

Avaliação da forma de onda do ventilador passo a passo para diagnosticar a fisiopatologia pulmonar

Brigid C. Flynn, MD, Haley G. Miranda, MD, Aaron M. Mittel, MD, Vivek K. Moitra, MD, MHA, FCCM

E As formas de onda do ventilador exibidas eletronicamente fornecem uma riqueza de informações sobre a fisiologia do sistema respiratório. Os valores de pressão e fluxo podem ser variáveis independentes que refletem o controle pelo ventilador ou variáveis dependentes que demonstram a resposta do sistema respiratório à ventilação mecânica. Diagramas de curvas de pressão e fluxo baseadas no tempo podem revelar a fisiopatologia subjacente além dos parâmetros mais comumente avaliados, como pressão de pico nas vias aéreas, frequência respiratória e volume corrente. Nesta revisão narrativa, apresentamos uma abordagem gradual que os médicos podem adotar para diagnosticar a fisiopatologia pulmonar usando formas de onda do ventilador em pacientes que recebem ventilação com controle de pressão ou ventilação com controle de volume. Compreender a fisiopatologia de um paciente (*ou seja*, aumento da resistência das vias aéreas) não distingue patologia (*ou seja*, tubo endotraqueal dobrado ou broncoespasmo). Uma patologia como o edema pulmonar pode ter mais de um processo fisiopatológico. *ou seja*, aumento da resistência das vias aéreas e baixa complacência respiratória).¹ Não discutimos a identificação do modo de ventilação ou ventilação adaptativa.²

A equação do movimento

A equação do movimento é uma equação das pressões. Nesta equação, a pressão aplicada ao sistema respiratório do paciente é a soma da pressão do ventilador ($P_{ventilador}$), uma pressão positiva e a pressão muscular respiratória do paciente (P_{mus}), uma pressão negativa. A combinação de $P_{ventilador}$ e P_{mus} deve superar a resistência intrínseca do paciente ao fluxo, a resposta elástica ao volume e a pressão expiratória final positiva retida (PEEP) para fornecer uma respiração ventilada.³

$$P_{MUS} + P_{VENTILAÇÃO} = \text{pressão resistiva} + \text{pressão elástica} + \text{PEEP} \quad (1)$$

OU

$$P_{MUS} + P_{VENTILAÇÃO} = R \cdot (\dot{V}) + E \cdot (V) + \text{PEEP}$$

A pressão ou carga resistiva é uma função da resistência das vias aéreas ($R = \Delta \text{pressão} / \text{fluxo}$) e fluxo de ar ($V = \Delta \text{volume} / \Delta \text{tempo}$). A pressão ou carga elástica é uma função da elastância das vias aéreas e da parede torácica (E) e do volume de ar no sistema respiratório (V). Como a elastância ($\Delta \text{pressão} / \Delta \text{volume}$) é o inverso da complacência ($\Delta \text{volume} / \Delta \text{pressão}$), um paciente com pulmões pouco complacentes ou parede torácica rígida tem uma carga elástica aumentada. O gradiente entre os lados esquerdo e direito da equação de movimento determina a direção do fluxo de ar. Clinicamente, isso é mostrado como mudanças na pressão das vias aéreas e nas formas de onda de fluxo ao longo do tempo, à medida que um volume de ar circula dentro ou fora das vias aéreas. Por exemplo, um paciente com alta elastância respiratória (complacência ruim) terá uma grande carga elástica e, portanto, precisará de aumentos comparáveis na P_{mus} para levar o ar para os pulmões.

Em um paciente paralisado, o ventilador gera toda a pressão positiva recebida pelos pulmões do paciente (*ou seja*, P_{mus} é 0). À medida que o esforço do paciente aumenta (refletido como uma pressão negativa), a pressão das vias aéreas diminui e o ventilador gera menos pressão, o que também é conhecido como “deslocamento de trabalho”. Se o ventilador fornecer mais pressão do que a demanda do paciente, a pressão das vias aéreas estará acima da linha de base e o paciente será “assistido”. De uma perspectiva de forma de onda, não haveria aumento observado na pressão na forma de onda de pressão se o ventilador fornecesse uma pressão que *exatamente* atendeu (não atendeu) a demanda do paciente ao longo do tempo.

Podemos implementar a equação do movimento à beira do leito avaliando as formas de onda de fluxo e pressão ao longo do tempo no contexto do paciente e da atividade ventilatória. A seguir apresenta-se uma abordagem passo a passo para o diagnóstico da fisiopatologia respiratória usando formas de onda do ventilador. Na primeira etapa, geramos uma hipótese fisiopatológica baseada na forma e duração da forma de onda do fluxo expiratório.

expiração: abaixo da linha de base

Na ventilação com controle de pressão e ventilação com controle de volume, inicia-se a cessação do fluxo aplicado pelo ventilador (2) expiração. A expiração depende do esforço do paciente e

Este artigo foi selecionado para o Programa CME de Anestesiologia. Os objetivos de aprendizagem e as informações de divulgação e ordenação podem ser encontrados na seção CME no início desta edição. Este artigo é apresentado em “Este mês em anestesiologia”, página A1.

Enviado para publicação em 17 de dezembro de 2021. Aceito para publicação em 25 de março de 2022. Publicado on-line primeiro em 5 de maio de 2022.

Brigid C. Flynn, MD: Departamento de Anestesiologia, Divisão de Cuidados Intensivos, University of Kansas Health Systems, Kansas City, Kansas.

Haley G. Miranda, MD: Departamento de Anestesiologia, Divisão de Cuidados Intensivos, University of Kansas Health Systems, Kansas City, Kansas.

Aaron M. Mittel, MD: Departamento de Anestesiologia, Divisão de Cuidados Intensivos, Columbia University Irving Medical Center, Nova York, Nova York.

Vivek K. Moitra, MD, MHA, FCCM: Departamento de Anestesiologia, Divisão de Cuidados Intensivos, Columbia University Irving Medical Center, Nova York, Nova York.

Copyright © 2022, a Sociedade Americana de Anestesiologistas. Todos os direitos reservados. Anestesiologia 2022; 137:85-92. DOI: 10.1097/ALN.0000000000004220

fisiologia pulmonar subjacente. Na ausência de esforço do paciente, a expiração é um processo passivo que reflete as cargas resistivas e elásticas do sistema respiratório. As formas de onda do fluxo expiratório passivo demonstram declínio exponencial para a linha de base à medida que a retração elástica torácica força o ar para fora do pulmão até que a PEEP seja alcançada (fig. 1A).⁴Esse período é especialmente útil para o clínico à beira do leito que está tentando gerar uma hipótese de fisiopatologia pulmonar intrínseca, pois esse período passivo reflete a influência de variáveis apenas no lado direito da equação de movimento.

Etapa 1: Avaliar a forma de onda do fluxo expiratório para gerar uma hipótese fisiopatológica

Exalação passiva durante a ventilação.O gradiente entre a pressão alveolar (pressão de platô) e a PEEP impulsiona o fluxo expiratório e é máximo no início da expiração, quando a pressão alveolar é mais alta. Para avaliar a forma de onda do fluxo expiratório, examine o pico de fluxo expiratório do paciente em relação à constante de tempo expiratório, capacidade residual funcional (fig. 1, B a H). A interpretação à beira do leito das formas de onda assume um modelo linear de um compartimento. Nesse contexto, a constante de tempo é definida como o tempo para expirar 63% do volume pulmonar.¹

Constantes de tempo expiratório prolongadas (mais de 0,7 s com um tempo de fluxo expiratório de mais de 2,5 s) devem levar os médicos à beira do leito a supor que a complacência pulmonar é alta.*por exemplo*, na doença pulmonar obstrutiva crônica [DPOC] ou a resistência das vias aéreas é elevada (*por exemplo*, obstrução mucosa, tubo endotraqueal dobrado, resistência brônquica). Nesses casos, a constante de tempo expiratório será prolongada e o pico de fluxo expiratório será reduzido durante a expiração passiva (fig. 1B).^{5,6}Em pacientes com alta carga resistiva (*por exemplo*, broncoespasmo), o uso de broncodilatadores pode aumentar a taxa de pico de fluxo expiratório e encurtar o tempo para o fluxo retornar à linha de base.

Constantes de tempo expiratório curtos (menos de 0,5 s com um tempo de fluxo expiratório inferior a 1 s) juntamente com um aumento no pico de fluxo expiratório são observados em pacientes com diminuição da complacência.*por exemplo*, síndrome do desconforto respiratório agudo [SDRA], edema pulmonar cardiogênico, doença pulmonar restritiva, rigidez da parede torácica, hipertensão intra-abdominal, cifoescoliose; FIG. 1C).⁷Nesses estados fisiopatológicos, os alvéolos doentes esvaziam-se rapidamente.

Exalação Ativa (Esforço do Paciente) durante a Ventilação.É importante identificar o esforço do paciente durante a análise da forma de onda expiratória porque a presença de esforço do paciente pode confundir o diagnóstico de condições fisiopatológicas que afetam o lado direito da equação de movimento. O esforço do paciente também deve ser analisado no contexto

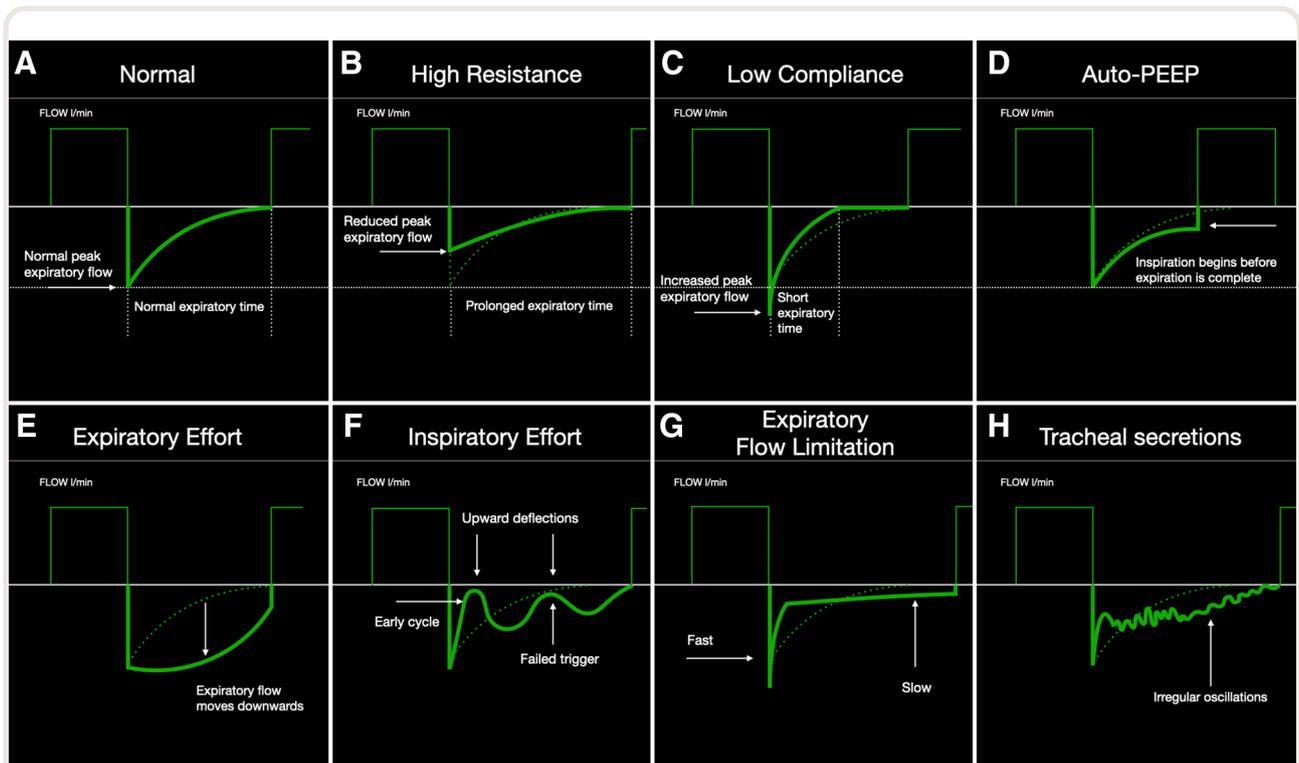


Figura 1. Formas de onda de fluxo expiratório (*linhas em negrito*) na ventilação com controle de volume. Observe que a porção expiratória das formas de onda seria semelhante na ventilação com controle de pressão. PEEP, pressão expiratória final positiva.

avaliação do esforço respiratório do paciente e administração de sedativos ou paráliticos. O esforço inspiratório do paciente durante a expiração é identificado na forma de onda expiratória pelo movimento do fluxo ascendente, em direção à linha de base (fig. 1F). Uma deflexão para cima sem uma respiração inspiratória subsequente também pode representar uma falha no disparo, um disparo automático (consulte as seções "Falha ao disparar" e "Disparo falso") ou relaxamento do esforço expiratório. Uma deflexão ascendente que ocorre imediatamente após um ciclo inspiratório sugere um ciclo prematuro (esforço inspiratório do paciente além do tempo inspiratório definido) para expiração (fig. 1F). O esforço expiratório durante a expiração é caracterizado pelo movimento do fluxo descendente "obliterando" a queda exponencial; pode ser confundido com auto-PEEP (fig. 1, D e E).

Auto-PEEP. A auto-PEEP ocorre quando a expiração incompleta leva à retenção de ar nos alvéolos. É importante avaliar a presença de auto-PEEP durante a análise da forma de onda expiratória, pois sua presença influencia a taxa de fluxo aéreo expiratório. Está frequentemente presente em pacientes com alta adesão (*por exemplo.*, DPOC), resistência aumentada (*por exemplo.*, broncoespasmo), frequência respiratória rápida, grandes volumes correntes ou uma combinação dessas entidades. A auto-PEEP é medida na ausência de atividade respiratória espontânea por meio de uma manobra de retenção expiratória estática. A pressão das vias aéreas detectada representa a PEEP total, da qual a PEEP aplicada é subtraída para identificar a auto-PEEP contida no sistema.

$$\text{Auto-PEEP} = \text{PEEP total} - \text{PEEP aplicado (3)}$$

A forma de onda do fluxo expiratório de pacientes com auto-PEEP substancial não retorna à linha de base, mas pode ter uma aparência típica de decaimento (fig. 1D). A diminuição da frequência respiratória pode reduzir a auto-PEEP.

Limitação do fluxo expiratório. A limitação do fluxo expiratório ocorre a partir do colapso dinâmico das vias aéreas pequenas e distais quando o fluxo expiratório não pode aumentar com uma alta pressão de condução expiratória. *pendular*, em que o ar flui entre os compartimentos pulmonares em vez de retornar diretamente ao ventilador em um movimento linear e contínuo. A limitação do fluxo expiratório causa auto-PEEP e é observada em pacientes com DPOC, insuficiência cardíaca congestiva, obesidade e SDRA, principalmente com PEEP baixa. Como o fluxo pode estar próximo de 0, uma pausa expiratória pode detectar a presença de auto-PEEP. Esse fenômeno também é observado em pacientes com transplante de pulmão único que têm dois compartimentos diferentes para exalação, onde o pulmão transplantado se esvazia mais rapidamente do que o pulmão nativo, com DPOC excessivamente complacente.

Hipoteziza a presença de limitação do fluxo expiratório quando um ponto de inflexão é observado em vez de um único decaimento exponencial na forma de onda do fluxo expiratório (fig. 1G).¹⁰ Nestas circunstâncias, um pico de fluxo inicial representa compressão dinâmica e exalação de gás no

vias aéreas centrais. Esta expulsão rápida leva a uma redução no fluxo expiratório das outras vias aéreas e volutrauma regional. Ao contrário da auto-PEEP de um tempo expiratório curto, a limitação do fluxo expiratório não responde ao prolongamento do tempo expiratório ou à redução da frequência respiratória.¹⁰

Se a PEEP for reduzida a 0, o fluxo aumenta nas zonas pulmonares normais, mas diminui nas zonas com limitação do fluxo expiratório. O aumento da PEEP externa pode aliviar a PEEP intrínseca durante a limitação do fluxo expiratório.

Secreções. Hipotetizar a presença de secreções das vias aéreas ou condensação no circuito do ventilador diante de um fluxo expiratório em dente de serra (fig. 1H).

inspiração: acima da linha de base

O período inspiratório reflete a interação entre o ventilador (*ou seja*, P) e os pulmões do paciente. As formas de onda do fluxo inspiratório refletem o fluxo dinâmico e aparecem como quadrado, descendente ou desacelerando (fig. 2, A a C). Na ventilação com controle de volume, o fluxo é controlado e as formas de onda de pressão representam a resposta do sistema respiratório à inspiração. Na ventilação com controle de pressão, a pressão é controlada e as formas de onda do fluxo inspiratório representam a resposta respiratória à inspiração.

Etapa 2: Avaliar a forma de onda do fluxo inspiratório para corroborar o diagnóstico fisiopatológico

Volume Ao controle: Quadrado e descendente Fluxo Formas de onda. A avaliação da forma de onda do fluxo inspiratório na ventilação com controle de volume é limitada porque o fluxo é controlado; a forma das formas de onda inspiratórias muda pouco com o esforço do paciente. Com uma forma de onda quadrada, o fluxo aumenta rapidamente e permanece constante até que o volume corrente alvo tenha sido entregue antes do ciclo para a expiração (fig. 2A). Uma forma de onda descendente diminui linearmente após o fluxo máximo (fig. 2B). Embora a análise da forma de onda do fluxo inspiratório durante a ventilação com controle de volume seja limitada, é necessário entender a forma geométrica da forma de onda do fluxo inspiratório para interpretar as formas de onda de pressão simultâneas (consulte a Etapa 3).

Controle de Pressão e Suporte de Pressão: Formas de Onda em Desaceleração. A ventilação com controle de pressão é um modo inspiratório ciclado por tempo, direcionado à pressão, com fluxo e volume variáveis. A ventilação com controle de pressão caracteristicamente utiliza uma forma de onda de fluxo inspiratório em desaceleração com decaimento exponencial (fig. 2C). O fluxo inspiratório muda dinamicamente devido ao esforço do paciente, à resistência das vias aéreas e ao gradiente entre as vias aéreas proximais e os alvéolos (matematicamente representado pela equação do movimento), que pode variar de respiração para respiração (fig. 2D).

Se a presença de complacência aumentada ou resistência aumentada das vias aéreas foi hipotetizada na Etapa 1, confirme em seguida a presença de fluxo inspiratório de pico diminuído. Comparados com fluxos inspiratórios de pico em pacientes com fisiologia pulmonar normal (fig. 2E), aqueles em pacientes com

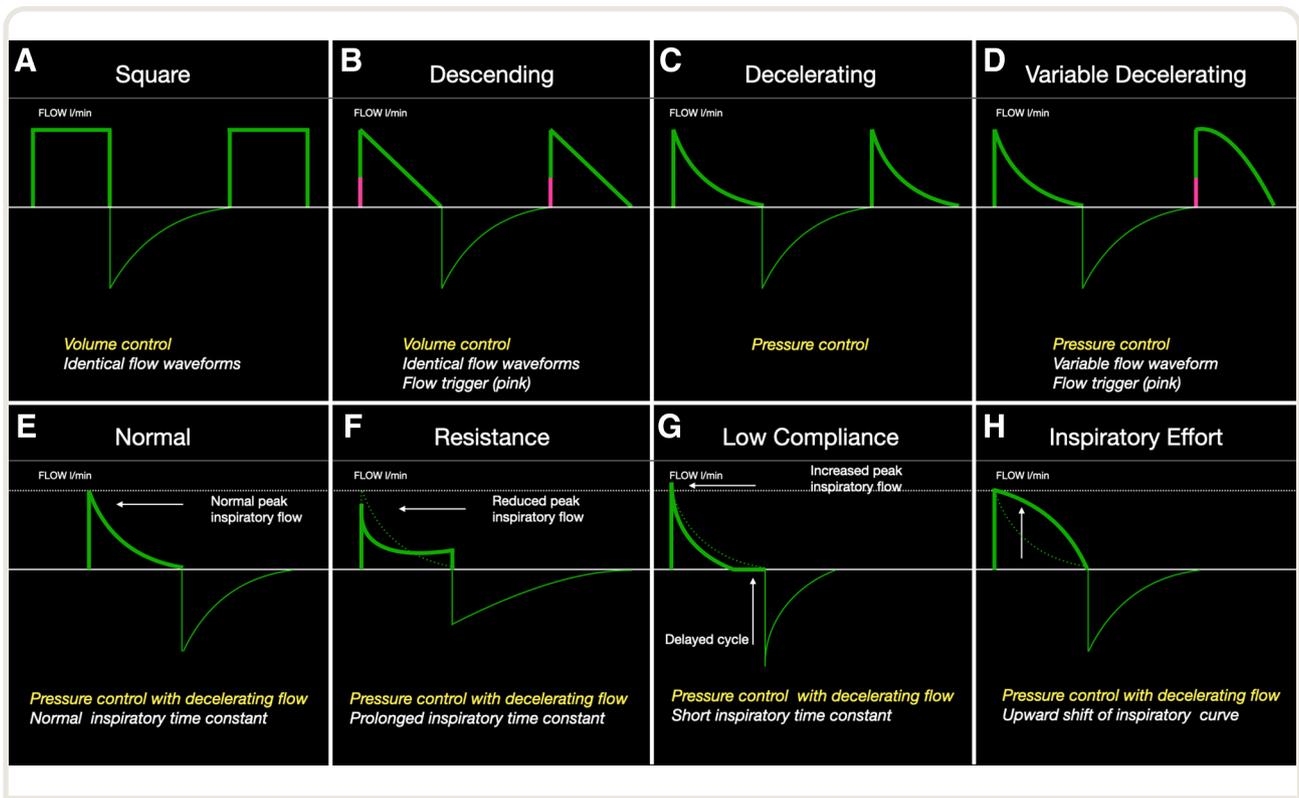


Figura 2. Formas de onda de fluxo inspiratório (linhas em negro) na ventilação de controle de volume (UMA, B) e ventilação controlada por pressão (C para H).

a complacência aumentada (DPOC) e a resistência aumentada das vias aéreas são menores e as constantes de tempo são prolongadas. O fluxo pode não atingir a linha de base porque o pulmão infla lentamente (fig. 2F). Em unidades pulmonares com constantes de tempo inspiratórias prolongadas (ou seja, broncoespasmo), o tempo de insuflação alveolar é prolongado e os volumes correntes podem ser reduzidos se o tempo inspiratório não for aumentado. Por outro lado, a presença hipotética de estados de baixa complacência pode ser corroborada pela observação de constantes de tempo inspiratório curtas e tempos de insuflação diminuídos (fig. 2G).

Se a forma de onda do fluxo em desaceleração tiver uma forma de concavidade linear ou ascendente (vs. uma queda exponencial), o esforço inspiratório do paciente é provável e as pressões ou fluxo inspiratório podem ser inadequados (fig. 2H). Encurtar o tempo de subida ou o tempo para atingir uma pressão alvo pode gerenciar um fluxo inadequado. Um vazamento ou um aumento no fluxo do recrutamento pulmonar também desloca a forma de onda para cima.

Etapa 3: Avaliar as curvas de pressão inspiratória para confirmar o diagnóstico fisiopatológico

O fluxo é a variável independente controlada pelo ventilador na ventilação com controle de volume, e a avaliação da forma de onda de pressão dependente pode confirmar a hipótese fisiopatológica gerada pela análise da forma de onda de fluxo expiratório. Em contraste com a ventilação com controle de volume, a forma de onda de pressão da ventilação com controle de pressão é

a variável independente e a forma de onda do fluxo é a variável dependente.

Calcule a pressão de platô e a pressão de condução. A pressão de platô (P_{prato}) reflete a complacência pulmonar e pode ser calculada tanto na ventilação com controle de volume quanto na ventilação com controle de pressão. O cálculo da pressão de platô durante a ventilação com controle de pressão é importante quando a carga resistiva é alta ou o tempo inspiratório é curto. A pressão de platô é avaliada no final da inspiração com a manobra de retenção inspiratória, quando a pressão alveolar e do circuito atingiram o equilíbrio (fig. 3A). A diferença entre o pico de fluxo inspiratório (PIP) e P_{prato} reflete a resistência das vias aéreas. Escalando [PIP – Os valores de P_{prato}] sugerem patologias resistivas, como tamponamento mucoso, broncoespasmo ou obstrução do circuito (fig. 3B). Aumento de P_{prato}, indicativo de baixa complacência, sugere SDRA, edema pulmonar, pneumonia ou pneumotórax (fig. 3C). Além disso, a auto-PEEP no contexto de broncoespasmo está associada a pressões de platô elevadas e aumento da [PIP – P_{prato}] (fig. 3D). Realize uma manobra de retenção expiratória estática para medir a presença de auto-PEEP, que pode influenciar as medidas de complacência.

Controle de volume: Forma de onda de pressão com fluxo quadrado. O fluxo é controlado pelo ventilador após o médico selecionar o volume desejado na ventilação de controle de volume. A avaliação da forma de onda de pressão resultante pode confirmar a hipótese fisiopatológica. O aumento inicial na pressão reflete a carga resistiva em um paciente passivo. A pressão inspiratória final é

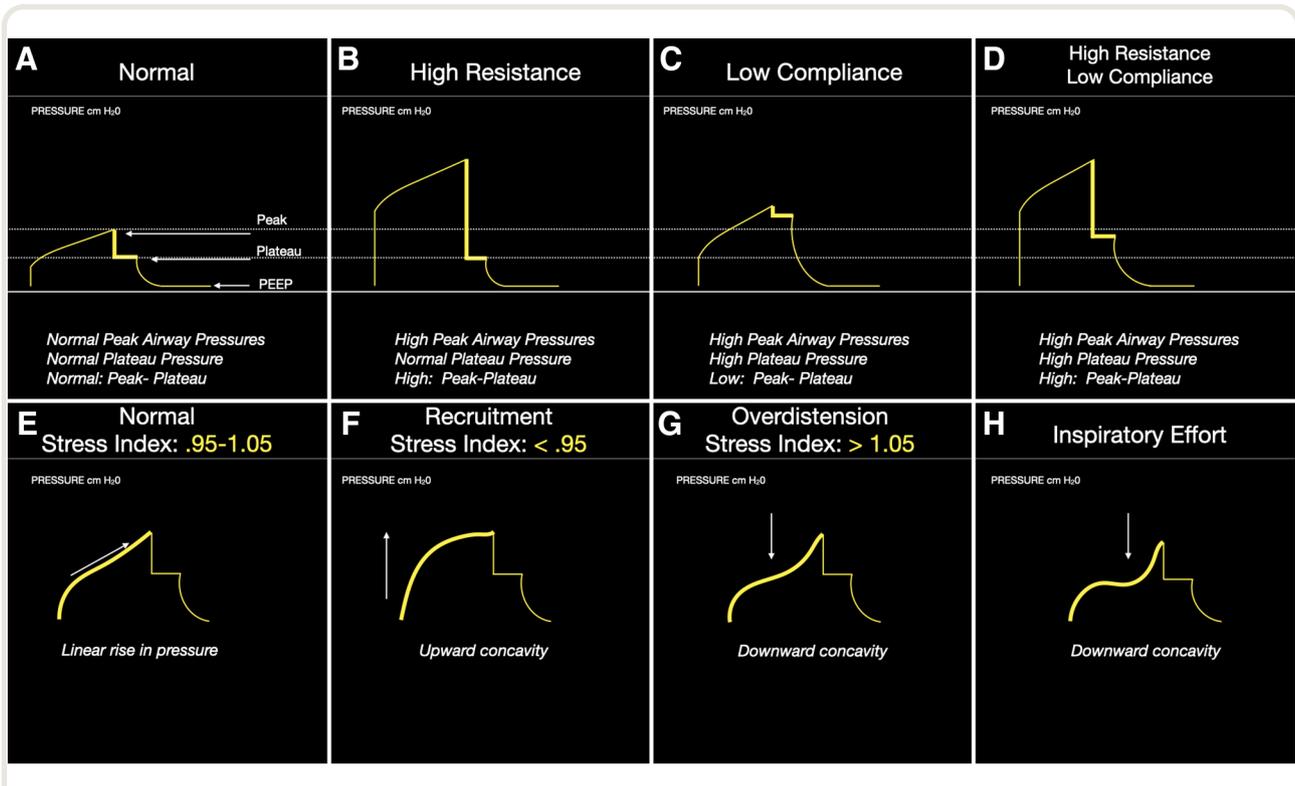


Fig. 3. Formas de onda de pressão na ventilação de controle de volume com um padrão de fluxo de forma de onda quadrada. PEEP, pressão expiratória final positiva.

função da carga elástica nas vias aéreas. Em contraste com a ventilação com controle de volume, as formas de onda de pressão inspiratória adicionam pouca informação à análise da forma de onda do fluxo inspiratório durante a ventilação com controle de pressão. Com fluxo constante em um paciente passivo, a inclinação da curva de pressão (após o aumento inicial da pressão) reflete a complacência pulmonar.

O índice de estresse é derivado da curva pressão-tempo das vias aéreas ($P - t_{ah}$) e foi validado para avaliar a complacência, quantificando o recrutamento e a hiperdistensão durante o fluxo de forma de onda quadrada.^{11,12} A forma da curva pressão-tempo das vias aéreas com fluxo inspiratório constante está relacionada à complacência e é representada pela equação:

$$P_{ah} = a * t^b + c \quad (4)$$

onde a é a inclinação da curva de fluxo permanente entre o tempo t_0 e tempo t_1 , c é o P_{ah} no tempo t_0 , e b (índice de estresse) é um número adimensional que descreve a forma da curva.

Modelos experimentais e ensaios clínicos sugeriram que um índice de estresse de 0,95 a 1,05 é o ideal. Este valor calculado não está comumente disponível na maioria dos ventiladores de anestesia, mas pode ser avaliado de forma confiável com análise visual do ventilador $P - t_{ah}$. Se a inclinação for linear (índice de estresse ou $b = 1$) ao longo da inspiração, a complacência é linear e reflete a distensão alveolar não lesiva (fig. 3E). Se a complacência for pior no início da respiração e melhorar à medida que o pulmão recruta, a curva de pressão inspiratória se curva (concavidade para baixo: índice de estresse ou $b < 0,95$; fig. 3F). Se o

a porção inicial da curva de pressão é plana e, em seguida, parece escavada à medida que a respiração é fornecida, a complacência diminui e a hiperdistensão é provável (concavidade para cima; índice de estresse ou $b > 1,05$; fig. 3G). As formas de onda de pressão de um paciente com alvéolos hiperdistendidos ou um paciente com esforço inspiratório ativo na configuração de fluxo inadequado são semelhantes com uma concavidade ascendente (fig. 3H). Distinga a hiperdistensão do esforço ativo observando o paciente à beira do leito e observando a presença ou ausência de uma respiração acionada pelo paciente.¹⁴

Controle de Volume: Forma de Onda de Pressão com Fluxo de Desaceleração. Alternar o ventilador de uma forma de onda de fluxo quadrado para uma descendente na ventilação com controle de volume pode reduzir o efeito do aumento da resistência das vias aéreas e da pressão inspiratória de pico. esforço respiratório aumentando as pressões médias nas vias aéreas e melhorando a sincronia paciente-ventilador.¹⁵ A mudança de uma forma de onda quadrada para uma forma de onda de fluxo em desaceleração pode aumentar o tempo inspiratório, a menos que a taxa de fluxo seja aumentada, predispondo os pacientes a tempos expiratórios reduzidos e potencial auto-PEEP. carga resistiva em um paciente passivo e também é refletida no final da inspiração pela diferença entre as pressões de pico e de platô (fig. 4A). Este aumento inicial é maior com o aumento da carga resistiva. Um aumento inicial alto com uma queda significativa na forma de onda de pressão para uma extremidade inferior

a pressão inspiratória quando o fluxo atinge 0 pode confirmar a presença de uma carga pulmonar resistiva (broncoespasmo; fig. 4B). À medida que o fluxo desce para 0, a forma de onda de pressão reflete a pressão de platô, de modo que o final da pressão inspiratória com fluxo descendente reflete a elastância. Pacientes com alta carga elástica (baixa complacência) verão uma pressão elevada no final da inspiração quando o fluxo atingir 0 (fig. 4C). A baixa complacência pulmonar deve ser diferenciada da expiração durante uma respiração inspiratória mecânica, que também aumenta a pressão no final da inspiração (fig. 4D).

Controle de Volume: Esforço Inspiratório do Paciente. As formas de onda de pressão podem fornecer evidências do esforço do paciente. Se o paciente estiver inspirando ativamente durante a inspiração, a curva de pressão inspiratória se move para baixo em direção à linha de base (fig. 4E). Movimentos paradoxais do tórax e abdome do paciente podem ser observados. O fenômeno de falta de fluxo ocorre se a pressão inspiratória cair abaixo da linha de base para gerar pressão inspiratória negativa. Gerencie o fluxo inadequado aumentando a taxa de fluxo do ventilador, o que diminuirá o tempo inspiratório.

assincronias: ausência de esforço do paciente ou resposta do ventilador

Etapa 4: identificar a fonte de acionamento

Acionamento. O esforço ou o tempo do paciente desencadeiam a inspiração. O esforço do paciente pode desencadear uma respiração por uma mudança na pressão

de tipicamente 1 a 2 cm H₂O de esforço do paciente (representado por uma deflexão negativa na forma de onda de pressão; fig. 4A) ou uma mudança no fluxo contínuo do circuito (geralmente representado por uma mudança na cor da porção inicial do fluxo inspiratório ; fig. 2, B e D). Identificar uma respiração acionada pelo paciente e uma respiração passiva ou acionada por máquina pode desmascarar a patologia na presença de esforço do paciente. Se ambas as respirações forem idênticas, não há P . Uma profunda e ampla deflexão negativa da pressão durante a fase de disparo sugere um forte impulso respiratório. de esforço do paciente, conhecido como "gatilho falso".¹⁶

Falha ao acionar. Os ventiladores mecânicos reconhecem o esforço inspiratório do paciente como deflexões negativas na pressão do circuito ou no fluxo de ar. Uma deflexão para cima durante a fase expiratória (abaixo da linha de base) sugere esforço inspiratório. Se este esforço for insuficiente para diminuir a pressão alveolar, não ocorrerá a diminuição correspondente na pressão ou fluxo do circuito (fig. 1F). O esforço respiratório pode ser inadequado para desencadear uma respiração se a pressão alveolar estiver elevada. *ou seja*, auto-PEEP). Definir um acionador de fluxo em comparação com um acionador de pressão pode reduzir o trabalho respiratório, diminuindo a sensibilidade para acionar uma respiração.^{6,17} Os gatilhos de fluxo, no entanto, não evitam completamente os desafios associados à alta alveolar.

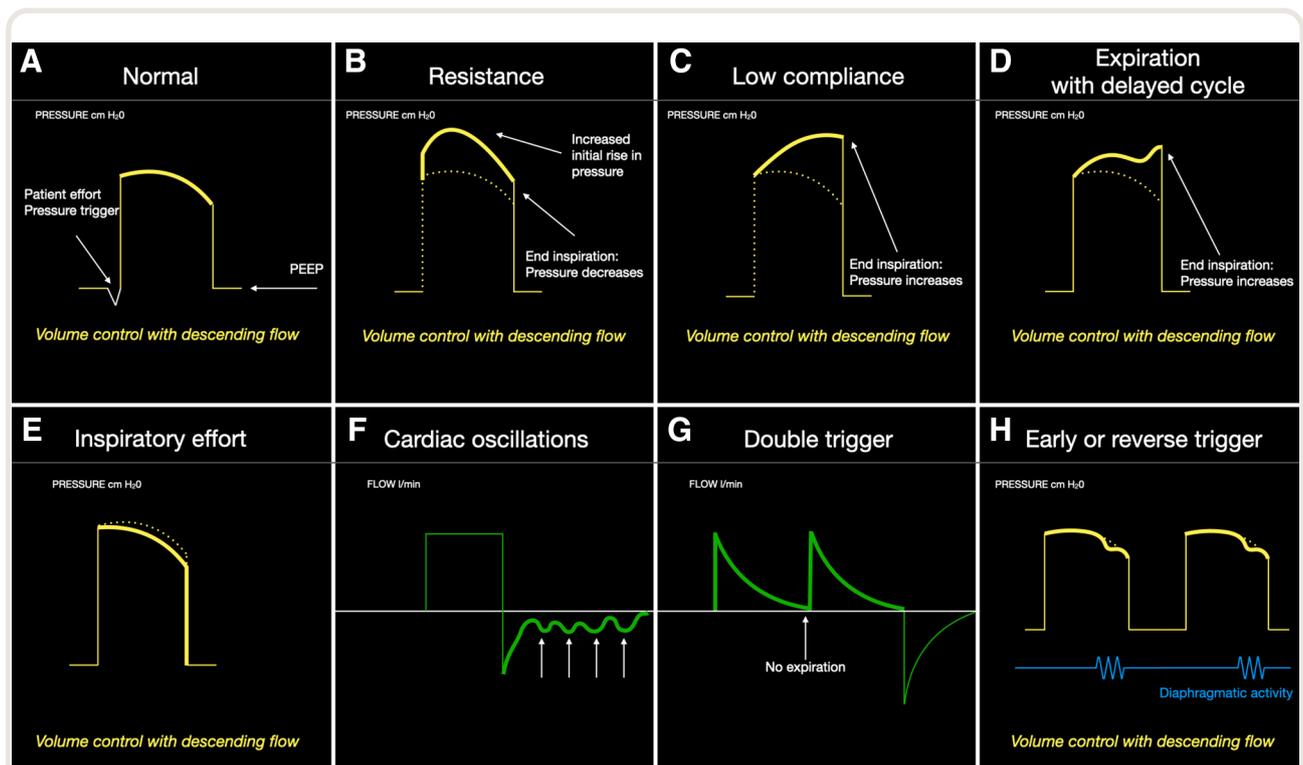


Fig. 4. Formas de onda de pressão na ventilação de controle de volume com um padrão de fluxo de forma de onda descendente (UMA para E, H); oscilações cardíacas durante a forma de onda do fluxo expiratório (F); e duplo disparo com forma de onda de fluxo inspiratório (G). PEEP, pressão expiratória final positiva.

pressão porque a pressão alveolar ainda deve ser superada para negativa para iniciar o fluxo para os pulmões (conforme descrito na equação de movimento).¹⁸

Disparo falso (disparo automático). O falso disparo ou autodisparo ocorre quando o ventilador fornece uma respiração em resposta a um estímulo não relacionado ao esforço do paciente. Entidades como oscilações cardíacas, condensação na tubulação do ventilador, fluxo negativo contínuo do circuito do ventilador ou vazamentos no dreno torácico, limiáres de disparo altamente sensíveis (fáceis) ou vibrações externas (*ou seja*, terapia de substituição renal, dreno torácico, tubo de sucção gástrica) podem causar deflexões na pressão e no fluxo que são interpretados pelo ventilador como esforço do paciente para acionar uma respiração. As oscilações cardíacas manifestam-se como distorções rápidas na frequência da frequência cardíaca do paciente nas formas de onda de fluxo e pressão expiratórias e devem ser diferenciadas de disparos ineficazes¹⁹ (fig. 4F). O autodisparo pode ser diagnosticado corrigindo vazamentos no circuito, removendo fontes de vibrações externas ou alternando o ventilador mecânico para um modo de disparo de pressão. O disparo automático foi observado após a morte encefálica e pode confundir a capacidade do médico de verificar se a morte ocorreu.²⁰

Dissincronias: Incompatibilidade entre a Demanda do Paciente e a Resposta do Ventilador

Etapa 5: identificar o tempo entre a inspiração e a expiração

O ciclismo descreve a transição da inspiração para a expiração. Fluxo, tempo ou pressão determinam a ciclagem, e as dissincronias de ciclagem ocorrem quando há incompatibilidade entre o tempo permitido pelo ventilador para inspiração e expiração e os ciclos inspiratórios e expiratórios reais do paciente.

Ciclismo prematuro (acionamento duplo ou múltiplo). Se um esforço inspiratório continuar além do tempo inspiratório definido pelo ventilador, uma segunda respiração, sem expiração da primeira respiração, pode ser acionada.²¹ Pacientes que desejam uma respiração mais longa ou que têm um tempo de aumento de pressão rápido ou suporte de pressão inadequado podem apresentar ciclagem prematura (fig. 4G). O fornecimento de uma segunda respiração durante a fase expiratória da respiração iniciada pela máquina pode “empilhar” sequencialmente respirações, gerando grandes volumes correntes e aumento das pressões inspiratórias. Estender o tempo inspiratório da máquina pode corrigir o ciclo prematuro e omitir o empilhamento de respirações.

Ciclismo Atrasado. A ciclagem atrasada ocorre quando o tempo inspiratório definido excede o tempo inspiratório intrínseco desejado do paciente. Isso resulta na expiração do paciente enquanto uma respiração fornecida pela máquina ainda está ocorrendo. Isso pode ser causado por tempo inspiratório desnecessariamente longo ou desaceleração muito lenta do fluxo expiratório, como ocorre na doença pulmonar obstrutiva (fig. 2C). A expiração espontânea durante a insuflação da máquina pode gerar pressões muito altas nas vias aéreas e aumenta o risco de barotrauma.

na pressão das vias aéreas no final do ciclo inspiratório da máquina sugerem essa dissincronia (fig. 4G). Quanto à ciclagem prematura, corrija a ciclagem atrasada modificando o tempo inspiratório para corresponder mais precisamente à duração inspiratória desejada do paciente, neste caso, encurtando a época inspiratória da máquina.²¹

Gatilho Antecipado ou Gatilho Reverso. Com um disparo antecipado ou reverso, um esforço inspiratório reflexivo segue uma respiração acionada por máquina (fig. 4H). Quando acoplado a ciclos inspiratórios ao longo do tempo, esse fenômeno é chamado de “arrastamento”. Normalmente ocorre perto da transição da fase inspiratória para a fase expiratória. Especula-se que o desencadeamento reverso ocorra com mais frequência durante os estados de transição entre sedação intensa e eventos desencadeantes espontâneos conduzidos pelo paciente que ocorrem com sedação mais leve, levando ao aumento do impulso respiratório. As estratégias para prevenir ou corrigir o desencadeamento reverso são incertas, embora o aumento da frequência respiratória ou a redução da sedação possam reduzir a propensão à ocorrência de arrastamento.²²

Conclusões

Os médicos podem usar a análise mecânica da forma de onda como uma ferramenta de diagnóstico para identificar a fisiopatologia pulmonar. As formas de onda de fluxo e pressão podem ser interpretadas para confirmar o diagnóstico e otimizar o gerenciamento do ventilador. Esta revisão oferece ferramentas para os médicos usarem ao desenvolver uma hipótese de modelo mental da fisiopatologia pulmonar de um paciente e oferece uma abordagem gradual para aceitar ou rejeitar a hipótese.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Jennifer Holmes, ELS (St. Augustine, Flórida), por sua inestimável assistência editorial.

Apoio à Pesquisa

O apoio foi fornecido exclusivamente por fontes institucionais e/ou departamentais.

Interesses competitivos

Dr. Moitra é a ligação da Sociedade Americana de Anestesiologistas (Schaumburg, Illinois) com a American Heart Association (Dallas, Texas). Ele presta depoimento pericial. O Dr. Moitra também é Diretor do Conselho Americano de Anestesiologia (Raleigh, Carolina do Norte). Os demais autores declaram não haver interesses conflitantes.

Correspondência

Endereço para correspondência ao Dr. Moitra: Columbia University Irving Medical Center, Nova York, Nova York 10032. vm2161@cumc.columbia.edu. Este artigo pode ser acessado gratuitamente para uso pessoal através do site do Journal, www.anesthesiology.org.

Referências

- Hess DR: Mecânica respiratória em pacientes ventilados mecanicamente. *Respir Care* 2014; 59:1773-94
- Mireles-Cabodevila E, Siuba MT, Chatburn RL: Uma taxonomia para interações paciente-ventilador e um método para ler as formas de onda do ventilador. *Respir Care* 2021 [Epub antes da impressão]
- Otis AB, FennWO, Rahn H: Mecânica da respiração no homem. *J Appl Physiol* 1950; 2:592-607
- Bergman NA: Aprisionamento de gás intrapulmonar durante ventilação mecânica em frequências rápidas. *Anestesiologia* 1972; 37:626-33
- Dhand R: Gráficos ventilatórios e mecânica respiratória no paciente com doença pulmonar obstrutiva. *Respir Care* 2005; 50:246-61
- Hamahata NT, Sato R, Daoud EG: Vá com o fluxo: Importância clínica das curvas de fluxo durante a ventilação mecânica: Uma revisão narrativa. *Pode J Respir Ther* 2020; 56:11-20
- Bigatello LM, Davignon KR, Stelfox HT: Mecânica respiratória e formas de onda do ventilador no paciente com lesão pulmonar aguda. *Respir Care* 2005; 50:235-45
- Kress JP, O'Connor MF, Schmidt GA: O exame clínico detecta de forma confiável a pressão expiratória final positiva intrínseca em pacientes criticamente enfermos, ventilados mecanicamente. *Am J Respir Crit Care Med* 1999; 159:290-4
- Blanch L, Bernabé F, Lucangelo U: Medição de aprisionamento de ar, pressão expiratória final positiva intrínseca e hiperinsuflação dinâmica em pacientes ventilados mecanicamente. *Respir Care* 2005; 50:110-24
- Junhasavasdikul D, Telias I, Grieco DL, Chen L, Gutierrez CM, Piraino T, Brochard L: Limitação do fluxo expiratório durante ventilação mecânica. *Peito* 2018; 154:948-62
- Grasso S, Terragni P, Mascia L, Fanelli V, Quintel M, Herrmann P, Hedenstierna G, Slutsky AS, Ranieri VM: Perfil da curva pressão-tempo das vias aéreas (índice de estresse) detecta recrutamento/hiperinsuflação de maré em lesão pulmonar aguda experimental. *Crit Care Med* 2004; 32:1018-27
- Ferrando C, Suárez-Sipmann F, Gutierrez A, Tusman G, Carbonell J, García M, Piqueras L, Compañ D, Flores S, Soro M, Llombart A, Belda FJ: Ajustar o volume corrente ao índice de estresse em uma condição de pulmão aberto otimiza a ventilação e previne a hiperdistensão em um modelo experimental de lesão pulmonar e redução da complacência da parede torácica. *Crit Care* 2015; 19:9
- Sun XM, Chen GQ, Chen K, WangYM, He X, Huang HW, Luo XY, Wang CM, Shi ZH, Xu M, Chen L, Ventilador E, Zhou JX: O índice de estresse pode ser avaliado com precisão e confiabilidade ao inspecionar visualmente as formas de onda do ventilador. *Respir Care* 2018; 63:1094-101
- Oto B, Annesi J, Foley RJ: Dessincronia paciente-ventilador na unidade de terapia intensiva: uma abordagem prática para diagnóstico e manejo. *Cuidados Intensivos Anaesth* 2021; 49:86-97
- Al-Saady N, Bennett ED: A desaceleração da forma de onda do fluxo inspiratório melhora a mecânica pulmonar e as trocas gasosas em pacientes em ventilação com pressão positiva intermitente. *Medicina Intensiva* 1985; 11:68-75
- Chatburn RL, Mireles-Cabodevila E: 2019 ano em revisão: Sincronia paciente-ventilador. *Respir Care* 2020; 65:558-72
- Liao KM, Ou CY, Chen CW: Classificando diferentes tipos de duplo disparo com base na pressão das vias aéreas e na deflexão do fluxo em pacientes ventilados mecanicamente. *Respir Care* 2011; 56:460-6
- Aslanian P, El Atrous S, Isabey D, Valente E, Corsi D, Harf A, Lemaire F, Brochard L: Efeitos do disparo de fluxo no esforço respiratório durante suporte ventilatório parcial. *Am J Respir Crit Care Med* 1998; 157:135-43
- Imanaka H, Nishimura M, Takeuchi M, Kimball WR, Yahagi N, Kumon K: Autotriggering causado por oscilação cardiogênica durante ventilação mecânica acionada por fluxo. *Crit Care Med* 2000; 28:402-7
- Arbor R: Oscilação cardiogênica e autodisparo do ventilador em pacientes com morte cerebral: Uma série de casos. *Am J Crit Care* 2009; 18:496, 488-95
- Bailey JM: Manejo da assincronia paciente-ventilador. *Anestesiologia* 2021; 134:629-36
- Akoumianaki E, Lyazidi A, Rey N, Matamis D, Perez-Martinez N, Giraud R, Mancebo J, Brochard L, Richard JM: Respirações reversas induzidas por ventilação mecânica: Uma forma frequentemente não reconhecida de acoplamento neuromecânico. *Peito* 2013; 143:927-38