Monitoramento de Ventilação Mecânica: Estudo de Caso sobre Capnografia e Proposta de Implementação de um Capnógrafo para Acionador Automático de Ambu

Emanuele D. Silva.*. Lucas H. B. Santos.Iago R. M. R. Morais *****
Wellington da S. Fonseca**Marcelo O. e Silva*******

**Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica,Universidade Federal do Pará, PA, Brasil (Tel: +55 91 984112587; e-mail: emanuele.silva@itec.ufpa.br).*
***Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica,Universidade Federal do Pará, PA, Brasil (e-mail:*lucas.*brito.santos@itec.ufpa.br).*
****Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica,Universidade Federal do Pará, PA, Brasil (e-mail:iago.morais@itec.ufpa.br).*
***** Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, PA, Brasil (e-mail: fonseca@ufpa.br)*
****** Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, PA, Brasil (e-mail: mos@ufpa.br),*

Abstract: During the COVID-19 pandemic, the demand for mechanical ventilators increased due to the significant number of patients with respiratory failure. However, instances of power outages highlighted the vulnerability of patients dependent on these vital devices, leading to the search for alternatives such as the manual resuscitator. Due to the difficulty in maintaining precise frequency and the physical fatigue associated with this procedure, the need for more efficient solutions became apparent. Thus, the Automated Ambu Actuator (AAA) emerged, automating the process of pulmonary ventilation with parameter adjustment according to the patient's needs. To enhance the monitoring of this device, a study is proposed for the development of a capnograph module. This capnograph, composed of an infrared emission system and sensors connected to a collection tube adapted with nasal cannulas, aims to monitor the quantity of carbon dioxide in the exhaled air by the patient. Such data is crucial for assessing the effectiveness of breathing and pulmonary ventilation. The implementation of this capnograph in the AAA has the potential to significantly enhance monitoring and treatment efficacy, providing precise data during mechanical ventilation.

Resumo: Durante a pandemia de COVID-19, a demanda por ventiladores mecânicos aumentou devido ao expressivo número de pacientes com insuficiência respiratória. No entanto, situações de queda de energia elétrica evidenciaram a vulnerabilidade dos pacientes dependentes desses dispositivos vitais, levando à busca por alternativas como o reanimador manual. Devido a dificuldade em manter uma frequência precisa e o cansaço físico associado a esse procedimento destacaram a necessidade de soluções mais eficientes. Surgiu então o Acionador Automático de Ambu (AAA), automatizando o processo de ventilação pulmonar com ajuste de parâmetros conforme a necessidade do paciente. Para aprimorar o monitoramento desse dispositivo, propõe-se o estudo para o desenvolvimento de um módulo capnógrafo. Esse capnógrafo, composto por um sistema de emissão de infravermelho e sensores conectados a um tubo de coleta adaptado com cânulas nasais, visando realizar o monitoramento da quantidade de dióxido de carbono no ar exalado pelo paciente. Essas informações são cruciais para avaliar a eficácia da respiração e ventilação pulmonar. A implementação desse capnógrafo no AAA tem o potencial de aprimorar significativamente o monitoramento e eficácia do tratamento, fornecendo dados precisos durante a ventilação mecânica.

Keywords: *Ambu. Capnograph. Monitoring. Mechanical Ventilation.*

Palavras-chaves: *Ambu. Capnógrafo. Monitoramento. Ventilação Mecânica.*

1. INTRODUÇÃO

Durante o período pandêmico, a alta incidência de casos graves da doença resultou em uma demanda significativa por ventiladores mecânicos, uma vez que a insuficiência respiratória era uma complicação frequente (Avelar et al. 2021). O ventilador mecânico, sendo um dispositivo médico vital em casos de insuficiência respiratória aguda, fornece suporte ventilatório ajustável às necessidades específicas de cada paciente (Carvalho et al. 2007). Os mesmos desempenharam um papel crucial, sendo essenciais para auxiliar e, em muitos casos, realizar o

processo de respiração em pacientes gravemente afetados pela COVID-19. Estes dispositivos, comumente utilizados em Unidades de Terapia Intensiva (UTIs), foram fundamentais para garantir a oxigenação adequada em situações em que a ventilação espontânea do paciente não era suficiente (Diehl. 2020).

Apesar da importância desse equipamento, situações de quedas de energia elétrica, como observadas em alguns municípios do Amapá, Brasil, evidenciaram a vulnerabilidade dos pacientes dependentes desses dispositivos (Carvalho et al. 2021). Nessas circunstâncias, onde a falta de energia ameaça o funcionamento regular dos ventiladores mecânicos, profissionais de saúde frequentemente utilizam o reanimador manual. Os profissionais de saúde, adaptando-se às adversidades, recorrem ao reanimador manual para fornecer suporte respiratório temporário, assegurando a continuidade do atendimento aos pacientes afetados pela COVID-19. Porém, tem sido um desafio garantir uma frequência precisa, devido à dificuldade de manter um ritmo constante e o cansaço físico associado ao procedimento.

Como alternativa, foi desenvolvido o Acionador Automático de Ambu (AAA). Esse dispositivo automatiza o reanimador manual, utilizando um sistema híbrido, ar comprimido e energia elétrica, para comprimir a bolsa de silicone responsável pela ventilação pulmonar. Uma de suas vantagens é a capacidade de ajustar os parâmetros de frequência respiratória e volume corrente de acordo com a necessidade do paciente. Por conta do sistema de ar comprimido, o AAA é capaz de realizar suas funções normalmente na ausência de energia elétrica (Santos et al. 2021).

A proposta deste trabalho é aprimorar o Acionador Automático Automatizado de Ambu (AAA), incentivando a pesquisa e o desenvolvimento de soluções de baixo custo que sejam facilmente implementadas. Nesse contexto, sugere-se a integração de um sensor de concentração de dióxido de carbono (CO2), como um capnógrafo, para elevar a eficácia do sistema.

2. ACIONADOR AUTOMÁTICO DE AMBU

O Acionador Automático de Ambu foi desenvolvido para operar em hospitais e ambientes de atendimento de emergência, onde a energia elétrica nem sempre está disponível. Ele funciona com base na mecânica respiratória humana, utilizando um reanimador manual para fornecer ar aos pulmões do paciente durante a fase de inspiração, enquanto a expiração ocorre naturalmente devido à fisiologia pulmonar do paciente (PEREIRA, 2021).

Juntamente com a parte pneumática, responsável por automatizar o reanimador, foram integrados sensores capazes de monitorar a frequência cardíaca, os níveis de oxigênio no sangue e os níveis de dióxido de carbono, sendo esses componentes parte integrante do sistema eletrônico do equipamento.

2.1 Sistema pneumático

O desenvolvimento do sistema pneumático para efetuar os movimentos de compressão e relaxamento da bolsa reanimadora envolveu a utilização de um atuador pneumático específico, o Micro Cilindro Pneumático (atuador unidirecional) de dupla ação ISO 6432, com 20 mm de diâmetro e 100 mm de curso. Após a realização de testes, confirmou-se que o cilindro era capaz de gerar a força necessária para o funcionamento adequado do dispositivo.

Para garantir o desempenho ideal do sistema pneumático, foram incluídos dois componentes essenciais: um lubrificador e silenciadores de ar. O lubrificador desempenha o papel crucial de fornecer uma quantidade adequada de lubrificação ao ar comprimido que entra no sistema. Isso não apenas assegura a durabilidade e o bom funcionamento dos componentes pneumáticos, mas também previne o desgaste prematuro. Por outro lado, os silenciadores de ar desempenham um papel importante na redução do ruído gerado durante o funcionamento do sistema pneumático, criando um ambiente mais silencioso e confortável (Santos et al. 2021). Tais elementos são indispensáveis para garantir o desempenho eficiente e confiável do sistema pneumático como um todo.

2.2 Sistema de monitoramento

Com o intuito de monitorar os sinais vitais do paciente e garantir uma ventilação eficaz, foi desenvolvido um sistema de sensores integrados ao AAA.

A fim de garantir a acessibilidade e o baixo custo do sistema, os sensores selecionados são compatíveis com o módulo Arduino Nano. Especificamente, o sistema engloba o sensor de pressão diferencial MPX2010dp, cuja função primária é monitorar a pressão dos gases injetados durante a ventilação. Este sensor assegura que a pressão aplicada se mantenha dentro dos limites seguros, aproximadamente 760 mmHg. Esse valor diz respeito à soma das pressões parciais de oxigênio, dióxido de carbono e nitrogênio, injetadas (Guyton et al. 1971). O sensor oxímetro escolhido, MAX30100, desempenha um papel crucial ao verificar a concentração de oxigênio no paciente e monitorar sua frequência cardíaca, contabilizando os batimentos por minuto.

A oximetria de pulso, através do uso deste sensor, é fundamental para o monitoramento da oxigenação no sangue, fornecendo dados sobre a fração inspirada de oxigênio. Além de avaliar a oxigenação, esse método também oferece dados sobre a frequência cardíaca. (Veras et al. 2021). O design do sensor oxímetro foi modelado pelos desenvolvedores e impresso em uma impressora 3D.

Na fase inicial dos estudos para medir a concentração de dióxido de carbono, os testes foram conduzidos utilizando o sensor MQ-135, que avalia a concentração de dióxido de carbono ao final da expiração do paciente. Níveis de CO2 elevados podem indicar uma inadequada eliminação deste gás (Auler Jr. 2020).

A placa de circuito impresso, composta por sinalizadores visuais e sonoros, integra-se aos sensores para indicar informações vitais ou possíveis condições adversas durante o monitoramento. Considerando futuros estudos,

planeja-se desenvolver um módulo completo específico para a medição do CO2 na expiração.
A colaboração desses sensores em conjunto com o módulo Arduino, permite a coleta precisa de dados vitais, incluindo pressão dos gases, níveis de dióxido de carbono, concentração de oxigênio e frequência cardíaca. Essas informações são transmitidas a um sistema de *software* que processa, exibe e interpreta os dados, possibilitando uma supervisão contínua e intervenção imediata, se necessário (Santos et al. 2022). O atual estado do AAA pode ser visto na Fig 1.

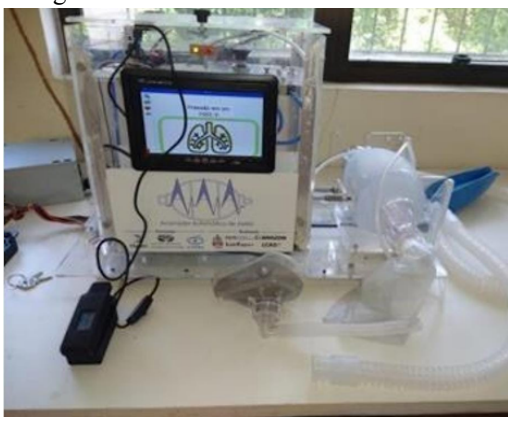

Fig 1. Acionador Automático de Ambu

3. CAPNOGRAFIA

Com o intuito de medir a concentração de (CO2) no ar exalado para avaliar a ventilação pulmonar e a eficácia da respiração em pacientes, a capnografia é um método de monitoramento que realiza essa medição e exibe os resultados de forma contínua. Comum em ambientes como salas de cirurgia e unidades de terapia intensiva (Cruz, 2024), a capnografia permite observar uma forma de onda característica que apresenta 4 fases, sendo essas as mesmas para qualquer ser humano. Isto posto, uma alteração na onda pode indicar uma complicação na ventilação (Cairo et al. 2010). A Fig. 5 descreve as 4 fases supracitadas.

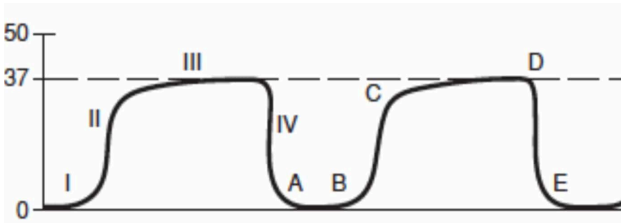

Fig 5. Curva de Capnografia, Nerone(2014)

Durante a primeira fase, representada pelo segmento AB, o ciclo respiratório se inicia com a entrada de gases pelas vias aéreas. Nesse estágio inicial, observa-se uma baixa ou quase nenhuma presença de CO2. Na fase II, identificada pelo trecho BC, o CO2 proveniente das trocas gasosas nos alvéolos é exalado e se mistura com a porção do gás onde não ocorreu a oxigenação. Consequentemente, os níveis de CO2 aumentam rapidamente no volume de gás detectado à medida que o paciente exala.

Já na fase III, que se estende do ponto C ao ponto D, a concentração de dióxido de carbono permanece relativamente constante até atingir seu pico máximo em D, indicando o fim da expiração. O segmento DE marca o início da inspiração, ou seja, o reinício do ciclo respiratório. Durante esse período, os níveis de CO2 caem gradualmente até atingirem zero, à medida que as vias respiratórias se enchem de oxigênio. Quando a curva de CO2 retorna à linha de base, essa fase é denominada fase Zero.
Com base nisso, compreender a ciência por trás do sensor de capnografia é fundamental para reconhecer sua importância no monitoramento respiratório dos pacientes. O sensor é a peça central do capnógrafo, permitindo a detecção precisa dos níveis de CO2 e fornecendo informações valiosas sobre o estado respiratório do paciente. Isso ajuda os profissionais de saúde a tomar decisões clínicas informadas e a fornecer o melhor cuidado possível aos pacientes em uma variedade de cenários clínicos.

4. METODOLOGIA

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo sobre a capnografia, introduzir o método *Non-Dispersive infrared (*NDIR) de medição de concentração, além de propor um sistema que realizará a função do capnógrafo no Acionador Automático de Ambu, demonstrando como ele pode ser aprimorado com a integração do sensor de concentração de CO_2. Um aspecto crucial desta pesquisa é fornecer uma explicação clara sobre o funcionamento do capnógrafo, com o intuito de facilitar a compreensão dessa ferramenta, capaz de monitorar e exibir dados sobre a ventilação do paciente. Ademais, o foco principal é investigar os benefícios significativos proporcionados por essa tecnologia.
Os estudos foram conduzidos por meio de revisões bibliográficas abrangentes e pesquisas em diversas fontes, incluindo o Google Acadêmico, Scielo, Anais de Encontros de Engenharia, Congressos de Ensino em Engenharia e repositórios acadêmicos. Inicialmente, um tema foi definido e palavras-chave foram cuidadosamente selecionadas para orientar a busca. A partir de trabalhos de referência, os principais tópicos de interesse foram estabelecidos como “Ambu”, "Capnógrafo", "Monitoramento" e "Ventilação Mecânica". A seleção dos artigos passou por uma análise criteriosa, priorizando sua relevância e contribuição para o monitoramento da concentração de CO2 durante o uso de ventilador mecânico, com ênfase especial em destacar os contextos onde o capnógrafo é mais frequentemente aplicado.

4.1 Método NDIR (Non-Dispersive Infrared)

O princípio subjacente à medição de concentração de CO2 está intrinsecamente conectado à interação da luz com a estrutura atômica da amostra. Entre as diversas teorias que buscam elucidar esse fenômeno complexo, destaca-se um postulado proposto por Niels Bohr, que postula que os elétrons podem absorver ou emitir energia ao transitarem de um estado de energia para outro (Sussichi et al. 2010).

Essa dinâmica energética é fundamental para compreender como os materiais interagem com a luz e como essa interação pode ser utilizada para medir concentrações de gases.

A Lei de Lambert-Beer (2) estabelece uma relação entre a absorvância de luz por uma amostra e sua concentração. Conforme essa lei, à medida que a concentração da amostra aumenta, a absorção de luz também aumenta proporcionalmente. Para entender o princípio da absorvância, é necessário compreender a transmitância, que é uma medida da fração de luz que passa através da amostra. Quanto maior a transmitância, mais luz é capaz de passar pela amostra (Da Silva Fachneli et al. 2023). De acordo com Lima (2013), a transmitância (1) é expressa como a razão entre a potência radiante após a luz atravessar a amostra (Pλ°) e a potência de entrada (Pλ), conforme a equação

$$T = P\lambda^{\circ} / P\lambda \quad (1)$$

Por outro lado, a absorvância (A) é definida como o logaritmo negativo da transmitância, ou seja,

$$A = log(P\lambda^{\circ} / P\lambda) \quad (2)$$

Os sensores que operam com base na absorção de infravermelho aplicam os princípios da Lei de Lambert-Beer para determinar a concentração de substâncias na amostra. Estes dispositivos consistem em emissores de radiação infravermelha, que emitem luz nessa faixa de comprimento de onda através da amostra, e detectores que registram a quantidade de luz transmitida. Os sensores são capazes de quantificar a concentração de substâncias na amostra usando a absorvância da luz infravermelha como base. De semelhante modo, o sensor capnográfico opera detectando a capacidade de absorção de luz do dióxido de carbono (CO2) na região infravermelha do espectro eletromagnético, conforme a Fig. 6 apresenta. Nesse tipo de sensor, a presença e a concentração de CO2 na amostra são determinadas pela medida da absorção da luz infravermelha pelo gás. Essa técnica permite uma análise precisa da concentração de CO2 em uma variedade de aplicações, como monitoramento respiratório em ambientes médicos.

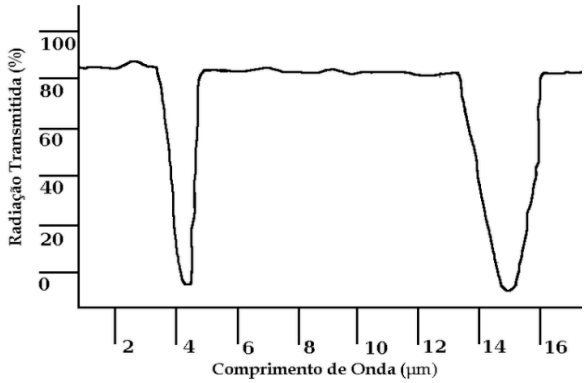

Fig 6. Absorção de CO2, apresentando a relação entre a radiação transmitida e o comprimento de onda em µm.

Ainda, esse sensor se enquadra no tipo NDIR-*Non Dispersive InfraRed*. Para esse tipo de sensor, é comparado a intensidade de luz emitida pela amostra em um comprimento que a mesma absorve, com a intensidade em um comprimento que a amostra não absorve. Quando a luz atravessa a amostra, a quantidade de energia absorvida pelo componente em estudo, neste caso, o CO2, é avaliada. Ao comparar as intensidades de luz em comprimentos de onda onde ocorre absorção (relacionado à presença do CO2) e onde não há absorção, podemos quantificar a concentração desse gás na amostra. A quantificação desta absorção leva à geração de uma curva, a curva de capnografia.

5. PROPOSTA DE CAPNÓGRAFO

A eficácia do Ventilador Mecânico se dá devido aos aparelhos que trabalham em conjunto com o mesmo, sendo os principais o oxímetro e o capnógrafo (Otsuki et al., 2023). Para compreender os sensores, é imprescindível conceituar ventilação e oxigenação. A ventilação pulmonar é o processo de levar oxigênio aos pulmões e retirar o dióxido de carbono. Durante a inspiração, os pulmões se enchem de ar oxigenado, enquanto a expiração remove o dióxido de carbono do corpo. A eficiência dessa troca gasosa depende da adequação dos movimentos respiratórios cíclicos (Ghiggi at al., 2021) . O processo de oxigenação, se refere às trocas gasosas, ou seja, levar oxigênio aos tecidos. A oxigenação é o processo vital de troca gasosa que leva oxigênio aos tecidos do corpo, essencial para o funcionamento celular e apoio aos processos metabólicos (Dias et al. 2023).

A capnografia é uma técnica que avalia a eficácia das trocas gasosas e o fluxo de ar. Uma ventilação adequada e a realização eficaz das trocas gasosas são cruciais para garantir resultados ótimos. Ao fornecer dados precisos sobre a quantidade de CO2 exalada, a capnografia permite monitorar tanto a ventilação do paciente quanto a eficiência na eliminação do gás carbônico.

No estágio atual do projeto do AAA, os desenvolvedores conseguiram implementar com sucesso o sensor de oxímetro, que foi concebido e fabricado internamente. Então, o próximo passo essencial para aprimorar o dispositivo é desenvolver o sensor de capnografia. Sendo o objetivo do Acionador Automático de Ambu utilizar peças e microcontroladores de baixo custo e facilmente acessíveis, garantindo sua replicabilidade e rápida produção, a seleção cuidadosa do sensor de CO2 é fundamental. Embora haja sensores do tipo *Non Dispersive Infrared Sensor* disponíveis no mercado, foi crucial encontrar uma opção que fosse compatível com a placa Microcontroladora Arduino. Essa compatibilidade permite que o sensor envie os valores detectados para o Arduino, que por sua vez pode exibir esses dados de forma clara e precisa. O Arduino é uma placa de prototipagem eletrônica de *hardware* livre, dotada de um microcontrolador e suporte de entrada/saída embutido. Além disso, possui uma linguagem de programação padrão, baseada em C/C++ (PEÑA, 2020) Para esse projeto, o módulo microcontrolador Arduino Uno será utilizado. Essa compatibilidade é essencial para garantir a integração suave do sensor de capnografia com o sistema do Acionador Automático de Ambu.

Sabe-se que a concentração de CO2 no volume expirado por uma pessoa é aproximadamente de 40.000 partes por milhão (ppm) (Cavalcante, 2009). Portanto, o sensor precisa ser capaz de detectar níveis de concentração dentro dessa faixa de valores para um monitoramento eficaz. O sensor encontrado, que atende a essas características, é o MH-Z16 NDIR, Fig.7. Desenvolvido pela *Zhengzhou Winsen Electronics Technology*, que emprega a tecnologia padrão NIDR e de acordo com o fabricante, não requer oxigênio para medir a concentração de dióxido de carbono. O MH-Z16 NDIR possui um alcance de 0 a 100 mil ppm, com um consumo médio de corrente elétrica de 85 mA e um tempo de resposta inferior a 30 segundos. Além disso, tem uma expectativa de vida útil superior a 10 anos (MH-Z16 NDIR CO2 SENSOR-Winsen, 2024).

Fig 7.Sensor de CO2, MH-Z16 NDIR CO2 SENSOR

Sendo assim, o desenvolvimento do Capnógrafo representa um avanço para o monitoramento da ventilação mecânica. O sensor MH-Z16 NDIR oferece uma solução confiável e durável para identificar anomalias durante a ventilação, graças à sua capacidade de detectar concentrações de CO2 na faixa necessária para uma vigilância eficaz. Com sua resposta rápida, longa vida útil e eficiência energética, ele garante uma supervisão precisa e contínua, otimizando a assistência respiratória aos pacientes. Isso não apenas fornece dados em tempo real para facilitar a tomada de decisões clínicas pelos profissionais de saúde, mas também aprimora o produto já desenvolvido, tornando-o mais completo e eficiente.

5.1 Proposta de implementação

O sensor mencionado desempenha um papel crucial no sistema do capnógrafo. O circuito, composto pelo Arduino e pelo sensor MH-Z16 NDIR, integra o analisador NDIR, fornecendo parâmetros sobre a concentração de CO2. Essa configuração é fundamental para obter informações detalhadas sobre a respiração do paciente.

O tipo de capnógrafo selecionado para o Acionador Automático de Ambu é o *sidestream*. Esse tipo de capnógrafo se destaca por seu mecanismo de aspiração da amostra de CO2 até o monitor ou módulo adjacente (Cruz, 2024). Por meio dessa estrutura, é possível realizar uma análise precisa da concentração de CO2 durante o processo de ventilação. Além disso, o capnógrafo *sidestream* é equipado com um sistema de proteção na entrada do módulo de monitoramento, que previne a aspiração de líquidos ou condensados, assegurando a integridade e a precisão das medições (NERONE, 2014). Tal recurso é essencial para evitar danos ao interior do módulo monitor e ao sensor, garantindo um funcionamento confiável e durável do sistema como um todo. A Fig 8 apresenta as conexões e a forma de apresentação.

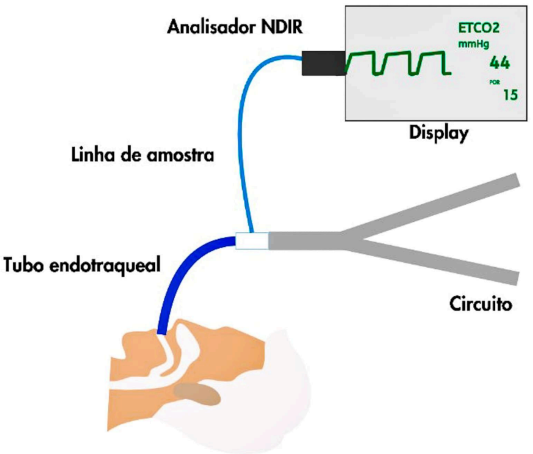

Fig 8. Implementação do Capnógrafo

6. CONCLUSÃO

O capnógrafo emerge como uma ferramenta importante no monitoramento de pacientes submetidos à terapia de ventilação. Sua relevância é inegável, pois fornece informações cruciais sobre a função respiratória do paciente, permitindo uma intervenção rápida em caso de complicações. No entanto, a acessibilidade a essa tecnologia pode ser um desafio em muitos contextos devido aos altos custos associados aos equipamentos. Nesse sentido, o desenvolvimento de um sensor de baixo custo, com peças facilmente acessíveis, representa um avanço significativo. Essa abordagem não apenas tornaria o monitoramento de capnografia mais acessível em ambientes com recursos limitados, mas também facilita o acesso a essa tecnologia em todo o mundo. Em conclusão, o desenvolvimento de um sensor de capnografia acessível é um passo crucial em direção à democratização do cuidado médico e à melhoria do acesso a tecnologias essenciais de monitoramento. Essa inovação promete não apenas transformar a maneira como monitoramos pacientes ventilados, mas também abrir novas possibilidades para o tratamento de condições respiratórias em todo o mundo.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam sinceros agradecimentos à Universidade Federal do Pará, ao Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia e ao Laboratório de Concepção e Análise de Dispositivos Elétricos pelo suporte essencial fornecido para a condução desta pesquisa visando o desenvolvimento de um protótipo a fim de aprimorar o Acionador Automático de Ambu.

REFERÊNCIAS

Anand, J.A., Pawan, K., Narendran, M., Johnson, M., and Rakesh, S. (2022). Real Time Livestock Rearing. 2022 International Conference on Computer, Power and Communications (ICCPC), Chennai, Índia.

Auler Jr, J. O. C., et al. (2020). Estudo Comparativo entre CO2 Obtido por Capnografia e Gasometria no Pós-Operatório de Cirurgia Cardíaca. Brazilian Journal of Anesthesiology, 40(5), 311-318.

Avelar, F. G. et al. (2021). Complicações da Covid-19: desdobramentos para o Sistema Único de Saúde. Physis: Revista de Saúde Coletiva, 31, e310133.

Cairo, J. M., & Pilbeam, S. P. (2010). Mosby's respiratory care equipment. Mosby/Elsevier.

Carreira, A. (2015). Capnografia em Pessoa submetida a Ventilação Mecânica Não Invasiva. (Tese de Doutorado, Instituto Politécnico de Setúbal, Escola Superior de Saúde).

Carvalho, C. R. R., Toufen Junior, C., & França, S. A. (2007). Ventilação mecânica: princípios, análise gráfica e modalidades ventilatórias. Jornal Brasileiro de Pneumologia, 33(2), 54-70.

Carvalho, J. W. S., & Carvalho, S. S. C. (2021). Consequências jurídicas do apagão elétrico no Amapá. In: De apagão a apagado: ensaios sobre a questão energética amapaense (p. 38).

Cavalcante, F. S. D. S. (2009). O estado da arte da captura e armazenamento geológico de CO2 como forma de mitigação das mudanças climáticas.

Cruz, N. A. A. D. (2024). Intervenções de enfermagem especializada à pessoa em situação crítica com capnografia (Doctoral dissertation).

Da Silva Fachneli, I., et al. (2023). Medição de CO2 utilizando a tecnologia de infravermelho não dispersivo (NDIR). Notas técnicas, 13(1).

Dias, T. N., et al. (2023). AS VANTAGENS DA CAPNOGRAFIA NO PRÉ-HOSPITALAR: UMA REVISÃO INTEGRATIVA DA LITERATURA. Revista Ibero-Americana de Saúde e Envelheciment, 9(2), 66-82.

Diehl, B. L. (2024). O uso de ventiladores na pandemia do covid-19. InterAmerican Journal of Medicine and Health, 3. DOI: 10.31005/iajm.v3i0.141. Disponível em: https://iajmh.emnuvens.com.br/iajmh/article/view/141. Acesso em: 1 fev. 2024.

Ghiggi, K. C., Audino, L. F., & Almeida, G. B. (2021). Ventilação mecânica. VITTALLE-Revista de Ciências da Saúde, 33(1), 173-184.

Guyton, A. C., et al. (1971). Tratado de fisiologia médica. México: Interamericana.

Junges, A. L., et al. (2018). Efeito estufa e aquecimento global: uma abordagem conceitual a partir da física para educação básica. Experiências em Ensino de Ciências, 13(5), 126-151.

Lima, L. S. (2013). Lei de lambert–beer. Revista de Ciência Elementar, 1(1).

MH-Z16 NDIR CO2 SENSOR-Winsen. Disponível em: <https://www.winsen-sensor.com/sensors/co2-sensor/mh-z16.html>. Acesso em: 21 fev. 2024.

Nerone, G. (2014). Tipos de capnógrafos.

Otsuki, D. A., & Ambrósio, A. M. (2023). Oximetria de pulso, capnografia e capnografia volumétrica. Ventilação mecânica em medicina veterinária.

Peña, C. (2020). *Arduino IDE: Domina la programación y controla la placa*. RedUsers.

Pereira, M. L., & Grande, C. (2021). Modelagem e Controle Preciso do Tempo de Inspiração de um Ventilador Pulmonar do tipo Ambu Automatizado. (Orientador: M. L. M. Kimpara).

Poon, K. M., Lui, C. T., & Tsui, K. L. (2016). Prognostication of out-of-hospital cardiac arrest patients by 3-min end-tidal capnometry level in emergency department. Resuscitation, 102, 80-84.

Santos, L. H. B., et al. (2022). Desenvolvimento tecnológico do Acionador Automático de Ambu para implantação em hospitais. In: *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*.

Sensor de Frequência Cardíaca Oxímetro MAX30100. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/sensor-de-frequencia-cardiaca-oximetro-max30100>. Acesso em: 28 fev. 2024.

Sensor de Gás Toxico MQ-135. Disponível em: <https://www.pontodaeletronica.com.br/sensor-de-gas-toxico-mq-135.html>. Acesso em: 28 fev. 2024.

Sussuchi, E. M., Machado, S. M. F., & Moraes, V. R. S. (2010). Origem da teoria quântica. Química I.

Veras, I. C. G., et al. (2021). Oximetria de pulso na atenção básica: produção de conteúdo digital na pandemia de COVID-19. Revista Baiana de Saúde Pública, 45(N. especial 2), 70-79.

$$\frac{1}{T} = a + \beta \ln ln\,(R) + C(ln\,(R))^3 \quad (1)$$