônicos monitoram o volume insuflado e interrompem a insuflação ao detectar o volume preestabelecido.
- **Pressão:** um sistema de membrana acoplada a um dispositivo que interrompe a insuflação à medida que aumenta a pressão nas vias aéreas e circuito respiratório.
- **Tempo:** nos aparelhos modernos a contagem de tempo é feita por circuitos eletrônicos que interrompem a insuflação.
- **Fluxo:** através de transdutores de fluxo e circuitos eletrônicos interrompem a insuflação quando a velocidade

Curva de fluxo – Ventilação controlada por volume

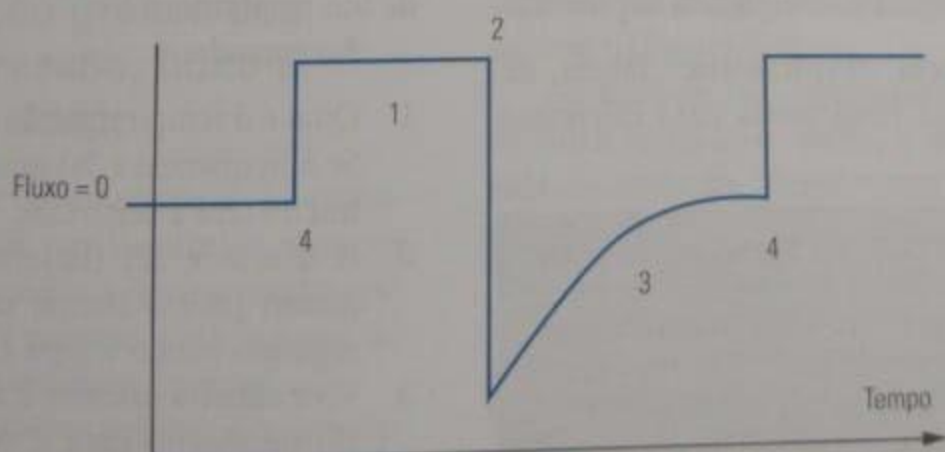


Figura 8.2 • Fases do ciclo respiratório.

c) Quanto à forma de desinsuflação do gás:

- **Passiva:** não há intervenção do ventilador, ZEEP (*zero end expiratory pressure*).
- **Modulada:** o aparelho permitirá a desinsuflação passiva até certo ponto, a partir do qual deixará um volume residual nos pulmões. PEEP (*positive end expiratory pressure*).
- **Ativa:** aspiração de volume por mecanismo de Venturi. NEEP (*negative end expiratory pressure*).

d) Classificação segundo a ciclagem E/I (disparo):

- **Assistores:** dispositivo sensível a pressão ou fluxo detecta esforço do paciente.
- **Controladores:** mecanismo de tempo para início do ciclo pelo aparelho.
- **Assisto-controladores:** funciona nos dois modelos descritos anteriormente.

Regulando os ventiladores artificiais

Os parâmetros fundamentais são: volume corrente, relação I/E e frequência respiratória.

1. **Frequência respiratória:** Tabela de frequência respiratória para diferentes idades

Neonatos (0 a 28 dias)	40 a 60 ciclos por minuto
Lactentes (29 dias a 1 ano)	30 a 40 ciclos por minuto
Crianças (1 a 12 anos)	20 a 30 ciclos por minuto
Adultos (acima de 12 anos)	a 20 ciclos por minuto

2. Relação I/E sugerida:

- crianças 1:1
- adultos 1:2
- idosos 1:3

3. Volume corrente (varia com situações clínicas específicas):

- Adulto 10 ml/kg de peso
- Crianças 7 ml/kg de peso

O ideal seria você encontrar esses parâmetros fundamentais no painel do ventilador. Porém em muitos ventiladores você precisará regulá-los com parâmetros indiretos.

Esses parâmetros, obviamente, são iniciais e devem ser modificados na evolução específica de cada paciente.

Exemplo:

Lactente com 11 meses de vida e 9 kg necessita de ventilação mecânica.

Pelas nossas sugestões, os parâmetros fundamentais seriam:

- Frequência respiratória: 30 ipm
- Volume corrente: 7ml/kg de peso (9 kg), logo, 63 ml
- Relação I/E = 1/1

Você saberia calcular o tempo inspiratório e o expiratório para colocar no painel de um respirador?

Acompanhe.

1. Qual é o tempo total de cada ciclo? Se a frequência é 30/minuto, cada ciclo inteiro terá 2 segundos.
2. A relação é 1/1 (lactente), logo, 1 segundo para o tempo inspiratório e 1 segundo para o tempo expiratório.
3. Você saberia calcular o fluxo inspiratório necessário para a ventilação dessa criança?

Acompanhe.

1. Qual o volume corrente que devemos oferecer à criança?

- 7ml/kg de peso, logo 63 ml. Sabemos que o tempo inspiratório é 1 segundo. Portanto, precisamos ofertar 63 ml/s. Em 1 minuto (60 segundos) precisaremos ofertar $60 \times 63 = 3.780$ ml/minuto, ou seja, 3, 8 litros/minuto será o fluxo em l/min.

Controles de segurança dos ventiladores

São sistemas dos aparelhos para evitar hipoventilação e barotrauma.

Os ventiladores volumétricos possuem um controle de segurança que estabelece um limite para a pressão gerada na insuflação, esse dispositivo permite um vazamento do excesso de volume para evitar o barotrauma. (Figura 8.1)

Diversos outros controles de segurança estão presentes nos ventiladores modernos como, por exemplo, o controle do tempo de apneia que faz o aparelho assumir o controle da ventilação quando o paciente em modo assistida ou espontânea entra em depressão respiratória.

Apresentação gráfica dos sinais de pressão, fluxo e volume no tempo

Agora que você já entendeu o funcionamento básico de um ventilador artificial moderno, acompanhe a representação gráfica do fluxo, da pressão e do volume de um paciente em ventilação mecânica.

Suponhamos um paciente em ventilação mecânica controlada em que o fluxo constante ofertado pelo aparelho seja de 60

l/min de forma constante durante a fase da inspiração. Vamos fixar o tempo de duração da inspiração em 1 segundo. Verifique na Figura 8.3 como ficaria sua representação gráfica nessa fase.

Abre-se a válvula de fluxo, inicia a fase inspiratória (setas):

Ao final da fase inspiratória, a válvula de fluxo fecha-se e, então, é aberta a válvula de exalação. Nesse momento o fluxo é zero. (seta)

A própria força gerada pela entrada do gás no sistema respiratório e suas propriedades elásticas geram uma força motriz para o fluxo, o seu valor numérico vai depender da magnitude dessas propriedades no paciente e agora em sentido contrário (negativo na representação gráfica) abandona os pulmões, até atingir novamente o valor zero que indica o esvaziamento total dos pulmões do paciente.

Vamos agora representar o gráfico do volume ao longo do tempo.

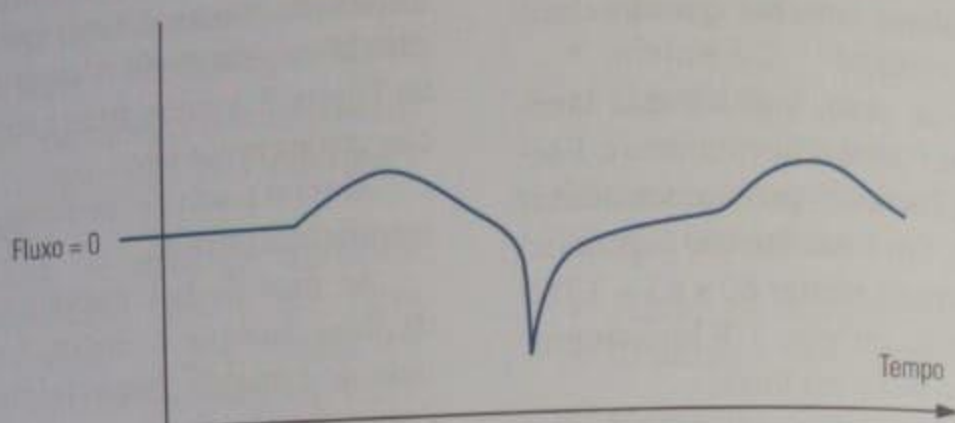
O volume é a integral do fluxo em relação ao tempo, ou seja, é a área entre a curva do fluxo no tempo. Se o fluxo é de 60 l em 1 minuto, ou transformando em litros por segundo, o aparelho fornecerá 1 litro em 1 segundo para a fase da inspiração de forma constante.

O aumento do volume será, linear, constante ao longo da fase inspiratória de 1 segundo até atingir 1 litro nos pulmões do paciente. (Figura 8.4)

Ao final da fase inspiratória, a válvula de fluxo fecha-se e, então, é aberta a válvula de exalação. Nesse momento o fluxo é zero. (seta)

Com a abertura da válvula de exalação, inicia-se o esvaziamento do pulmão. Observe que a forma da curva de volume na fase expiratória (seta) não é linear. Durante a fase expiratória o volume diminui de forma exponencial.

Ventilação espontânea



Ventilação controlada por volume

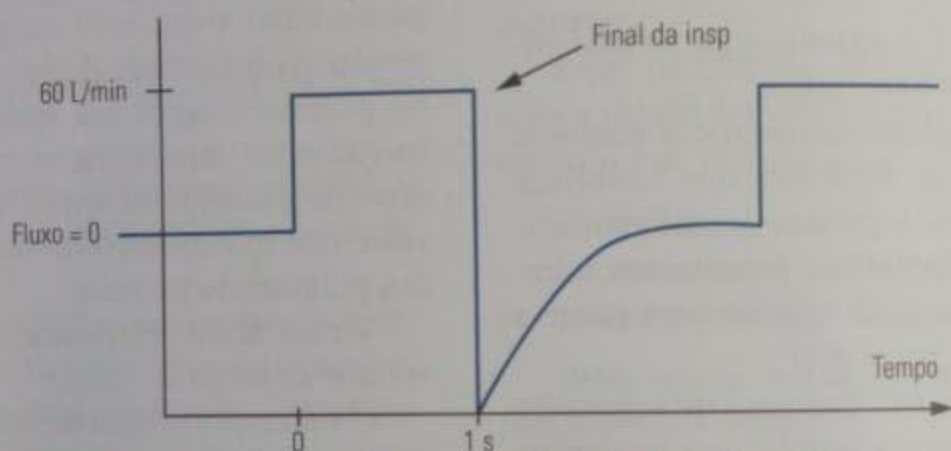


Figura 8.3 ♦ Curvas de fluxo x tempo.

Vamos agora representar o gráfico da pressão ao longo do tempo (Figura 8.5).

Quando da abertura da válvula de fluxo, no início do fluxo inspiratório, há um aumento repentino da pressão que corresponde à pressão necessária para vencer as forças contrárias ao movimento dos gases através das vias aéreas (seta preta). À medida que o sistema respiratório se expande com suas estruturas elásticas, há um aumento progressivo da pressão até atingir o seu ponto máximo (pressão de pico) ao final da fase inspiratória com o volume máximo no sistema.

Ao final da fase inspiratória, a válvula de fluxo fecha-se e, então, é aberta a válvula de exalação. Nesse momento o fluxo é zero.

Observe que ao final da fase expiratória podemos manter uma pressão na via aérea, mantendo a válvula de exalação apenas parcialmente fechada, mantendo um pequeno volume de gás dentro dos pulmões. A pressão expiratória dessa forma é mantida positiva ao final da expiração e não com valor zero, PEEP (*positive end expiratory pressure*).

Agora, para entendermos os valores numéricos gerados com o exemplo, vamos aprender os conceitos fundamentais da ventilação mecânica.

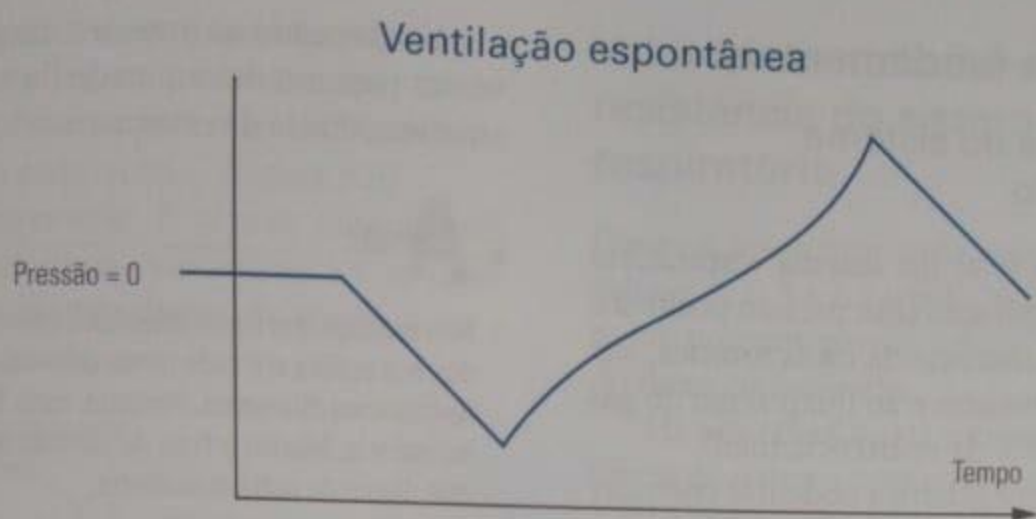


Figura 8.4 ♦ Pressão x Tempo.

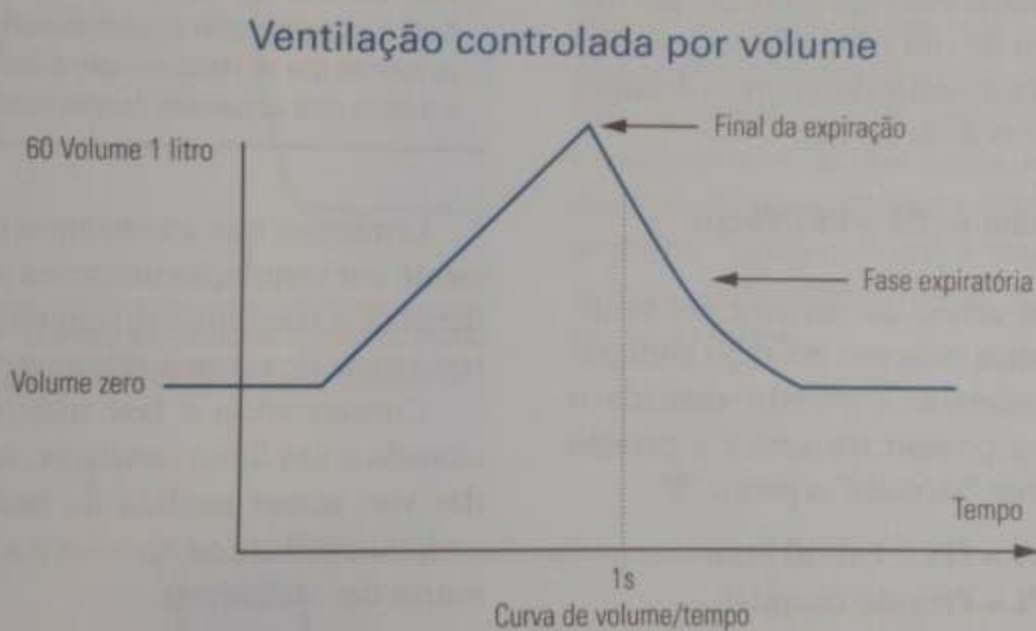


Figura 8.5 ♦ Volume x Tempo.

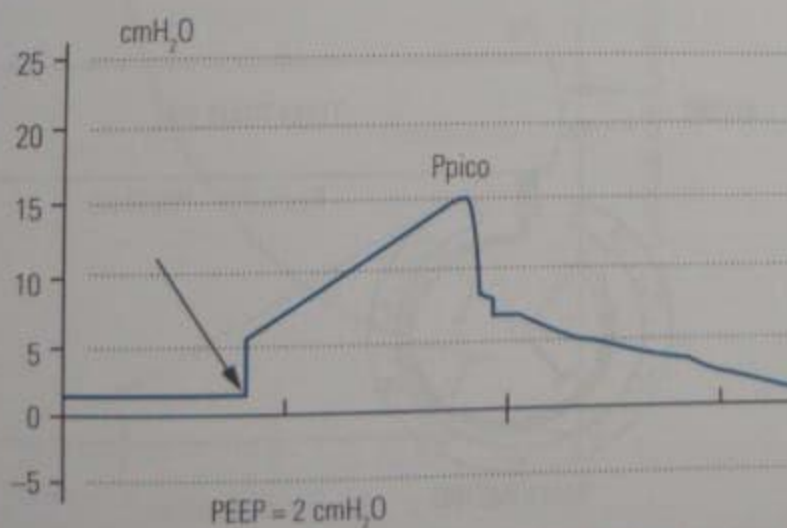


Figura 8.6 ♦ Pressão x Tempo.

Conceitos fundamentais

Resistência do sistema respiratório

A resistência total do sistema respiratório durante a respiração com pressão positiva é a soma da resistência da caixa torácica, aos tecidos pulmonares e ao fluxo aéreo do gás insuflado (80% da resistência total).

De maneira genérica podemos entender que é necessária uma pressão para alterar o volume pulmonar (pressão elástica) e outra para gerar o fluxo (pressão resistiva).

A resistência exercida sobre um gás que passa dentro de um tubo relaciona a diferença de pressão entre dois pontos distintos desse tubo e o fluxo do gás.

$$R_{\text{tubo}} = (P_A - P_B) / \text{Fluxo}$$

Nas vias aéreas do paciente em ventilação mecânica com uso do tubo endotraqueal, considera-se a pressão exercida o ponto "A", a pressão traqueal e a pressão intrapulmonar "alveolar" o ponto "B".

$$(R_v = (P_t - P_{alv}) / \text{Fluxo}$$

P_t = Pressão traqueal

Conhecendo as pressões traqueais e alveolar para um determinado fluxo, calcula-se a resistência das vias aéreas do paciente.

Atenção

1. Não esqueça que fluxos diferentes estarão relacionados a pressões em cada ponto diferente e logo para resistências diferentes. Portanto, cada fluxo tem sua resistência. Mudou o fluxo do ventilador? Logo estamos diante de outra resistência.
2. No caso de fluxos ofertados pelos ventiladores, não constantes, por exemplo, decrescentes, a resistência varia durante a fase inspiratória.
3. Esse aumento da resistência com a elevação do fluxo é explicado pelo estabelecimento de um fluxo turbulento que se relaciona com a densidade do gás e o atrito com as paredes do tubo (tubo + via aérea).

Lembre-se que a resistência total do paciente em ventilação mecânica a ser considerada é a resistência do circuito somado a resistência do sistema respiratório.

Considerando a fase inspiratória relacionada a um fluxo constante, a resistência das vias aéreas medida da saída do tubo endotraqueal até os alvéolos é a pressão resistiva das vias aéreas.

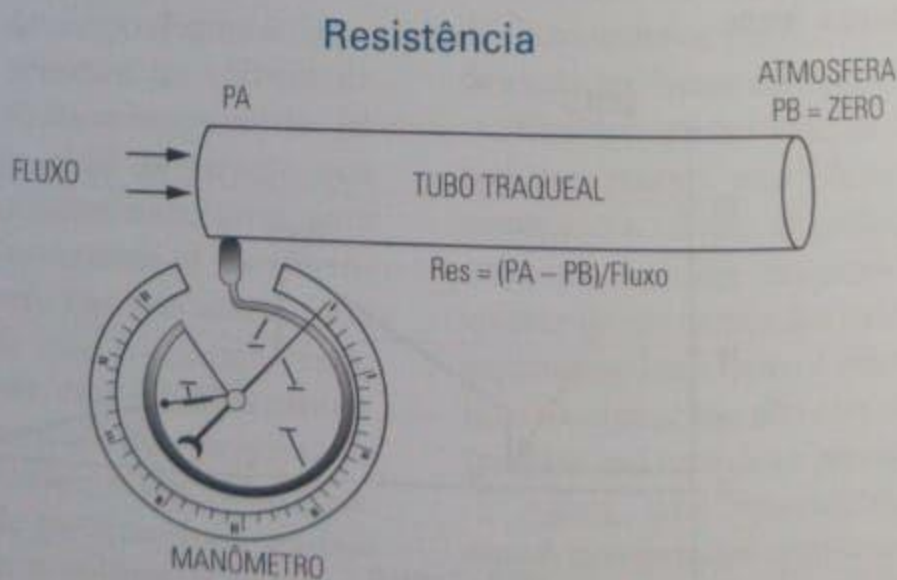


Figura 8.7 • Representação esquemática da resistência.

Realizando uma pausa inspiratória e analisando a curva pressão/tempo, determinam-se os componentes da resistência do sistema respiratório. (Figura 8.8)

O componente P abaixo compreende as forças elásticas. Viscoelástica e as desigualdades não constantes de tempo.

Valores normais da resistência do sistema respiratório

Como a resistência varia com o fluxo, os valores de 0,5 a 2,5 $\text{cmH}_2\text{O}/\text{l/s}$ são considerados normais para o adulto dependendo do fluxo considerado.

Há um cálculo para estimativa da resistência do sistema respiratório na criança de 7 a 12 anos.

$$R_{va} = 16,9 - (0,089 \times H) \text{ cmH}_2\text{O}/\text{l/s}$$

Outra consideração importante em relação à resistência das vias aéreas é que com a compressão dinâmica das vias aéreas na expiração com conseqüente diminuição do raio das vias aéreas, a resistência das vias aéreas é maior na expiração. Observe na Figura 8.9 que a medida que o volume pulmonar diminui a resistência tende ao infinito.

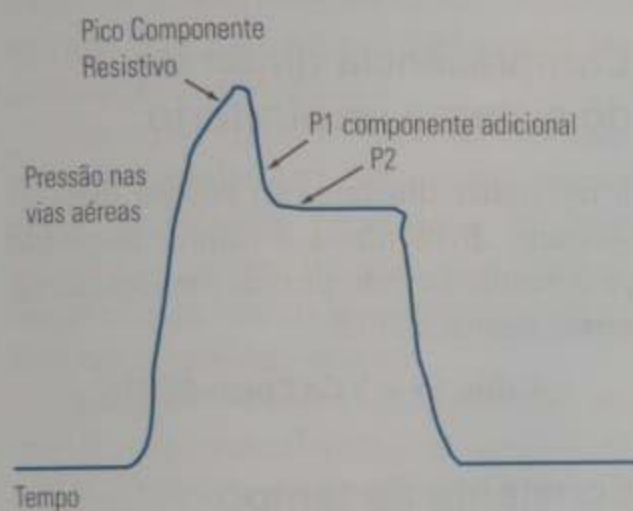


Figura 8.8 ♦ Gráfico de pressão x tempo, modo volume controlado com onda de fluxo quadrada.

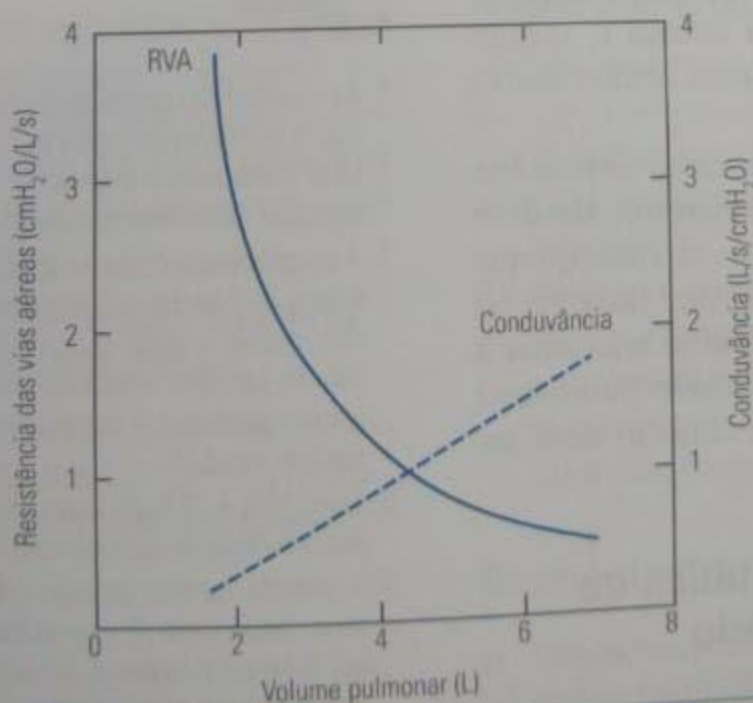


Figura 8.9 ♦ Relação entre volumes pulmonares e variações na resistência e condutância das vias aéreas.

As medidas da resistência respiratória na prática clínica serão abordadas no manual de fisioterapia.

Complacência do sistema respiratório

Agora vamos desenvolver o conceito de complacência do sistema respiratório.

O volume pulmonar que expande os pulmões durante a fase inspiratória gera uma força contrária e proporcional à deformação produzida nas estruturas elásticas do sistema respiratório. Essa força distribuída pela área de superfície do pulmão gera uma pressão intrapulmonar.

Imagine os tecidos dos pulmões e do tórax (fibras elásticas) como molas distendidas por uma força externa (musculatura da inspiração), quando essa força cessa os tecidos (sistema respiratório retorna à posição original).

A relação da variação entre o volume inspirado e essa pressão intrapulmonar gerada é a complacência do sistema respiratório.³

Portanto, quanto maior a complacência, mais distensível será o sistema e, quanto menor a complacência, mais rígido ("duro") será o sistema.

Caso haja PEEP (pressão expiratória positiva no final da expiração), ela deve ser descontada da pressão elástica. (Já que está sendo somada a pressão final, "pressurizando" o sistema, sem se relacionar a pressão gerada pela insuflação pulmonar.) O PEEP_i, caso houver, também deve ser subtraído.

Complacência estática do sistema respiratório

É a soma das complacências estáticas da caixa torácica e pulmonar

$$C_{est, sr} = C_{pulm} + C_{cx}$$

$C_{est, Sr}$ – complacência estática do sistema respiratório (100 ml/cmH₂O); C_{pulm} – complacência pulmonar (200 ml/cmH₂O); C_{cx} – complacência da caixa torácica

$$C_{est, Sr} = Vol/P_{pla-PEEP}$$

P_{pla} – pressão de platô

Complacência dinâmica do sistema respiratório

É um índice dinâmico da relação pressão-volume, dividindo-se o volume fornecido pelo ventilador pelo pico de pressão das vias aéreas menos a PEEP.

$$C_{din, Sr} = VC/(P_{pico-PEEP})$$

Constante de tempo

O produto da resistência da via aérea e da complacência estática define a constante de tempo.

Atenção

1. As medidas da complacência estática são realizadas com a utilização de pausa ao longo do ciclo respiratório (fluxo zero) e o paciente com bloqueio neuromuscular ou profundamente sedado.
2. A complacência depende do volume pulmonar total, é mais fácil encher o pulmão normal de uma pessoa com grande volume pulmonar, do que encher um pulmão também normal de uma pessoa com menor volume pulmonar. A complacência na criança é menor que no adulto.
3. Entre 25% e 75% da capacidade pulmonar total, a complacência do sistema respiratório é constante.
4. A pressão ao final da expiração pode não voltar a zero, nesse caso a uma outra variável pressórica PEEP_i (pressão residual nas vias aéreas ao final da expiração) que também deve ser subtraída da pressão elástica.

A constante de tempo traduz a velocidade com que uma unidade pulmonar se enche ou se esvazia.

$$\dot{T} = Rva \cdot Cst$$

Fica fácil para o leitor perceber que quanto maior a complacência, menor a pressão elástica desenvolvida e menor a força motriz para o esvaziamento. E quanto maior a resistência, menor o fluxo para determinada pressão elástica.

Por outro lado, se uma determinada unidade alveolar tem uma constante de tempo aumentada necessitaria de mais tempo para encher do que outra. Essa situação causa dentro dos pulmões alterações na distribuição gasosa.

Sendo o esvaziamento pulmonar um modelo exponencial com a necessidade de cinco constantes de tempo para o seu esvaziamento, é possível o cálculo do tempo expiratório necessário para seu total esvaziamento.

Equação geral da ventilação

Depois das considerações dos conceitos de resistência, complacência, é possível durante a fase inspiratória com o paciente em ventilação controlada, calcular a medida da pressão da via aérea realizada na entrada do tubo endotraqueal:⁴

$$Pva = Pres + Pel + PEEP = Rva \cdot \text{fluxo} + \text{volume}/Csr + PEEP$$

Pva – Pressão das vias aéreas; Pres – Pressão resistiva; Rva – Resistência das vias aéreas; Csr – Complacência do sistema respiratório

Ao final da fase inspiratória, com o fechamento da válvula de fluxo e a abertura da válvula de exalação, a força motriz para o fluxo expiratório é igual a pressão elástica no interior dos pulmões sendo possível o

cálculo do fluxo expiratório no início da expiração.

$$Rva = Pel/\text{fluxo}$$

Exercícios

Considere o paciente A em modo controlado a volume sendo ventilado com os seguintes parâmetros:

- Fluxo inspiratório constante de 30 l/min (quadrado)
- Volume corrente de 500 ml
- PEEP = 5 cmH₂O
- Tempo inspiratório de 1 segundo
- Tempo expiratório de 2 segundos

Considere as seguintes características da mecânica respiratória:

- Resistência de 10 cmH₂O/l/s
- Complacência de 0,1 l/cmH₂O

Calcule a pressão da via aérea medida na entrada do tubo endotraqueal de um paciente em ventilação mecânica, controlada e com bloqueio neuromuscular completo com fluxo constante durante a inspiração. Imagine o início do ciclo no instante T1.

- Calcule a Pva no instante T1
- Calcule a pressão da via aérea no final da inspiração. (Pressão de pico)
- Calcule o fluxo expiratório no início da expiração
- Calcule a constante de tempo expiratória e o tempo necessário para o total esvaziamento dos pulmões do paciente considerando a válvula de exalação ideal (não oferece resistência)

Respostas dos exercícios

- Vamos recordar a equação do movimento (simplificação do modelo, considerando unicompartmental)

$$Pva = Pres + Pel + PEEP = Rva \cdot \text{fluxo} + \text{volume}/Csr + PEEP$$

No instante T_1 , o volume é zero, não há pressão elástica apenas resistiva, então

$$Pva = Rva \cdot \text{fluxo} + \text{zero} + PEEP$$

(fluxo em litros por segundo)

$$Pva = 10 \cdot 0,5 + 5 = 10 \text{ cmH}_2\text{O}$$

b) Ao final da inspiração

$$Pva = Pres + Pel = 10 \cdot 0,5 + 0,5/0,10 + 5 =$$

$$Pva = 15 \text{ cmH}_2\text{O}$$

c) No início da expiração:
Supondo resistência, inspiratória e a expiratória:

$$Rva = \frac{Pel}{\text{Fluxo exp.}}$$

$$\text{Fluxo exp.} = \frac{\text{Vol}/Csr}{Rva}$$

$$\text{Fluxo exp.} = 0,5 \text{ L/s}$$

d)

$$T = Rva \cdot csr$$

$$T = 10 \cdot 0,1$$

$$Ts$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Munechika M. Ventiladores de pressão positiva: classificação e funcionamento. *Rev Bras Anestesiol.* 1996;46(3):175-86.
2. Stoller JK. Physiologic rationale for resting the ventilatory muscles. *Resp Care.* 1991;36:290-6.
3. Mushin WW, Rendell-Baker L, Thompson PW, Mapleson WW. Automatic ventilation of the lungs, 3rd ed. Oxford: Blackwell; 1980. p. 887.
4. Rossi A, Gottfried SB, Zocchi L, et al. Measurement of static compliance of the total respiratory system in patients with acute respiratory failure during mechanical ventilation. *Am Rev Resp Dis.* 1985;131:672-7.
5. Bonassa J. Mathematical model for a mode of artificial ventilation: volume and pressure supported ventilation - a comparative study. *Art Org.* 1965;19:256-62.
6. Piskounov N. Cálculo diferencial e integral. 3ª ed. Porto: Lopes da Silva; 1977. p. 134.
7. Bates JHT, Rossi A, Milic-Emili J. Analysis of the behavior of the respiratory system with constant inspiratory flow. *J Appl Physiol.* 1985;58:1840-8.
8. Chatburn RL. A new system for understanding mechanical ventilators. *Resp Care.* 1991;36:1123.