

Questão 1) O sistema respiratório é composto por um conjunto de vias aéreas que se inicia no nariz e na boca, seguindo como uma via única até a bifurcação na carina onde há a divisão entre pulmão esquerdo e direito. Em cada pulmão as vias aéreas seguem se dividindo em uma árvore bifurcada, com cada nova geração possuindo um diâmetro menor. A partir, aproximadamente, da 15ª geração desta árvore se inicia a região onde há trocas gasosas com a presença de alvéolos conectados às paredes das vias aéreas, até que estas terminam em uma região somente com alvéolos. Essa região de trocas gasosas constitui a maior parte do volume do sistema respiratório, e pode ser, simplificada, vista como um balão elástico. Assim, ela pode se expandir para trazer ar da atmosfera para dentro dos pulmões e tem uma tendência a retornar a seu volume inicial. Entretanto, devido à presença da caixa torácica que tem uma tendência a se opor à compressão, existe um volume de repouso com os alvéolos ainda abertos.

O adequado funcionamento da ventilação para garantir as trocas gasosas depende, então, de que o indivíduo consiga produzir um esforço respiratório suficiente para vencer a perda de energia na passagem da gás nas vias aéreas e na expansão dos tecidos. Também é preciso que exista um volume suficiente de regiões do pulmão que sejam ventiladas para que se tenha a possibilidade de trocas gasosas entre alvéolo e sangue, ~~mas~~ com a quantidade de ar precisando ser deslocada pela ventilação (e suportada nos pulmões) variando de acordo com a demanda metabólica.

Os testes de função pulmonar podem ser usados para determinar o estado do sistema respiratório do indivíduo, medindo, entre outras variáveis, as características mecânicas e o volume pulmonar em diferentes condições.

Um teste que pode ser utilizado para medir os volumes pulmonares é a pleustimografia de corpo inteiro. Este consiste em colocar o paciente dentro de uma caixa fechada com o mesmo ar respirado o ar ambiente de fora da caixa através de um tubo instrumentado. Como a caixa está fechada sem a possibilidade de entrada ou saída de ar, variações do volume torácico com a respiração alteram o volume disponível para ser ocupado pelas moléculas de ar na caixa. Se a temperatura no interior da caixa também permanecer constante, aquela variação do volume ocupado por ar pode ser medida como uma variação de pressão devido à relação $PV = \text{constante}$. Essa medição permite estimar, então, volumes absolutos do pulmão sem depender de que todas as regiões sejam ventiladas como em técnicas de diluição de gases.

- O volume do pulmão em repouso, chamado de capacidade residual funcional, pode ser medido deixando o indivíduo respirar livremente e fechando-se o tubo antes de uma inspiração. O esforço inspiratório vai alterar o volume na caixa e com a pressão inicial e final pode-se medir essa variação usando

$$P_{\text{inicial}} V_{\text{inicial}} = P_{\text{final}} (V_{\text{inicial}} + \Delta V)$$

Medindo-se também a pressão no tubo, que nessas condições corresponde à pressão nos pulmões, pode-se obter o volume inicial do pulmão, a CRF:

$$P_{\text{inicial pulmão}} \cdot \text{CRF} = P_{\text{final pulmão}} (\text{CRF} + \Delta V)$$

É importante observar que a relação PV vale para pressões absolutas, sendo $P_{\text{inicial pulmão}}$ o $P_{\text{atmosférica}}$

- Também é possível medir o volume residual, que é o volume no pulmão após uma expiração e a capacidade pulmonar total, o volume máximo que o pulmão do pa-

WMS

iente consegue atingir. Com o paciente respirando normalmente pede-se que ele faça um esforço inspiratório máximo seguido de um esforço expiratório máximo. A variação de volume durante a inspiração e a CRF indicam a capacidade total, já a variação na expiração e a CPT dão o volume residual.

- Sabendo-se a CRF também pode-se usar o pletismo grafo de corpo inteiro para medir a resistência de vias aéreas. ~~Utilizando-se a relação entre pressão e volume e o volume inicial do pulmão para calcular a variação de pressão dentro do pulmão e calcular a relação entre pressão e fluxo.~~ Utilizando-se a relação entre pressão e volume e o volume inicial do pulmão para calcular a variação de pressão dentro do pulmão e calcular a relação entre pressão e fluxo.

Essas medições podem ser usadas para como parte do diagnóstico e acompanhamento de um paciente. Por exemplo, uma doença restritiva com a doença intersticial idiopática, que causa uma perda na característica elástica do pulmão tenderá a reduzir a EPT, ~~na maioria das vezes~~ pela maior dificuldade em expandir o pulmão, e aumentar a CRF, pela ~~maior~~ equilíbrio mais rápido entre a tensão da caixa torácica e do pulmão. No enfisema, em que há destruição do tecido ~~do~~ pulmonar a CPT tende a aumentar, pois há menos "molas" tentando comprimir a caixa torácica, e a CRF deve novamente aumentar.

~~Os volumes pulmonares também se alteram com a tensão da caixa torácica, prevenindo-se utilizar.~~

O modelo simplificado do pulmão como um componente resistivo das vias aéreas e elástico do tecido pulmonar ao redor é útil para diversas aplicações, mas sabe-se que é limitado. Além do pulmão ser uma árvore bifurcada com diferenças regionais, o tecido pulmonar também apresenta características dissipativas, semelhantes a resistência de vias aéreas.

nas ~~respiratórias~~ há as características não lineares como a histerese com diferentes relações entre pressão e volume nas fases inspiratória e expiratória. De fato observam-se fenômenos como relaxamento de stress, com a pressão variando após uma oclusão das vias aéreas durante a inspiração ou expiração, onde não há variação de volume; e uma dependência da resistência e elasticidade com a frequência. Modelos com dois compartimentos ou viscoelasticidade conseguem representar, em parte, estas características. Entretanto, medidas de amostra de tecido pulmonar apresentam uma resposta a um degrau de tensão da qual é uma lei de potência, e medidas de pulmão inteiro também apontam nesta direção para a resposta da pressão a um degrau de volume. Este tipo de comportamento necessitaria de um conjunto infinito de elementos viscoelásticos para ser representado.

Uma alternativa é considerar um modelo de pulmão no domínio da frequência. Partindo-se de uma resposta ao impulso de fluxo como um lei de potência a transformada de Fourier pode ser usada para ~~para~~ encontrar uma expressão da impedância tecidual como

$$Z_t(\omega) = \frac{G + iH}{\omega^\alpha} \quad \alpha = \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \frac{H}{G}$$

onde G representa a característica dissipativa do tecido, e H a sua característica de armazenamento de energia. Acrescentando-se termos para representar as características de vias aéreas a impedância total do pulmão é descrita por

$$Z_p(\omega) = R_N + i\omega I + \frac{G + iH}{\omega^\alpha}$$

com R_N sendo uma resistência ~~uma~~ clássica e I representando a ~~inércia~~ inércia da massa de ar nas vias

hsp

AÉREAS. Este modelo pode ser identificado com a técnica de oscilações forçadas permitindo a ~~separação~~ melhor separação entre as características de vias AÉREAS Afectados.

~~Os parâmetros deste modelo são~~ ~~forçados~~

A técnica de oscilações forçadas consiste em excitar o sistema respiratório com senóides de diferentes frequências medindo-se a pressão e o fluxo. Os termos do modelo são lineares em relação a estes parâmetros com exceção de w^k . Entretanto, ainda pode-se utilizar regressão linear múltipla fazendo ~~uma~~ um ajuste iterativo. Inicia-se com $\alpha = 1$ e, após o ajuste, recalcula-se α de H e G. O novo α é utilizado em um novo ajuste até ^{que} a variação dos parâmetros entre interações seja pequena. Normalmente ~~utiliza-se~~ aplica-se o modelo fazendo uma normalização w/w_0 para que G e H não tenham unidades físicas variáveis. Este modelo de fase constante nos traça boa resposta até 20 Hz.

Questão 3) A Radiografia utiliza um feixe de raios-X que atravessa o tórax do paciente atingindo um detector no outro lado. Os raios-X são ~~partículas~~ partículas de energia que tem energia suficiente para atravessar os tecidos humanos, mas é atenuada de acordo com a densidade do material. Maior densidade atenua mais os raios-X. Em uma imagem radiográfica convencionou-se (também por questões técnicas na radiografia analógica) que maior densidade se represente com maior intensidade de branco.

→

4/11

O pulmão contém as vias aéreas com músculos lisos, os vasos sanguíneos com densidade próxima a água, e os alvéolos com suas paredes e preenchidos com ar. Assim, grande parte do pulmão tem pouca densidade. Em um tórax normal são observados em branco os ossos dos braços e ombros, as costelas, o coração e o mediastino. O pulmão é uma região mais escura, porém não completamente preta devido as estruturas com ~~uma~~ mais densidade distribuídas pelo parênquima. Também podem ser observadas as ~~as~~ projeções dos brônquios e as primeiras gerações mais esbranquiçadas próximo ao mediastino.

Em um paciente com DPOC as principais alterações observadas em uma radiografia são a presença devido ao enfisema pulmonar e a destruição do septo, com perda do tecido alveolar e dos vasos alveolares e extra alveolares. A diminuição do recuo elástico causada por esta perda também pode levar ao aumento do volume pulmonar. Assim, tem-se a vez em um paciente com DPOC um diafragma mais plano e ossos da costela mais horizontais, além de regiões mais escuras representando as bolhas de enfisema.

(Questão 2) O medidor de fluxo de fio quente, também conhecido com anemômetro de fio quente, mede a velocidade de um fluido através do transporte de energia gerado por convecção devido ao movimento deste. Para realizar essa medição um fio de platina é colocado no medidor ~~em~~ em uma direção perpendicular ao ~~fluxo~~ fluxo e um ~~circuito~~ conectado a um circuito comum que aplica uma corrente de forma a manter a tensão sobre o fio constante. A relação entre a tensão e a corrente é dada pela resistência do fio, que ~~esta relação~~ varia inversamente com a temperatura do fio, de forma que uma queda na cor-

rente com a tensão constante indica uma redução da temperatura do fio. A temperatura do fio se reduz de forma proporcional a velocidade do fluido, pois a massa de fluido com menor temperatura retira calor da pequena massa do fio. Conhecendo-se a área da seção do fio local onde está o fio, pode-se calcular a vazão volumétrica com o valor de velocidade.

Uma limitação dos medidores de fio quente são que a transferência de calor entre fluido e fio é ~~independente~~ a mesma para qualquer sentido de movimento, necessitando-se de, no menor, dois fios para ~~uma~~ medição bidirecional; Pode ser difícil realizar a medição de fluxos abaixo de um determinado patamar, que depende de características geométricas e elétricas, pois a variação de temperatura se torna muito pequena devido a baixa velocidade do fluido ~~e representa uma dificuldade~~ e a resolução das medições de corrente e tensão; variações de temperatura do fluxo que entram no medidor podem gerar erros de medição. ~~Algumas~~

O pneumotacógrafo do tipo Fleish é um medidor de fluxo do tipo diferença de pressão baseado na dissipação de energia pelo arrasto do fluido viscoso nas paredes do medidor. Em uma condição de fluxo laminar e em um tubo em que o comprimento é relevantemente maior que o diâmetro a relação entre a queda de pressão causada pela perda de energia e o fluxo é ~~linear~~ linear e dada pela equação de Poiseuille

$$\Delta P = \frac{8 \eta L \dot{V}}{\pi D^4}$$

sendo ΔP a diferença de pressão entre dois pontos separados por um comprimento L em um tubo circular de diâmetro D , gerada por um fluido de viscosidade

η com uma vazão volumétrica $\dot{V}$. Para ter uma boa aplicação prática é preciso balancear que a queda de pressão no comprimento L seja suficiente para ser medida em todo o intervalo de um fluxo de interesse, sendo que durante a expiração ou em ventilação controlada a pressão ocorrem picos de fluxo alto e fluxos muito baixos com o decaimento "exponencial". Enquanto a queda de pressão total não seja muito grande neste mesmo intervalo, pois na respiração espontânea ou na expiração essa queda tem que ser superada pelo paciente. Aqui é importante ressaltar que os locais de medição não devem ficar muito próximos a borla do medidor para evitar efeitos de transição do fluxo, permitindo, de preferência, um fluxo completamente desenvolvido no local da medição. Estes dois objetivos geram um conflito com a medição precisando de ^{menor} raios ou comprimento maior com a resistência do sensor de fluxo tendendo ao contrário.

Adicionalmente, deve-se tentar garantir a condição de laminaridade, o que depende de velocidades maiores e isso ^{segundo o número de Reynolds,} aumenta o raio. A medida que os maiores fluxos do intervalo aumentam, ~~para~~ o medidor de Fleish tentar lidar com ~~estes~~ estes objetivos dividindo o fluxo em múltiplos capilares. Como resistores em paralelo, eles reduzem a resistência total, mas podem ter diâmetros pequenos para aumentar a DP. A divisão do ~~fluxo~~ entre os capilares também ~~tende~~ reduz a velocidade ajudando com o regime do fluxo, e com os raios menores de ~~essa~~ ^{acontece em espaço} capilar o desenvolvimento das linhas de fluxo ~~vão~~ mais curtos.

Os medidores tipo Fleish, na prática, apresentam características levemente não lineares que devem ser consideradas para medições mais precisas.