

MANOVACUÔMETRO DIGITAL PARA MEDIÇÃO DE PRESSÃO RESPIRATÓRIA PULMONAR

Charles Rech¹

charles.rech@ufsm.br

André Francisco Caldeira¹

andre.caldeira@ufsm.br

Felipe da Silva Morais¹

smithhmoais@gmail.com

Priscila Bernardeli Miranda¹

priscilaji-pa@hotmail.com

Fabrcio Farias da Fontoura²

fabricao.fontoura@unilasalle.edu.br

Franciele Viçosa Lemes²

francielelemes32@gmail.com

Simone Ferigolo Venturini³

sfventurini@yahoo.com.br

Resumo: Dentre as possíveis áreas de aplicação da Internet das Coisas (IoT), a área da saúde tem grande potencial com inúmeras possibilidades de aplicabilidade, sobretudo no que se refere à prevenção de doenças crônicas e à redução de infecções hospitalares – um dos principais agravantes da qualidade de vida dos pacientes e dos altos custos das instituições. O objetivo do presente trabalho é o de desenvolver um manovacúmetro digital que permite a medição local da pressão nas vias aéreas de pacientes em tempo real e que utiliza a comunicação do tipo sem fio e a interface com dispositivos móveis, possibilitando o armazenamento das medidas em nuvens. Este dispositivo apresenta interface amigável, confiabilidade de aquisição e dimensões reduzidas. Dessa forma, os dados ficam disponíveis para análise de profissionais especializados remotamente. A interface é desenvolvida em software de código aberto para realizar a coleta de dados e utiliza dispositivos móveis que são parte fundamental da sociedade

Palavras-chaves: Medições Biomecânicas; Manovacúmetro Digital; Internet das Coisas (IoT); Comunicação Wireless.

DIGITAL MANOVACUOMETER FOR MEASUREMENT OF PULMONARY RESPIRATORY PRESSURE

Abstract: Among the possible areas of application of the Internet of Things (IoT), the health care has great

1 Universidade de Santa Maria, UFSM.

2 Universidade La Salle, Unilasalle.

3 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS.

potential with numerous possibilities of applicability, especially with regard to the prevention of chronic diseases and the reduction of hospital infections - being one of the main aggravating factors in the quality of life of patients and the high costs of institutions. The goal of this work is to develop a digital manovacuometer that allows local measurement of airway pressure in patients in real time using wireless communication and interface with mobile devices, enabling the storage of measurements in clouds. This device has a friendly interface, acquisition reliability and reduced dimensions. Therefore, the data is available for analysis by specialized professionals remotely. The interface is developed in open source software to perform data collection and uses mobile devices that are a fundamental part of society.

Keywords: Biomechanical Measurements; Digital Manovacuometer; Internet of Things (IoT); Wireless Communication.

INTRODUÇÃO

A manovacuometria é amplamente utilizada em procedimentos médicos e fisioterápicos, e consiste na mensuração das pressões respiratórias estáticas máximas por meio de um dispositivo clássico e confiável, denominado manovacúmetro (SANTOS, 2017). Nesse procedimento ocorre a medição da pressão expiratória máxima ($PE_{máx}$) e a pressão inspiratória máxima ($PI_{máx}$) para avaliar a força gerada pelo conjunto dos músculos inspiratórios e expiratórios. Estes dados possibilitam que seja diagnosticada a fraqueza dos músculos envolvidos na respiração, a insuficiência respiratória devido à falência/fadiga muscular respiratória e ainda auxilia na elaboração de protocolos terapêuticos, tais como avaliar o comportamento das forças respiratórias antes e após treinamentos, bem como avaliar pacientes críticos sob ventilação mecânica invasiva (SODRÉ, 2017).

Em geral, para as medições da $PI_{máx}$ e $PE_{máx}$, são utilizados equipamentos analógicos com princípios mecânicos que, em geral, caracterizam-se por permitir apenas uma mensuração pontual e não nos diferentes momentos da curva de pressão exercida pelo indivíduo avaliado, o que pode dificultar a leitura, tendo em vista o pequeno tempo de pressão exercida. Além disso, apresentam procedimentos de calibração complexos e uma faixa de intervalo operacional que pode ser insuficiente, conforme as características do indivíduo avaliado. Dessa forma, surge a necessidade de utilizar equipamentos digitais. Os manovacúmetros digitais possibilitam a visualização da curva pressão versus tempo durante a execução do teste, conferindo maior facilidade na aquisição dos dados avaliados. Também podem apresentar um intervalo operacional consideravelmente maior e comportar a comunicação com softwares, permitindo que os resultados das mensurações sejam calculados, armazenados, tratados e exibidos conforme a necessidade do avaliador (MONTEMEZZO, 2010).

A potencialização dos recursos obtidos ao utilizar equipamentos digitais pode ser observada quando associados a chamada Internet das Coisas (do inglês Internet of Things - IoT), que surge como tendência na tecnologia da informação e se aprimora com o desenvolvimento de áreas como sensoriamento remoto, sistemas embarcados, comunicação e microeletrônica. Com isso, existe um crescimento na quantidade de dispositivos inteligentes capazes de se conectar e trocar informações em uma rede de comunicação.

A comunicação entre dispositivos *IoT* e armazenamento em nuvem melhora o atendimento médico, o diagnóstico preventivo de doenças e auxilia na tomada de decisão utilizando o prontuário eletrônico, que é alimentado com dados obtidos através das medições de diferentes dispositivos. Há grande expectativa em relação às soluções de *IoT* para o setor de serviços de saúde, seja para incrementar a eficiência operacional das unidades, com melhor controle de recursos, seja para monitorar pacientes, ou para apoio a diagnóstico e referência a distância (BNDES; MCTIC, 2017).

Diante das questões abordadas anteriormente o objetivo do presente trabalho é o de desenvolver um manovacuômetro digital que permita a medição local da pressão nas vias aéreas de pacientes em tempo real com utilização da comunicação do tipo sem fio e interface com dispositivos móveis, possibilitando assim o armazenamento das medidas em nuvens. Dessa forma, quando permitido, os dados ficam disponíveis para análise de profissionais especializados remotamente. A interface é desenvolvida em um software de código aberto para realizar o intercâmbio entre a coleta de dados e o armazenamento em nuvem, aproveitando, dessa forma, os dispositivos móveis de uso comum que são hoje parte fundamental da sociedade e estão presentes no dia a dia da população.

INTERNET DAS COISAS NA SAÚDE

A internet das coisas é um conceito com o objetivo de interligar objetos cotidianos à internet. Basicamente, é composto de qualquer objeto (coisa) que possa ser incorporado a qualquer ambiente com o objetivo de medir variáveis (físicas, elétricas, etc.) e enviar estas informações pela internet para outro local com o objetivo de armazená-las e/ou analisá-las.

Algumas tecnologias *IoT* estão sendo desenvolvidas, no entanto, muitas se encontram em fases iniciais e seu desenvolvimento completo apresenta grande potencial. Soluções de *IoT* aplicadas ao setor de saúde, ou mais comumente conhecido como *eHealth*, é um dos tópicos que possuem maior potencial de envolvimento da Internet das Coisas, sendo um dos principais setores em que a Internet das Coisas pode ter o impacto econômico e social mais relevante (CASTRO et al., 2017).

Existem diversas experiências de *IoT* em saúde no Brasil, principalmente na forma de projetos pilotos: desde o combate a infecções em ambiente hospitalar até a redução de desperdícios de insumos. Algumas empresas também têm desenvolvido soluções para realizar diagnósticos de forma descentralizada, evitando os custos relacionados ao transporte de materiais biológicos para realização de exames (BNDES; MCTIC, 2017).

Por outro lado, existem diversas barreiras para o desenvolvimento e adoção de *IoT* em saúde no Brasil: questões regulatórias, o desafio da privacidade dos dados clínicos das pessoas, conectividade em áreas remotas, disponibilidade de recursos para avaliação de custo-efetividade das tecnologias, entre outros.

A saúde no Brasil possui uma série de desafios que passam desde enfermidades até a gestão dos centros de saúde. Os quatro desafios em que a tecnologia *IoT* pode mais impactar são: tratamento de doenças crônicas; tratamento de doenças infectocontagiosas; promoção e prevenção da saúde; e melhoria na eficiência de gestão.

Os principais agravantes da qualidade de vida dos pacientes e dos altos custos das instituições de saúde são doenças crônicas e infecções hospitalares. As doenças crônicas são de progressão lenta e longa duração, podendo ser silenciosas ou sintomáticas (MANSO, MARESTI e OLIVEIRA, 2019). Senso assim, as soluções *IoT* de monitoramento remoto permitem observar pequenas alterações ao longo do tempo ajudando a prevenir doenças cardiovasculares, respiratórias, diabetes e doenças metabólicas.

As doenças crônicas também podem surgir através de traumas, como o trauma raquimedular, que afeta múltiplos sistemas, inclusive, reduzindo a capacidade cardíaca e respiratória (SODRÉ, 2017). Para avaliar a capacidade respiratória é realizada a manovacuometria com o auxílio de um manovacuômetro.

Esses instrumentos são, em geral, analógicos e possuem princípios mecânicos, o que dificulta o processo de calibração, limita a faixa de operação e aumenta o custo relacionado ao teste. Nesse caso, soluções *IoT* de equipamentos inteligentes e com leitura digital das medidas de pressão surgem com grande potencial de aplicação sobre a manovacuometria, pois permitem reduzir o custo do equipamento, disponibilizar os dados do paciente de forma remota, maior resolução na medição de pressão e fácil mudança da faixa operacional.

MANOVACUOMETRIA

A manovacuometria, também conhecida como pressões respiratórias máximas, consiste na mensuração das pressões respiratórias estáticas máximas por meio de um equipamento, denominado manovacuômetro como mostrado na Fig. 1. Trata-se de um teste simples, rápido, não invasivo, voluntário e esforço-dependente, por meio do qual a pressão inspiratória máxima e a pressão expiratória máxima são obtidas. Estes são índices de força dos músculos inspiratórios e expiratórios, respectivamente, cujos valores representam a força gerada pelo conjunto dos músculos inspiratórios e expiratórios, obtidos ao nível da boca (SANTOS, 2017).

Figura 1 – Manovacuômetro analógico utilizado no teste de manovacuometria

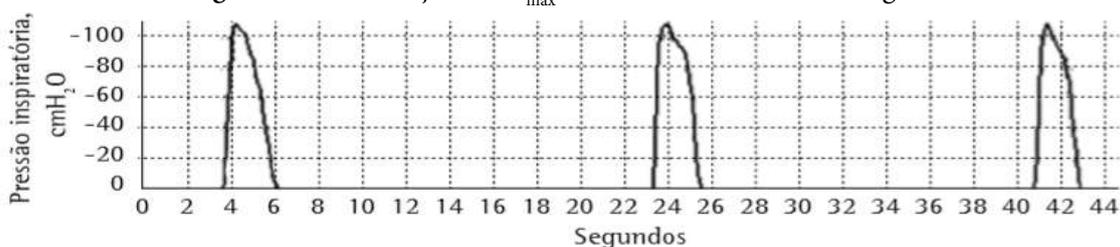


Fonte: DORMED (2019).

O manovacuômetro viabiliza que profissionais especializados possam avaliar alterações musculares respiratórias, pois quantifica a pressão inspiratória máxima que representa a força muscular inspiratória máxima (FMI) e a pressão expiratória máxima que representa a força muscular expiratória máxima (FME).

A medida pode ser feita com manovacuômetro analógico ou digital. A preferência é por aparelhos digitais, porque o maior valor de $PI_{máx}$ acontece brevemente (aproximadamente 2 segundos) e pode ser perdido num mostrador analógico (Fig. 2).

Figura 2 – Mensuração da $PI_{máx}$ de um manovacuômetro digital.



Fonte: CARUSO (2015).

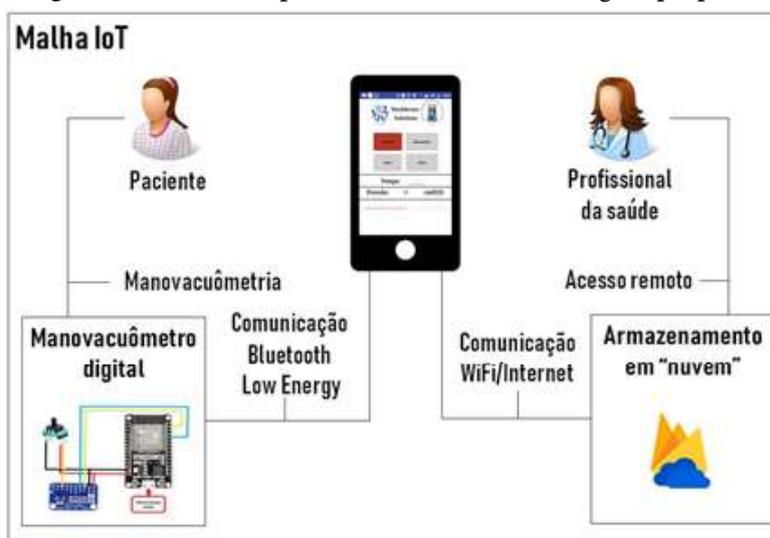
As medidas de $PI_{m\acute{a}x}$ e de $PE_{m\acute{a}x}$ podem ser utilizadas para quantificar a força dos músculos respiratórios em indivíduos saudáveis de diferentes idades, em pacientes com distúrbios de diferentes origens, assim como para avaliar a resposta ao treinamento muscular respiratório e auxiliar no desmame da ventilação mecânica (PARREIRA, 2007).

SISTEMA DE MEDIÇÃO

O sistema de medição proposto altera a forma com a qual as informações do paciente transitam até o profissional da saúde. O conjunto realiza a mensuração da curva de pressão inspiratória e expiratória do paciente, transmite os dados via conexão *Bluetooth* e permite a visualização e análise das medidas, bem como o seu armazenamento em nuvem. O sistema é composto por três partes: aquisição e processamento de dados, transmissão e o aplicativo para dispositivo móveis.

Na Fig. 3 é mostrado a malha de comunicação e o caminho dos dados coletados pelo manovacuômetro digital proposto.

Figura 3 – Malha IoT para o manovacuômetro digital proposto



Fonte: autores (2020).

Aquisição e processamento de dados

Para a aquisição dos dados do paciente é necessário um sensor que responda as variações de pressão exercida. Cada vez mais são utilizados medidores de pressão digitais que possuem diferentes princípios de funcionamento. Dentre esses, destacam-se os tradutores de pressão piezoelétricos que convertem a força exercida pelo fluido sobre um diafragma em um sinal elétrico diretamente proporcional à sua intensidade. Para a confecção do sistema de medição foi selecionado um sensor de pressão piezoresistivo XGZP6847005KPGPN, da fabricante CFSensor, que possui um circuito integrado de aplicação específica (ASIC) responsável por transformar o sinal de pressão exercida sobre o sensor em um sinal analógico de tensão elétrica (CFSensor, 2019). Na Tab. 1 é indicado as características do sensor utilizado.

Tabela 1 – Dados fornecidos pelo fabricante.

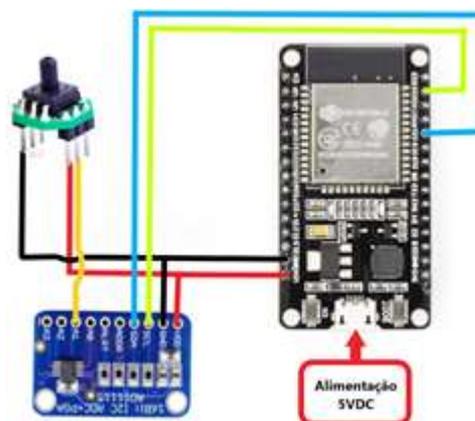
Especificação	Valor	Unidade
Temperatura	-30 a 100	°C
Faixa de operação	-5 a 5	kPa
Incerteza	±1	%V _{fs}
Sensibilidade	0,4	V/kPa
Tempo de resposta	2	ms

Fonte: CFSensor (2019).

Um conversor A/D de 16 bits é utilizado para aumentar a resolução de medição do manovacuômetro. Este dispositivo também realiza a transformação do sinal analógico em digital para que o microprocessador possa aplicar a função transferência fornecida pelo fabricante e, assim, relacionar a tensão de saída do sensor e a pressão exercida pelo paciente.

Para o pleno funcionamento do sistema de medição proposto é necessário a programação do microcontrolador e do aplicativo. No primeiro caso, o microcontrolador é instruído para reconhecer a tensão de saída do sensor, enviada pelo conversor analógico/digital, e convertê-la em valores de pressão. Após a conversão, ao se comunicar com o dispositivo móvel são enviados os dados de pressão ao aplicativo. Na Fig. 4 pode ser observado as ligações elétricas entre os dispositivos citados.

Figura 4 – Esquema de ligação do manovacuômetro digital



Fonte: autores (2020)

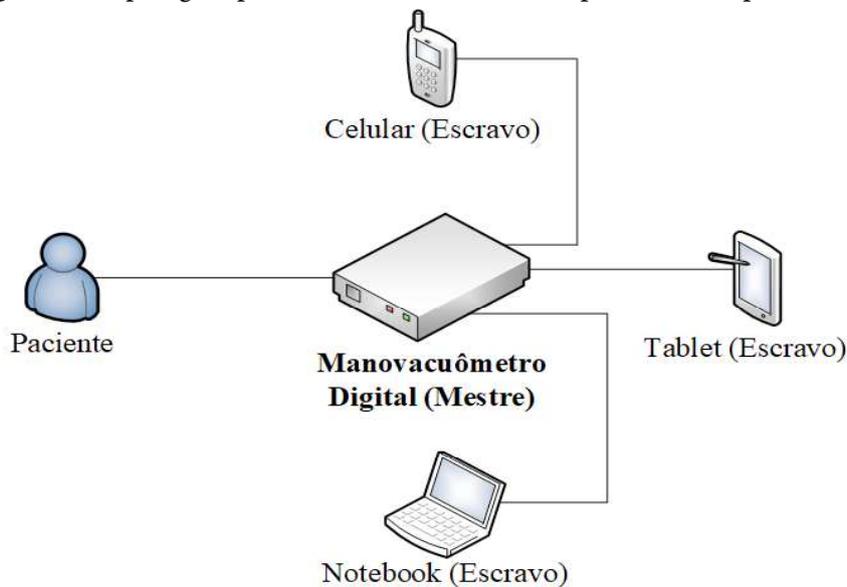
Transmissão de dados

A principal funcionalidade do ESP32 para o presente trabalho é a sua comunicação Bluetooth. O sistema BLE (Bluetooth Low Energy) foi criado com o objetivo de transmitir pacotes de dados muito pequenos por vez, enquanto consome significativamente menos energia que os dispositivos tradicionais. Ao introduzir tecnologia de baixa energia permite novos dispositivos Bluetooth inteligentes que podem operar por meses ou até anos com pequenas baterias de célula tipo moeda. Dispositivos BLE podem ser centrais ou periféricos. De modo geral, dispositivos centrais são telefones celulares, computadores e outros. Os periféricos são sensores e dispositivos low power.

O BLE define duas funções de dispositivo na camada de *link* para uma conexão criada: o mestre e o escravo. Esses são os dispositivos que atuam como iniciador e anunciante durante a criação da conexão,

respectivamente. Um mestre pode gerenciar múltiplas conexões simultâneas com escravos diferentes, enquanto cada escravo pode somente ser conectado a um mestre. Assim, a rede composta por um mestre e seus escravos é chamada *piconet*, e segue uma topologia em estrela. Atualmente, um dispositivo BLE pode pertencer apenas a uma *piconet* (Gomez, 2012). Neste projeto o manovacuômetro funciona como mestre e os dispositivos conectados a ele através da interface para dispositivos móveis como escravos, como na Fig. 5.

Figura 5 – Topologia tipo estrela do *Bluetooth* BLE aplicado ao dispositivo *IoT*



Fonte: autores (2020)

Verifica-se que os dispositivos escravos solicitam serviços ao mestre. Dessa forma, ao utilizar o aplicativo em dispositivos móveis, através da comunicação BLE, são requisitados dados de medição pulmonar ao manovacuômetro. Quando obedecidas as condições de programação, enviados a uma taxa igual a 100 Hz, suficiente para reconhecer os picos de pressão máxima pulmonar.

Aplicativo para dispositivos móveis

O desenvolvimento do aplicativo foi realizado em um *software web* de código aberto, chamado *Thunkable*. A programação é baseada no *drag-and-drop* (clique e soltar) e possui recursos interativos que possibilitam diferentes aplicações. A programação funciona através da ligação de blocos. Cada bloco possui uma função e podem ser conectados arrastando e soltando objetos. Além das funcionalidades disponíveis de forma nativa, é possível adicionar bibliotecas externas com diversas funcionalidades. Para o projeto é utilizada a biblioteca externa referente ao *Bluetooth* BLE, e, com isso, adicionando blocos de programação que permitem criar uma interface de comunicação entre o manovacuômetro e o dispositivo móvel, mais ainda, armazenar os valores obtidos em nuvens.

A programação do aplicativo é dividida em quatro partes: programação da conexão BLE, comunicação, apresentação dos dados e salvamento das medidas. Inicialmente o dispositivo móvel é conectado ao manovacuômetro digital via *bluetooth*. Após a conexão o aplicativo solicita o tempo de medição, prescrita pelo usuário, e habilita o botão iniciar para visualizar as medições em tempo real. Os dados medidos

no manovacômetro digital são enviados para o dispositivo móvel numa frequência de 100 Hz, sendo armazenados no dispositivo e nas nuvens.

A Fig. 6 traz a interface do aplicativo e suas funcionalidades: “conectar”, “desconectar”, “iniciar” e “salvar”:

Figura 6 – Captura de tela da interface do aplicativo proposto



Fonte: autores (2020)

AFERIÇÃO

A aferição do sensor é necessária por se tratar de equipamentos médicos. Com isso, as medidas devem ser de alta confiabilidade para evitar que ocorra diagnósticos errados e tratamentos equivocados.

Um medidor por coluna líquida é utilizado na aferição do dispositivo, que é um instrumento de medição de indicação local de pressão baseado na equação manométrica (Eq. 1). Sua construção é simples e de baixo custo. Basicamente é constituído por tubo de vidro com área seccional uniforme, uma escala graduada, um líquido de enchimento e suportados por uma estrutura.

O valor de pressão medido é obtido pela leitura da altura de coluna do líquido deslocado em função da intensidade da pressão aplicada. Os líquidos mais utilizados nas colunas são: água (normalmente com um corante) e mercúrio. Neste caso é utilizado água e a curva de aferição é obtida através de um manômetro de coluna de resolução de 1 mm de coluna de água e pressão máxima de 25 cmH₂O.

É utilizada uma seringa genérica com seu embolo na região central do tubo possibilitando a aplicação de pressão positiva e negativa, simulando a aspiração e expiração do aparelho respiratório. O sistema de medição proposto é ligado em paralelo com um manovacômetro analógico, utilizado para medições em ambiente hospitalar, para referenciar as medidas de pressão aplicadas pela coluna líquida.

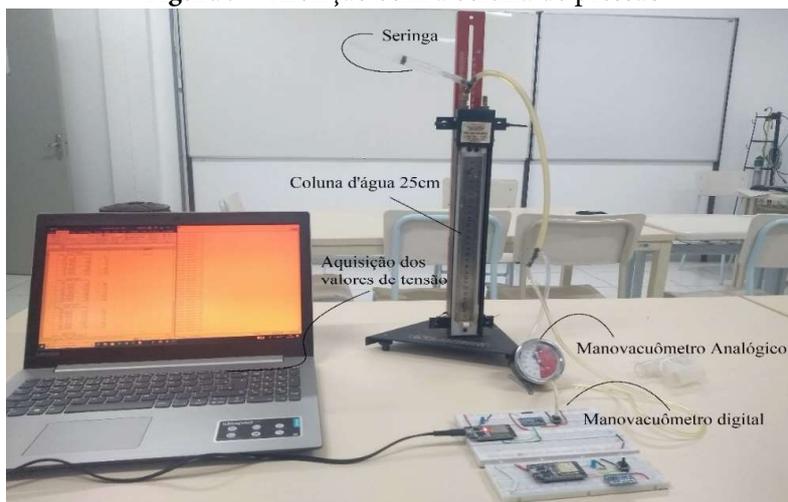
A Fig. 7 traz a descrição dos instrumentos e componentes utilizados para a aferição do manovacômetro digital.

A equação manométrica que relaciona as pressões diferenciais aplicadas ($p_2 - p_1$) nos ramos de uma coluna, de acordo com a Lei Hidrostática (Çengel and Cimbala, 2015), é dado por (1).

$$p_2 - p_1 = \rho gh \quad (1)$$

em que h representa a altura de líquido deslocado, g a aceleração gravitacional e ρ a massa específica do fluido. Conhecendo a pressão exercida pela coluna d'água é possível relacionar com a tensão de saída do sensor. São realizados 5 conjuntos de medições com 8 pontos que possuem diferentes pressões. Para cada conjunto são obtidas equações que relacionam a tensão de saída do sensor e a pressão exercida pela coluna líquida. Utilizando dessas equações são obtidas as pressões correspondentes para valores de 0 a 5 V com intervalo de 0,5 V. Posteriormente, é realizado a média aritmética das pressões para cada intervalo, e com isso confeccionada a curva calibrada do sensor.

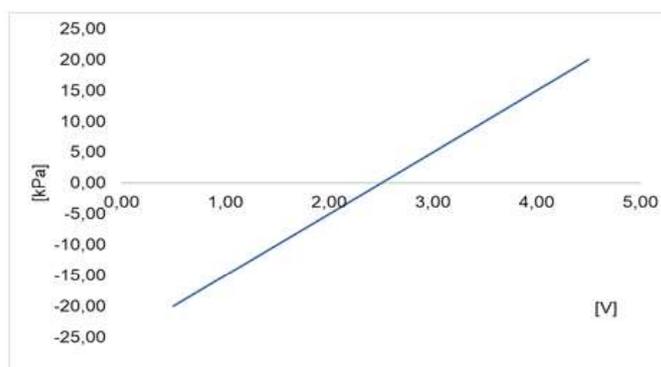
Figura 7 – Aferição com a coluna de pressão



Fonte: autores (2020)

A Fig. 8 traz a curva de aferição do sensor, com a respectiva equação linear e o coeficiente de correlação (R^2) cujo valor é 1 intrínscio dos medidores piezelétricos de pressão.

Figura 8 – Curva de aferição do sensor de pressão piezelétrico com coluna d'água



Fonte: autores (2020)

RESULTADOS OBTIDOS

O principal resultado foi o desenvolvimento de um dispositivo de medição de pressão pulmonar de baixo custo que utiliza dispositivos móveis, com interface amigável, alta confiabilidade de aquisição e armazenamento dos dados.

Além disso, obteve-se um equipamento com dimensões reduzidas de tamanho quando comparado aos modelos usuais. Oferece ainda a possibilidade de armazenamento do histórico de medições dos pacientes.

O conceito do dispositivo de medição de pressão pulmonar, foi criado com tecnologia nacional, contribuindo para o desenvolvimento da área da saúde.

CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvido um manovacuômetro digital que permite a medição local da pressão nas vias aéreas de pacientes em tempo real, que utiliza a comunicação do tipo sem fio e interface com dispositivos móveis. O dispositivo possibilita o armazenamento em nuvens das medidas e permite o acesso remoto por especialistas para a análise dos resultados.

A interface foi desenvolvida em software de código aberto para realizar a coleta de dados e armazenamento em nuvem, aproveitando, dessa forma, os dispositivos móveis que são hoje parte fundamental da sociedade.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao *IoT- Health Care Solutions Group* - UFSM.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BNDES; MCTIC. (2017). **Aprofundamento de verticais** - Saúde. Disponível em <<https://www.bndes.gov.br/wps/wcm/connect/site/9e481a5b-a851-4895-ba7f-aa960f0b69a6/relatorio-aprofundamento-das-verticais-saude-produto7B.pdf?MOD=AJPERES&CVID=m3mTltg>>. Acesso em setembro 2019.

CARUSO, P. et al. Diagnostic methods to assess inspiratory and expiratory muscle strength. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, São Paulo, v. 41, n. 2, p. 110-123, 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-37132015000200110&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 10 maio 2020.

CASTRO, D., Coral, W., Cabra, J., Colorado, J., MÉNDEZ, D., & TRUJILLO, L. Survey on IoT solutions applied to Healthcare. **DYNA**, Medellín, v. 84, n. 203), p. 192-200, 2017. doi:10.15446/dyna.v84n203.64558.

ÇENGEL, Y. A. and Cimbala, J. M., 2015. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações**. AMGH, Porto Alegre, 3rd edição.

CFSSENSOR. **XGZP6847 Pressure Sensor Module**. Disponível em: <www.cfsensor.com: http://www.cfsensor.com/editor/attached/file/20170511/20170511101000_9218.pdf>. Acesso em setembro 2019.

GOMEZ, C. (2012). **Overview and Evaluation of Bluetooth Low Energy: An Emerging Low-Power Wireless Technology**. *Sensors*, 11734-11753.

MANSO, M. E., Maresti, L. T., & Oliveira, H. S. (2019). Analysis of quality of life and associated factors in a group of elderly persons with supplemental health plans in the city of São Paulo, Brazil. **Revista Brasileira de Geriatria e Gerontologia**, São Paulo, v. 22, n. 4, p. 1-10, 2019. Disponível em: doi: 10.1590/1981-22562019022.190013.

MONTEMEZZO, D. Pressões respiratórias máximas: equipamentos e procedimentos usados fisioterapeutas brasileiros. **Revista Fisioterapia e Pesquisa**, v. 17, n. 2, p. 147-52, 2010.

PARREIRA, V. F. Pressões respiratórias máximas: Valores encontrados e preditos em indivíduos saudáveis. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, v. 11, n. 5, p. 361-368, 2007.

SANTOS, R. M. (2017). Manovacuometria realizada por meio de traqueias de diferentes comprimentos. **Revista Fisioterapia e Pesquisa**, v. 24, n. 1, p. 9-14. doi:10.1590/1809-2950/15614124012017.

SODRÉ, I. **Efeito do treinamento muscular inspiratório sobre a força muscular inspiratória de pacientes com traumatismo raquimedular agudo na unidade de tratamento intensivo - estudos de casos**. 2017. Tese (Trabalho de conclusão de curso em Fisioterapia) - Universidade La Salle, Canoas, 2017.