

Desenvolvimento de um Ventilador Mecânico Emergencial de Baixo Custo Development of a Low-Cost Emergency Mechanical Ventilator Desarrollo de Un Ventilador Mecánico de Emergencia de Bajo Costo

Guilherme Monteiro Torelly¹

Rodrigo Félix de Araújo Cardoso²

Fábio Marujo da Silva³

José Eduardo Proença de Carvalho⁴

Carlos Nelson Elias⁵

¹ Pós- doutorando, Doutor em Engenharia Elétrica com ênfase em Nanotecnologia na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio, Brasil. Doutorado Sanduíche no CEA-Grenoble (França). Mestre em Engenharia Elétrica na PUC-Rio. Bacharel em Engenharia Elétrica na PUC-Rio. E-mail: gtorelly@ime.eb.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3019-2069>

² Doutor em Ciências dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia, IME, Brasil. Mestre em Ciências dos Materiais no IME. Engenheiro Mecânica na Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, Brasil. E-mail: rfelix@cbpf.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6653-0432>

³ Doutroando em Instrumentação e Óptica Aplicada no Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, Brasil. Mestre em Engenharia Elétrica no CEFET/RJ. Engenheiro Elétrico na Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Brasil. E-mail: fmarujo@cbpf.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3555-0489>

⁴ Graduado em Matemática, Física e Engenharia Mecânica. Engenheiro Mecânico na Faculdade de Engenharia Souza Marques, FTESM, Brasil. E-mail: eduardo@cbpf.br

⁵ Doutor em Ciências dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia, IME, Brasil. Mestre em Ciências dos Materiais no IME. Graduado em Ciências dos Materiais no IME. E-mail: elias@ime.eb.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7560-6926>

Resumo

O objetivo do presente trabalho é apresentar as atividades executadas no desenvolvimento de um ventilador pulmonar mecânico emergencial para atender a demanda em situação de surto, epidemia ou pandemia com incidência de síndrome respiratória aguda grave, como a pandemia de COVID-19. O equipamento é de baixo custo, fácil fabricação e permite rápida produção local através de técnicas de fabricação por manufatura aditiva, subtrativa e CAD. O transporte do ar para o paciente é realizado por um AMBU pressionado por pistão pneumático controlado por um microcomputador. Resultados preliminares mostram que o protótipo do ventilador permite o controle eficaz da pressão, fluxo e volume do ar. O sistema precisa ser homologado para uso em pacientes.

Palavras-chave: COVID-19. Ventilador Mecânico. Fabricação Digital. AMBU.

Abstract

The objective of this work is to present the development of an emergency mechanical pulmonary ventilator, capable of meeting the demand in case of an outbreak, epidemic, or pandemic with a high incidence of a severe acute respiratory syndrome, such as the COVID-19 pandemic. The equipment has low cost, is easy to manufacture, and may be quickly and locally produced through additive and subtractive manufacturing, and CAD. The air is pumped to the patient by an AMBU bag pressed by a pneumatic piston, controlled by a microcomputer. Preliminary results show that the ventilator prototype allowed an effective control of air pressure, flow, and volume. The system must be approved for use on patients.

Keywords: COVID-19. Mechanical Ventilator. Digital Manufacturing. AMBU.

Resumen

El objetivo de este trabajo es presentar el desarrollo de un ventilador pulmonar mecánico de emergencia, capaz de atender la demanda en caso de brote, epidemia o pandemia con alta incidencia de síndrome respiratorio agudo severo, tomando como ejemplo la pandemia de COVID-19. El equipo es de bajo costo, es fácil de fabricar y se puede producir rápida y localmente mediante fabricación aditiva y sustractiva

y CAD). El aire se bombea al paciente mediante una bolsa AMBU presionada por un pistón neumático, controlado por un microordenador. Los resultados preliminares muestran que el ventilador prototipo permitió un control efectivo de la presión, flujo y volumen del aire. El sistema debe estar aprobado para su uso en pacientes.

Palabras Clave: COVID-19. Ventilador Mecánico. Fabricación Digital. AMBU.

Introdução

Durante o primeiro semestre de 2020 ocorreu um inédito aumento na demanda de ventiladores pulmonares ao redor do mundo (WELLS et al., 2020) causado pela pandemia de COVID-19. Estes equipamentos são essenciais para a manutenção da vida de pacientes com síndrome respiratória aguda grave (SRAG), causada por COVID-19 ou outras doenças respiratórias. Por causa da inesperada demanda, a oferta do mercado não foi suficiente para suprir a necessidade global e em muitos locais não havia ventiladores para todos os pacientes, resultando na morte de muitas pessoas. Os países mais afetados foram os de média e baixa renda, por causa da falta de recursos para adquirir ventiladores e sua precária infraestrutura, com um número de equipamentos muito aquém do necessário, mesmo antes da pandemia (DONDORP; PAPALI; SCHULTZ, 2021; MA et al., 2020). Além disso, as cadeias de distribuição de alguns produtos e matéria prima foram interrompidas, em decorrência do fechamento de indústrias e comércios ao redor do mundo, causando dificuldades na produção de ventiladores mecânicos. Este fato limitou significativamente a oferta e aumentou o tempo esperado para a fabricação dos equipamentos. Para minimizar este problema, no presente

trabalho são apresentados detalhes de um ventilador mecânico emergencial de baixo custo, que pode ser utilizado durante os primeiros socorros ao paciente ou durante um período até que um equipamento mais adequado esteja disponível.

Muitos ventiladores similares foram desenvolvidos ao redor do mundo por grupos de pesquisa independentes, objetivando fabricá-los rapidamente, de maneira a suprir a demanda durante o início da pandemia (PEARCE, 2020). A maior parte destes dispositivos emprega a compressão automatizada de uma bolsa de ventilação emergencial, também conhecida como AMBU (Ambu A/S, Ballerup, Dinamarca), por um atuador linear ou motor de passo (ACHO; VARGAS; PUJOL-VÁZQUEZ, 2020; AL HUSSEINI et al., 2010; VASAN et al., 2020). O AMBU é um equipamento padrão em hospitais, prontamente disponível e que já passou por testes e homologações por agências de saúde em todo o mundo, o que agiliza o processo de validação e homologação dos ventiladores pulmonares que o utilizam. Outras iniciativas utilizam ventiladores elétricos de alta pressão (GARMENDIA et al., 2020; KHAN et al., 2020; VIVAS FERNÁNDEZ et al., 2020) ou empregam válvulas eletromecânicas para controlar o fluxo de ar e oxigênio (LACHANCE et al., 2020; RAYMOND et al., 2020; ZUCKERBERG et al., 2020). Os equipamentos semelhantes empregam sensores de pressão de baixo custo, o que contribuiu para a escassez mundial deste dispositivo para medir pressões na faixa normal do sistema respiratório humano (tipicamente até 40 cmH₂O). Muitos projetos que pretendiam desenvolver um ventilador mecânico, não conseguiram fabricar um

dispositivo final por causa das dificuldades em obter matéria prima, pela complexidade do processo, exigências para o licenciamento e homologação, falta de conhecimento específico sobre a área médica, ausência de financiamento ou simplesmente a perda de interesse uma vez que a pandemia passou a ser melhor controlada em alguns países (PEARCE, 2020).

A equipe envolvida no presente projeto fabricou e testou um protótipo do ventilador de baixo custo, pois o Brasil é um dos países que foi mais severamente impactado pela COVID-19 em 2020 e que teve muita dificuldade em adquirir ventiladores mecânicos durante os primeiros meses da pandemia. Neste período, a compra emergencial de ventiladores mecânicos foi realizada por preços entre R\$ 28.000,00 e R\$ 387.000,00, com um preço médio de R\$ 87.000,00 (VILELA, 2020). Estes valores são muito superiores ao custo de produção do ventilador proposto neste projeto, cujo custo é da ordem de R\$ 5.000,00. Tendo em vista o *know-how* no desenvolvimento de projetos eletromecânicos da equipe e a possibilidade de contribuir para a mitigação dos problemas causados por uma pandemia, acreditamos que o desenvolvimento de um ventilador mecânico emergencial será de grande importância.

Objetivo

Desenvolver um equipamento de baixo custo capaz de suprir as necessidades emergenciais em caso de surto, epidemia ou pandemia, e que possa ser fabricado rapidamente com componentes facilmente

encontrados no mercado. Utilizar técnicas digitais de fabricação para facilitar a produção do ventilador e permitir que sua fabricação seja realizada em qualquer região ou país.

Metodologia

No presente trabalho foi idealizada a montagem de um ventilador mecânico que utiliza uma bolsa de ventilação emergencial pressionada por um pistão pneumático. Não foram identificados projetos com mecanismo semelhante. Os componentes fundamentais (relacionados na Tabela 1) foram adquiridos no mercado brasileiro para testar na prática esta implementação. A maioria dos ventiladores utiliza motores de passo para controlar um acionador que pressiona a bolsa de ventilação. Esta estratégia permite um controle preciso do movimento, porém aumenta a complexidade do projeto, requerendo *drivers* para o motor de passo e mecanismos de atuação mais elaborados. A vantagem destes sistemas é que eles somente precisam de energia elétrica para funcionar. O sistema idealizado requer energia elétrica e ar comprimido para a operação do pistão pneumático, recursos disponíveis nos hospitais. A simplicidade, robustez e confiabilidade do atuador pneumático são pontos positivos que são considerados relevantes para este projeto.

Tabela 1: Especificação dos componentes pneumáticos

Quantidade	Componente	Modelo ou Especificações
1	Pistão pneumático	Cilindro Mini ISO 20 mm x 150 mm
1	Válvula solenoide pneumática	5/3 sol/sol, CE, 1/8", 24 VDC
2	Válvula de retenção pilotada	1/8"
2	Conector pneumático reto	Engate rápido, 6 mm, 1/8"
2	Conector pneumático em T	Engate rápido, 6 mm, 1/8"
2	Sensor de posição do êmbolo	Sensor para cilindro Mini ISO de 20 mm
2	Suporte para sensor de posição	Diâmetro de 20 mm
2	Silenciador	Silenciador em bronze 6 mm, 1/8"
1	Mangueira de PU, metro	Diâmetro de 6 mm

Os primeiros testes foram realizados com a utilização de um pulmão artificial e o acionamento manual do pistão pneumático por válvulas solenoides. Nestes testes mediu-se a pressão do ar saindo do

AMBU, que atingiu mais de 50 cmH₂O, valor suficiente para a utilização do sistema. A pressão máxima para um paciente é 40 cmH₂O. A pressão superior a este limite pode causar barotrauma no paciente, danos aos alvéolos por excesso de pressão. Em um paciente normal esta pressão deve ser em torno de 5 a 10 cmH₂O. Caso haja condição de obstrução das vias respiratória a pressão atinge valores de 10 a 20 cmH₂O e, em pacientes com pulmões não-complacentes (rígidos), entre 20 e 30 cmH₂O (MARINO, 2014). O diagrama eletropneumático do ventilador é mostrado na Figura 1.

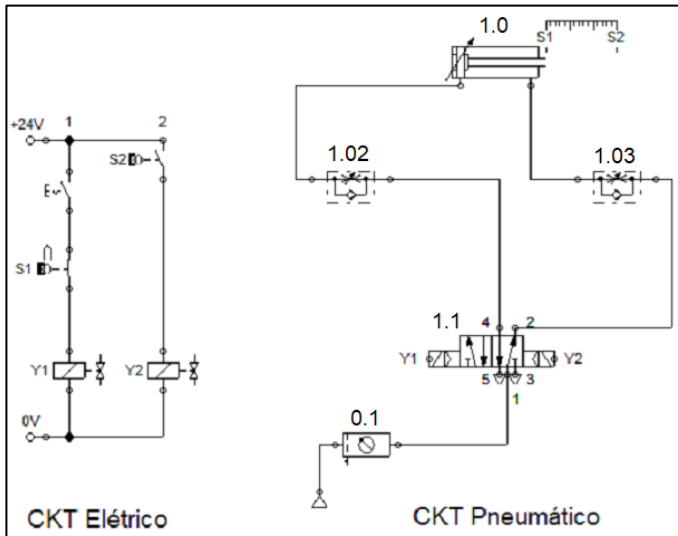


Figura 1: Diagrama do circuito eletropneumático de acionamento do pistão.

Após o primeiro teste bem-sucedido, iniciou-se a automação do sistema, para que o controle do pistão fosse realizado de maneira eletrônica. De acordo com uma nota técnica da Associação de Medicina

Intensiva Brasileira (AMIB, 2021), as especificações mínimas de um ventilador mecânico emergencial são:

1. Modos VCV e/ou PCV;
2. Controle de delta de pressão (sobre a PEEP) no modo PCV (de 5 a 30 cmH₂O) e controle de volume corrente inspirado no modo VCV (de 50 a 700 ml);
3. Controle de FiO₂ (21 a 100%);
4. PEEP (0 até 20 cmH₂O);
5. Controle de tempo inspiratório (no modo PCV) em segundos (0,3 - 2,0 s) e fluxo inspiratório (no modo VCV) - até 70 l/min;
6. Controle de frequência respiratória de 8 a 40 rpm;
7. Medida de pressão de vias aéreas (manômetro analógico ou digital);
8. Medida de volume corrente expirado sempre que possível;
9. Alarme de pressão máxima em vias aéreas, vazamento e queda de rede de gases;
10. Possibilidade de anexar filtro tipo HEPA de alta capacidade (N99 ou N100) no ramo expiratório;
11. Se possível, possuir bateria com pelo menos 2 horas de capacidade.

As siglas apresentadas na lista são apresentadas com seus respectivos significados:

PCV: Ventilação Controlada por Pressão (*Pressure-Controlled Ventilation*).

VCV: Ventilação Controlada por Volume.

PEEP: Pressão Positiva Expiratória Final (*Positive End-Expiratory Pressure*).

FiO₂: Fração Inspirada de Oxigênio.

HEPA: Filtro de Ar Particulado de Alta Eficiência (*High Efficiency Particulate Arrestance*).

Para monitorar os parâmetros da ventilação, apresentar a interface de usuário e controlar o movimento do pistão, empregou-se um microcomputador Raspberry Pi 3B+ (Raspberry Pi Foundation, Cambridge, England, UK) e uma tela sensível ao toque de 7 polegadas (17,8 cm). O programa que controla o sistema foi escrito utilizando a linguagem *Python*, assim como a interface gráfica para controlar os parâmetros do respirador e mostrar os gráficos de pressão, volume e fluxo da respiração em função do tempo. Os parâmetros controlados são a pressão do pulmão, o volume corrente, o volume minuto (fluxo), o tempo de inspiração e expiração, a razão entre estes tempos, e a posição atual do pistão. O código e os esquemas de montagem serão disponibilizados na internet, de maneira aberta, para que qualquer pessoa possa os revisar, utilizar e aprimorar. A lista de componentes eletrônicos utilizados é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2: Especificação dos componentes eletrônicos

Quantidade	Componente	Modelo ou Especificações
1	Computador	Raspberry Pi Modelo 3B+
1	Sensor de pressão	MPX5010DP
1	Sensor de pressão	MPX10
1	Fonte de alimentação	Entrada: 100-240 V C.A.; saída: 5 V C.C., 5 A
1	Fonte de alimentação	Entrada: 100-240 V C.A.; saída: 24 V C.C., 1 A
1	Sensor de pressão, temperatura e umidade	BME280
2	Relés de estado sólido	Acionamento: 3.3 V C.C.; corrente 1 A
1	Display	Tamanho: 7"; sensível ao toque; entrada HDMI
1	Placa de circuito	Placa projetada para o equipamento

O principal mecanismo do ventilador utiliza um pistão pneumático para pressionar um AMBU, transportando ar para o paciente conectado ao ventilador. O pistão tem seu movimento controlado através de um circuito eletrônico que aciona solenoides pneumáticas de acordo com uma rotina programada no software. O controle é realizado por um

algoritmo que mede pressão, fluxo e tempo para determinar por quanto tempo a cada ciclo o pistão deve ser pressionado.

Três modos de operação foram definidos, sendo eles comuns em equipamentos de ventilação pulmonar: PCV, VCV e PSV (Ventilação com Pressão de Suporte - *Pressure Support Ventilation*). No modo PCV, o sistema pressiona o AMBU até que seja atingida a pressão desejada, o limite máximo de volume corrente ou o tempo máximo de inspiração. Após este movimento, o pistão retorna à posição inicial, aguarda o tempo de expiração, e ocorre o início do próximo ciclo. O intervalo entre as inspirações é determinado pela frequência de respiração, definida pelo usuário. A Figura 2 apresenta um fluxograma simplificado do modo de operação PCV. No modo VCV, o sistema pressiona o AMBU até que seja atingido o volume desejado ou o limite máximo de pressão. Após atingir o volume desejado, o pistão retorna. O intervalo entre respirações é temporizado da mesma maneira que no modo PCV. No modo PSV o sistema aguarda a detecção de uma inspiração pelo paciente para iniciar o ciclo de respiração. Após a inspiração auxiliada pelo ventilador e a expiração natural, o próximo ciclo somente se inicia quando o paciente tentar respirar pela próxima vez. Neste modo o sistema não tem uma frequência de respiração fixa, sendo determinada pelo próprio paciente.

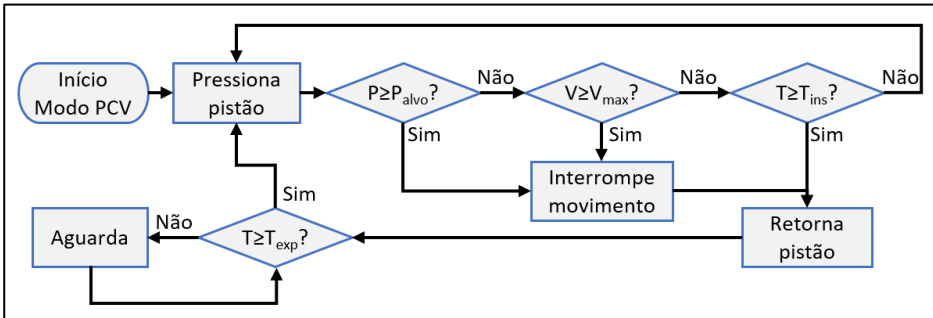


Figura 2: Fluxograma simplificado do modo de operação PCV.

Um esquema mostrando os principais componentes do sistema é mostrado na Figura 3. A pressão do ar para o paciente é medida por um sensor MPX5010DP (NXP Semiconductors, Eindhoven, Países Baixos) capaz de medir pressões de até 102 cmH₂O. Ela é realizada diretamente através da conexão de uma mangueira do equipamento até o filtro de ar (Filtro HME) colocado próximo do paciente, no circuito de ar. A medição de fluxo é realizada com um tubo de orifício projetado e fabricado através de manufatura aditiva (impressão 3D). O funcionamento do tubo de orifício se baseia na diferença de pressão criada pelo fluxo de um fluido em um tubo que contém um orifício com diâmetro reduzido. A partir da medição da pressão diferencial, realizada por um sensor MPX10 (NXP Semiconductors, Eindhoven, Países Baixos), é possível calcular o fluxo de ar para o paciente, sendo uma medida unidirecional. O ar exalado pelo paciente não passa pelo ventilador, evitando a contaminação dos componentes internos. Ele é liberado através de uma válvula instalada próxima ao paciente, um

dispositivo padrão nos circuitos de ventilação pulmonar, podendo passar por um filtro HEPA antes de ir para o ambiente.

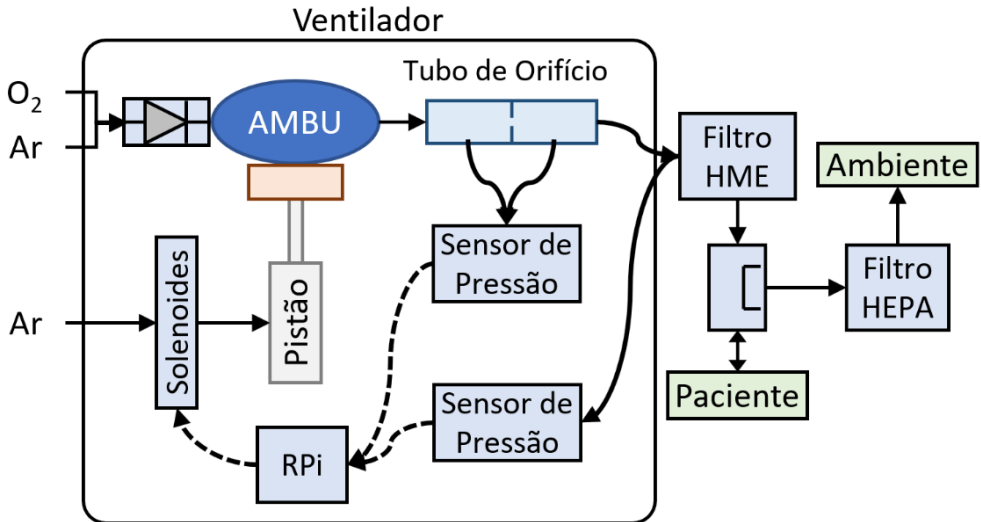


Figura 3: Esquema dos principais componentes do ventilador emergencial.

A estrutura mecânica do ventilador foi projetada utilizando o software “Fusion 360” (Autodesk, Califórnia, E.U.A.) e fabricada utilizando placas de polipropileno com 8 mm de espessura para as superfícies externas, enquanto os demais componentes foram fabricados em plástico ABS, por manufatura aditiva. As placas de polipropileno foram usinadas por uma router com controle numérico computadorizado (CNC), de modo que suas dimensões finais foram fabricadas com certa precisão, exigindo mínimo acabamento manual. Este polímero foi escolhido para a parte externa do ventilador, por ser comumente utilizado

em aplicações hospitalares, apresentar elevada resistência mecânica e química, assim como ser de baixo custo e de fácil usinagem.

Na Figura 4 é mostrada uma foto do protótipo do ventilador. Na face frontal do dispositivo está localizada a tela sensível ao toque, a saída de ar, o tubo para entrada de ar comprimido (utilizado no acionamento do pistão) e o tubo de medição de pressão do paciente. Na mesma face, à direita, se encontra uma porta utilizada para acesso ao AMBU, de maneira a permitir sua rápida substituição quando necessário. Nos lados foram instaladas duas alças para o fácil transporte. Na face traseira existe uma entrada de energia (corrente alternada, 90 a 240V) e a chave para ligar e desligar o equipamento.



Figura 4: Protótipo do ventilador mecânico emergencial de baixo custo.

O sistema elétrico do ventilador utiliza duas fontes de energia para converter a corrente alternada em 24V e 5V, corrente contínua, utilizados para as solenoides e circuitos eletrônicos, respectivamente. Um circuito foi projetado (utilizando o módulo Eagle do software Fusion 360) para fazer a interface entre o Raspberry Pi e os sensores de pressão, solenoides e demais componentes do sistema eletrônico.

Na Figura 5, é possível visualizar os componentes fabricados através de manufatura aditiva, destacados em verde. São estes componentes: a) cubo estrutural de suporte das placas, b) tomada de energia, c) fontes de alimentação, d) válvula solenoide pneumática, e) sensor de pressão, temperatura e umidade, f) tubo de conexão entre o AMBU e o tubo de orifício, g) AMBU, h) entrada de ar, i) tubo de orifício para medição de fluxo, j) sensores de pressão, k) Raspberry Pi, l) tela sensível ao toque, m) placa de circuito para conexão dos sensores, n) cilindro pneumático. Esta técnica se mostrou essencial para o desenvolvimento do projeto, pois permitiu a fabricação de peças complexas (como o tubo de orifício, por exemplo) rapidamente, assim como o aprimoramento iterativo de diversos componentes. A popularização das impressoras 3D também permitirá que muitos componentes sejam fabricados facilmente em diversos locais, não dependendo de uma infraestrutura de logística e distribuição, como seria necessário caso esses componentes fossem fabricados em apenas um local.

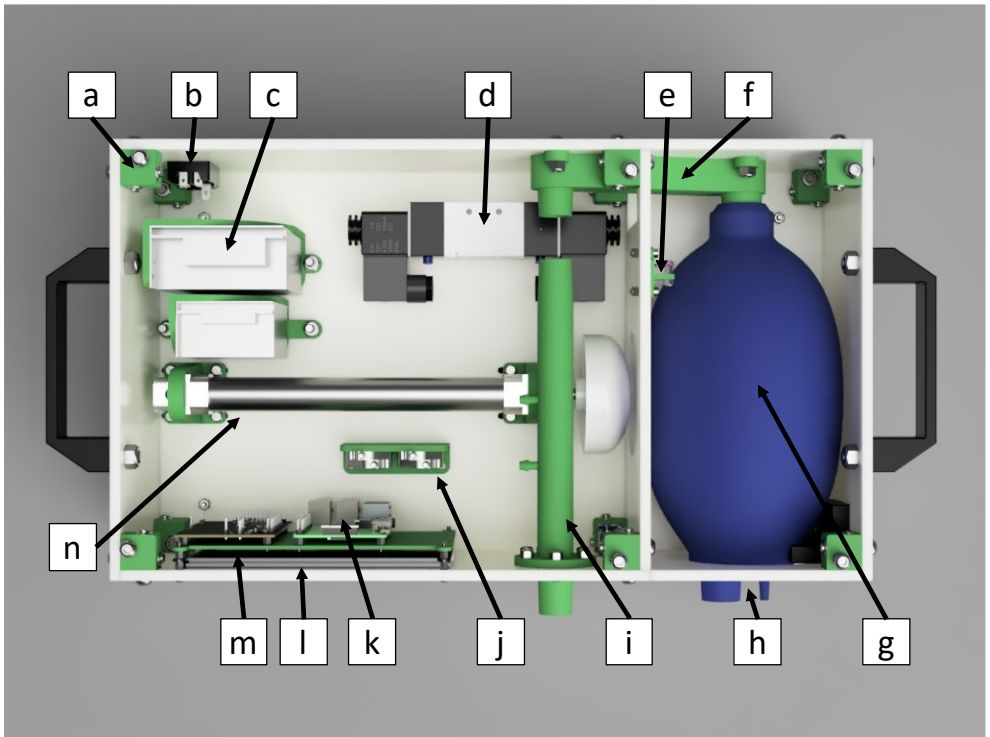


Figura 5: Vista superior do ventilador, mostrando em verde os componentes fabricados por manufatura aditiva. Não são mostrados os cabos e tubulações (Renderização).

Na Figura 6 é possível observar a tela do equipamento em operação, mostrando as curvas de volume, fluxo e pressão, assim como os controles para o modo de operação PCV. A interface do programa apresenta cinco abas, sendo uma para cada modo, uma aba onde podem ser definidos alarmes e uma aba de configuração. A simplicidade da interface objetiva facilitar a operação do equipamento por um profissional, reduzindo a chance de um erro ou modificação indesejada

nos parâmetros. O ventilador ainda conta com um alto-falante e um LED para emitir alertas sonoros e visíveis, caso ocorra algum alarme durante a operação do equipamento. Estes dispositivos também podem ser acionados durante uma mudança de parâmetro, confirmando a operação. Os alarmes disponíveis podem ser habilitados para alertar caso algum parâmetro (fluxo, pressão, volume, tempo de inspiração, razão I:E etc.) esteja fora dos limites estabelecidos pelo profissional de saúde que esteja operando o equipamento.

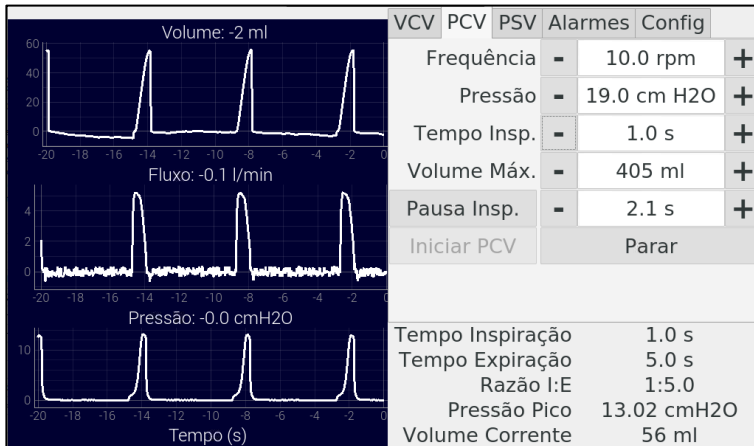


Figura 6: Interface de controle do ventilador mecânico.

Resultados

O ventilador emergencial desenvolvido teve todos os seus componentes testados, atingindo os parâmetros de pressão, fluxo e volume necessários para a ventilação de um paciente adulto. Os testes

foram realizados com um AMBU de 1600 ml, porém o equipamento pode ser adaptado para a utilização de tamanhos menores, mais adequados a pacientes pediátricos.

Comparando as características técnicas do ventilador desenvolvido no presente trabalho com as onze especificações mínimas listadas pela AMIB, constatamos que a maioria dos itens é atendida. O ventilador apresenta três modos de funcionamento e consegue realizar a medição de pressão e volume nas faixas determinadas, o que atende aos requerimentos 1 e 2. Há necessidade de acrescentar um medidor de concentração de oxigênio e um misturador de gases para atender o terceiro requisito. Esta limitação pode ser contornada através da utilização de um misturador de gases externo que forneça ar com oxigênio na concentração desejada. O controle da PEEP não é realizado diretamente pelo ventilador, porém uma válvula externa pode ser empregada no circuito respiratório, atendendo ao requisito 4. A temporização do pistão e a medição de fluxo e pressão fazem parte do algoritmo de controle do ventilador, de maneira que os itens de 5 a 7 da lista são cumpridos. O oitavo item, concernente à medição do volume expirado, não foi contemplado na operação do ventilador mecânico, pois o equipamento não recebe o retorno do ar expirado pelo paciente. O fluxo de ar expirado pode passar por um filtro HEPA (opcional), conectado ao circuito respiratório da maneira convencional, atendendo ao item 10 da lista. Diversos alarmes podem ser programados (relativos ao tempo, pressão, volume e falhas do equipamento), cumprindo a especificação 9 da lista. No último item é sugerida a utilização de uma bateria com ao

menos 2 horas de capacidade, porém decidimos não a utilizar, com o intuito de reduzir os custos e a complexidade do circuito eletrônico. Esta bateria pode ser facilmente acoplada ao sistema.

As dimensões finais de 52,0 cm de largura, 16,0 cm de altura e 28,7 cm de profundidade (volume aproximado de 24 litros) facilitam a montagem, transporte e armazenamento. A área total das placas de polipropileno utilizadas para fabricar a estrutura é inferior a 0,5 m², e os acessórios fabricados por manufatura aditiva utilizam menos de 250g de plástico ABS. O tempo necessário para cortar todas as placas estruturais no equipamento CNC, incluindo a programação, foi inferior a 10 horas, para a fabricação de um protótipo. Este tempo pode ser significativamente reduzido, se mais unidades forem fabricadas em série, pois a etapa de programação é realizada apenas uma vez para todos. O tempo estimado para a fabricação das peças produzidas por manufatura aditiva é de 24 horas, mas pode variar significativamente, dependendo da velocidade e qualidade da impressora utilizada, tornando difícil uma estimativa precisa.

Os custos para a fabricação do primeiro protótipo, excluindo a mão de obra, foram inferiores a R\$ 10.000,00, indicando que a fabricação em maior escala deste equipamento pode reduzir este valor, atingindo a marca proposta de R\$ 5.000,00 por unidade. Este custo é muito menor do que os praticados pelo mercado de ventiladores mecânicos, podendo facilitar o acesso a este equipamento em locais de baixa renda.

Algumas características podem ser aprimoradas, como a implementação de válvulas proporcionais para o controle preciso do movimento do pistão. Essa mudança possibilitará uma ventilação mais natural e que siga mais rigorosamente os padrões de curvas respiratórias. É possível reduzir as dimensões do equipamento, utilizando um pistão pneumático com curso menor. Outra possibilidade para redução das dimensões é utilizar alças embutidas ou removê-las, diminuindo a largura do ventilador em até 7,0 cm.

O circuito eletrônico de controle foi desenvolvido em uma placa que se conecta ao Raspberry Pi através de um cabo de 40 vias. É possível eliminar a necessidade do cabo, conectando os circuitos com um acoplamento direto, através de conectores verticais. Esta mudança aumentará a robustez do sistema, eliminará um possível ponto de falha, além de tornar mais compacto o circuito de controle. Também será avaliada a possibilidade de criar um circuito mais versátil e que possa ser transformado em um HAT (ADAMS, 2014) para o Raspberry Pi. Este circuito poderá ser comercializado separadamente do ventilador, permitindo a um desenvolvedor realizar experimentos com sensores de pressão, entradas e saídas (digitais e analógicas).

A validação das curvas (pressão, fluxo, volume), modos de operação e facilidade de uso do equipamento, poderá ser realizada com o auxílio de médicos que tenham experiência na utilização de ventiladores e no cuidado de pacientes intubados. O equipamento precisa passar pela etapa de homologação, para que seja autorizada a sua utilização em pacientes, atendendo a todas as normas estabelecidas pela

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), ou demais autoridades competentes.

Conclusão

Os resultados dos testes obtidos na avaliação do protótipo mostram que é possível a fabricação de um modelo de ventilador que poderá ser rapidamente produzido para auxiliar em possíveis surtos, epidemias ou pandemias.

Os planos de montagem completos podem ser compartilhados na internet para permitir que qualquer pessoa possa montar um equipamento semelhante. Serão elaboradas instruções de fabricação, montagem e operação, para guiar o futuro desenvolvimento do equipamento.

Apesar de não atender inicialmente a todos os pré-requisitos listados pela AMIB, entendemos que as limitações do ventilador mecânico desenvolvido não são um impedimento para continuar o seu desenvolvimento.

A adição das funções não implementadas aumentará os custos de fabricação do dispositivo, devido à necessidade de incluir novos sensores, válvulas e baterias, porém o equipamento ainda será de baixo custo quando comparado aos demais disponíveis no mercado atualmente.

A produção de um ventilador pulmonar emergencial com tecnologia nacional e baixo custo é de extrema importância para o futuro da saúde no Brasil, reduzindo a dependência externa do país e auxiliando

a medicina a salvar vidas. Em um país muito dependente da importação de produtos tecnológicos, com alto valor agregado, a produção de um sistema de suporte à vida com baixo custo pode se traduzir em muitas vidas salvas. A aquisição de um equipamento equivalente ao importado por valor significativamente superior, poderá ser substituída pela de um equipamento com custo menor ou a utilização dos mesmos recursos em uma quantidade maior de equipamentos.

Agradecimentos

À Casa Firjan (Botafogo, Rio de Janeiro), por nos permitir cortar o material na fresa CNC. À CAPES pelo apoio financeiro do projeto (Processo 88881.505193/2020-01). Ao Laboratório de Instrumentação e Tecnologia Mecânica do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas onde todo o projeto foi desenvolvido. Ao Instituto Militar de Engenharia que apoiou na compra dos insumos. Ao Dr. Bruno Prata Martinez da Universidade Federal da Bahia e ao Dr. Anderson Magalhães Junior pelo apoio técnico na área de fisioterapia respiratória durante o projeto.

Referências

ACHO, L.; VARGAS, A. N.; PUJOL-VÁZQUEZ, G. Low-Cost, Open-Source Mechanical Ventilator with Pulmonary Monitoring for COVID-19 Patients. *Actuators*, v. 9, n. 3, p. 84, set. 2020.

ADAMS, J. **Introducing Raspberry Pi HATs Raspberry Pi**, 31 jul. 2014. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.org/blog/introducing-raspberry-pi-hats/>>. Acesso em: 29 ago. 2021

AL HUSSEINI, A. M. et al. Design and Prototyping of a Low-Cost Portable Mechanical Ventilator. **Journal of Medical Devices**, v. 4, n. 2, p. 027514, 1 jun. 2010.

AMIB, A. DE M. I. B. **Nota técnica sobre características de aparelhos ventiladores artificiais no suporte ao paciente com COVID-19**, 2021. Disponível em: <https://www.amib.org.br/fileadmin/user_upload/amib/2020/abril/26/Nota_tecnica_sobre_caracteristicas_de_aparelhos_ventiladores_artificiais_no_suporte_ao_paciente_com_COVID-19.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2021

DONDORP, A. M.; PAPALI, A. C.; SCHULTZ, M. J. Recommendations for the Management of COVID-19 in Low- and Middle-Income Countries. **The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene**, v. 104, n. 3 Suppl, p. 1–2, mar. 2021.

GARMENDIA, O. et al. Low-cost, easy-to-build noninvasive pressure support ventilator for under-resourced regions: open source hardware description, performance and feasibility testing. **European Respiratory Journal**, v. 55, n. 6, 1 jun. 2020.

KHAN, Y. et al. A low-cost, helmet-based, non-invasive ventilator for COVID-19. **arXiv:2005.11008 [physics]**, 22 maio 2020.

LACHANCE, J. et al. PVP1–The People’s Ventilator Project: A fully open, low-cost, pressure-controlled ventilator. **medRxiv**, p. 2020.10.02.20206037, 5 out. 2020.

MA, X. et al. Emergency and essential surgical healthcare services during COVID-19 in low- and middle-income countries: A perspective. **International Journal of Surgery**, v. 79, p. 43–46, 1 jul. 2020.

MARINO, P. L. **Marino’s the ICU book**. [s.l: s.n.].

PEARCE, J. M. A review of open source ventilators for COVID-19 and future pandemics. **F1000Research**, v. 9, p. 218, 30 abr. 2020.

RAYMOND, S. J. et al. A low-cost, rapidly scalable, emergency use ventilator for the COVID-19 crisis. **medRxiv**, p. 2020.09.23.20199877, 25 set. 2020.

VASAN, A. et al. MADVent: A low-cost ventilator for patients with COVID-19. **MEDICAL DEVICES & SENSORS**, v. 3, n. 4, p. e10106, 2020.

VILELA, P. R. **Preço médio pago por respiradores foi de R\$ 87 mil, diz CGU. Disponível em:** <https://agenciabrasil.ebc.com.br/politica/noticia/2020-05/preco-medio-pago-por-respiradores-foi-de-r-87-mil-diz-cgu>. Acesso em: 13 maio. 2021.

VIVAS FERNÁNDEZ, F. J. et al. ResUHUrge: A Low Cost and Fully Functional Ventilator Indicated for Application in COVID-19 Patients. **Sensors**, v. 20, n. 23, p. 6774, jan. 2020.

WELLS, C. R. et al. Projecting the demand for ventilators at the peak of the COVID-19 outbreak in the USA. **The Lancet Infectious Diseases**, v. 20, n. 10, p. 1123–1125, 1 out. 2020.

ZUCKERBERG, J. et al. A lung for all: Novel mechanical ventilator for emergency and low-resource settings. **Life Sciences**, v. 257, p. 118113, 15 set. 2020.