

Revisão Sistemática sobre o Uso de Radares FMCW para Monitoramento Sem Fio de Sinais Vitais para Aplicações em Internet das Coisas Médicas

Ricardo de Campos Pelliciari de Lima
ricardocamposlima@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Curitiba, PR, BRA

Renata Coelho Borges
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biomédica
(PPGEB), Curitiba, Paraná, BRA

Wemerson Delcio Parreira
Pontifícia Universidade Católica de Campinas
(PUC-Campinas), Escola Politécnica
Campinas, SP, BRA

Fábio Pires Iturriet
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biomédica
(PPGEB), Curitiba, Paraná, BRA

ABSTRACT

This work presents a Systematic Literature Review (SLR) for contactless vital signs monitoring based on the Internet of Medical Things (IoMT). This SLR aims to search for relevant studies that use Frequency-Modulated Continuous Wave (FMCW) radars to estimate the breath and heart rate of a target while having Internet of Things (IoT) connectability. We utilized the PICO methodology to retrieve 34 articles, and through inclusion and exclusion criterias, we filtered this result to 5 articles. From these articles, the two main points observed are the continuous growth of studies that use contactless methods for vital signs monitoring in recent years and the surprising lack of devices with IoT or IoMT compatibility, in which several articles only cite the technology but don't elaborate concrete steps for its implementation. This made us realize the opportunity for future works and research to create and implement IoMT technologies with contactless vital signs monitoring.

KEYWORDS

FMCW radar, contactless monitoring, respiration rate, heart rate, IoMT

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), 32% das mortes no mundo são causadas por doenças cardiovasculares (DCVs), sendo assim a maior causa de mortes no mundo [1]. Estima-se que cerca de meio bilhão de pessoas no mundo são acometidas por DCVs, número que tende a aumentar consideravelmente nas próximas décadas [2]. Além disso, aproximadamente 545 milhões de pessoas sofrem de doenças respiratórias crônicas, totalizando 7,4% da população global [3], tornando-se a quarta maior causa de morte nos últimos anos [4].

Esses indicadores evidenciam a necessidade do monitoramento contínuo de sinais vitais como a frequência cardíaca (FC) e frequência respiratória (FR), permitindo diagnósticos precoces e maximizando o sucesso nos tratamentos. Os oxímetros são exemplos de dispositivos ópticos portáteis, de simples utilização (podem ser usados em casa), baixo custo e que aferem FC e FR simultaneamente. Porém, apresentam como principais limitações a susceptibilidade a luminosidade externa e a pigmentação da pele do paciente. Outra

desvantagem desse dispositivo é o contato direto com a pele, trazendo desconforto, inconveniência e preocupações ao paciente [5]. Em casos extremos, podem causar queimaduras e até mesmo contaminação por doenças infecciosas [6].

Diferentes métodos de monitorização sem fio de FC e FR têm sido propostos nos últimos anos. Técnicas baseadas em imagem utilizando câmeras RGB (*Red, Green and Blue*) [7], *Near Infrared* (NIR) [8, 9], *Far Infrared* (FIR) [10] e Fotopletismografia remota (rPPG) [11] são viáveis, porém apresentam limitações como sensibilidade a iluminação, aspectos fisiológicos e questões de privacidade dos monitorados.

Métodos baseados em radio frequência (RF) são mais robustos pois são imunes às condições ambientais como luz, temperatura e umidade, e atributos fisiológicos, como a cor da pele e pelos no corpo [12]. Um exemplo são os sistemas baseados em radar, que transmitem um sinal eletromagnético através de uma ou mais antenas posicionadas em direção ao indivíduo, e recebem um sinal refletido também através de uma ou mais antenas. A FC e FR é estimada baseada no sinal recebido com técnicas de processamento digital de sinais. Existem basicamente duas classes de radares usados para estimar FC e FR, os de efeito doppler [13, 14] e de onda contínua modulada em frequência (FMCW - *Frequency Modulated Continuous Wave Radar*) [15-17]. A principal vantagem de radares FMCW está em sua capacidade de monitorizar múltiplos indivíduos simultaneamente. Pelo fato de atuarem em frequências na ordem de Giga Hertz, permitem medir micro deslocamentos (menores que 1mm [18]), como os realizados organicamente pela caixa torácica durante a respiração e atividade cardíaca dos seres humanos.

A aquisição de FC e FR com radares FMCW pode ser potencializada caso essas informações sejam registradas e acessadas remotamente pelo médico, permitindo rastreabilidade e acompanhamento individualizado dos pacientes. Nesse contexto surge a internet das coisas médicas (IoMT – *Internet of Medical Things*), um subconjunto de Internet das coisas (IoT), que visa integrar múltiplos dispositivos médicos para coletar, transmitir e processar dados médicos em tempo real [19]. A adoção da IoMT integra médicos e pacientes e promove o cuidado centrado no paciente. Implementações *low-power* de sistemas de radar FMCW permitem sua aplicação em dispositivos portáteis (alimentados por bateria) onde apenas a estimativa dos valores de FC e FR é realizada localmente, para então

serem transmitidos para um servidor localizado na nuvem ou na borda. É um mercado com faturamento esperado de aproximadamente U\$159,51 em 2025, podendo chegar a U\$802,18 bilhões em 2030 [20].

O presente trabalho apresenta uma revisão sistemática da literatura (RSL) visando identificar os principais trabalhos que propõem dispositivos portáteis para monitorização contínua de frequência cardíaca e frequência respiratória, sem contato direto com os pacientes, utilizando radares FMCW e Internet das coisas Médicas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A plataforma Parsifal [21] foi utilizada para o planejamento, condução e relatório gerado na RSL. O escopo foi definido através da metodologia PICO [22], cuja sigla corresponde a (P) população/problema/processo, definido no trabalho como a aferição de FR e FC, (I) intervenção/investigação/melhoria, tratando sobre o método de aferição sem fios, (C) Comparação com outros dispositivos comerciais e (O) Resultados esperados, voltado para dispositivos portáteis comerciais que aferem FC e FR sem fios e com conexão à Internet.

Com esses parâmetros definidos, após diversas iterações a seguinte *string* de busca foi gerada: (“FMCW Rada” OR “Frequency Modulated Continuous Wave Radar”) AND (“cardiac frequency” OR “HR” OR “heart rate” OR “respiratory frequency” OR “respiration rate”) AND (“health” OR “healthcare”) AND (“device” OR “prototype”) AND (“iot” OR “internet of things” OR “iomt” OR “internet of medical things”). Essa *string* foi utilizada nas bases de busca apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Bases de busca que retornaram artigos.

Bases	Link
ACM Digital (ACM)	http://dl.acm.org/
Engineering Village (Elsevier)	https://engineeringvillage.com/
IEEE Xplore (IEEE)	http://ieeexplore.ieee.org/
ScienceDirect (SDirect)	http://sciencedirect.com/
Scopus (Scopus)	http://scopus.com
Springer	http://springer.com/
Web of Science (WoS)	https://webofknowledge.com/

A partir da aplicação da *string* de busca nas bases apresentadas na Tabela 1, os artigos retornados são filtrados considerando os critérios de inclusão e exclusão. Para essa RSL, os critérios utilizados foram: (i) inclusão: dispositivos portáteis de aferição sem fios de FC e FR baseado em Internet das Coisas Médicas e (ii) exclusão: estudos fora de escopo; artigos publicados há mais de 5 anos; estudos que não medem frequência cardíaca nem taxa respiratória (ou sinais semelhantes); estudos que não utilizam radares e estudos secundários.

Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão foi realizada mais uma etapa de avaliação dos artigos para verificar se os mesmos respondem as perguntas de pesquisa:

- (1) O estudo desenvolveu um equipamento ou protótipo?
- (2) O equipamento ou protótipo usado no estudo é portátil?
- (3) O estudo desenvolveu uma placa eletrônica própria?
- (4) Foram utilizados radares FMCW?

- (5) O artigo realiza experimentos em situações reais?
- (6) O estudo mede frequência respiratória e cardíaca?
- (7) A técnica requer dispositivos adicionais?
- (8) Os resultados são comparados com outros biopotenciais?
- (9) O estudo visa integração IoT ou IoMT?

Para responder estas perguntas, as respostas selecionadas foram: “Sim”, “Parcial” e “Não”, cujos pesos de cada resposta são “1”, “0,5” e “0”, respectivamente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A busca realizada com a *string* nas bases apresentadas na Tabela 1 retornou um total de 34 artigos. A distribuição do número de artigos encontrados em suas respectivas bases é apresentada na Figura 1. Foi observado que as bases “ACM Digital” e “Springer” foram as que retornaram o maior número de artigos, 14 e 8 respectivamente, enquanto “Scopus” e “Web of Science” retornaram apenas 1 artigo em cada. Ademais, uma análise referente ao ano de publicação dos trabalhos é mostrada na Figura 2. Nota-se um visível aumento no número de publicações ao longo dos últimos cinco anos, indicando um crescente interesse acadêmico pela temática proposta no trabalho.

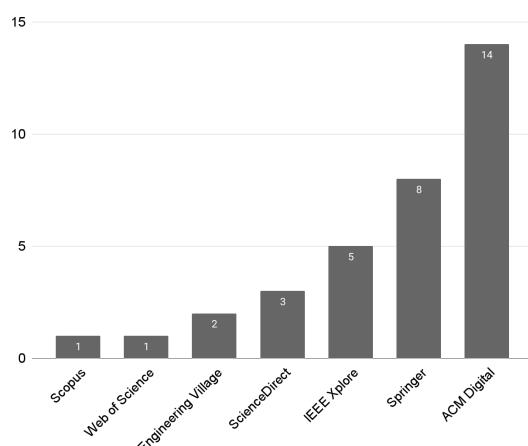


Figura 1: Número de artigos em cada Base

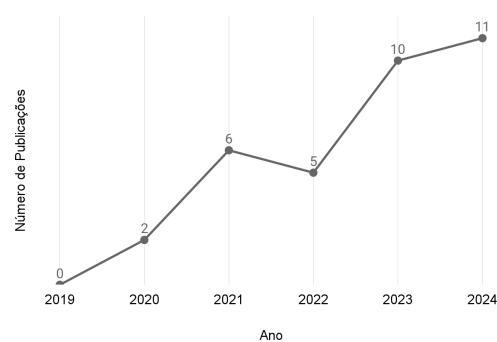


Figura 2: Número de publicações nos últimos anos.

Na etapa de seleção de estudos foram aplicados os critérios de inclusão e exclusão supracitados, restando seis artigos. Na fase de avaliação de qualidade, foram respondidas as nove perguntas propostas para cada artigo. Somente os artigos que obtiveram notas superiores a seis foram mantidos, totalizando cinco artigos.

O estudo apresentado em [23] avaliou a influência da frequência portadora de radares FMCW *low power*. Foram realizados experimentos com radares de 24, 60 e 120 GHz para estimação de FC e FR em 24 voluntários, avaliados individualmente, sentados dentro de um escritório. O estudo concluiu que os radares FMCW das três frequências foram capazes de estimar a FR com erro médio absoluto (MAE - *Mean Absolute Error*) menor do que 2 Respirações por Minuto (RPM) ($\pm 3,05$). A estimativa de FC de mostrou mais precisa nos radares com frequência de 60 e 120 GHz, com MAEs de $1,8 \pm 3,1$ BPM e $3,2 \pm 5,3$ BPM respectivamente.

Em [24] um radar FMCW de 60 GHz foi utilizado para monitorização simultânea apenas da FR em até 3 indivíduos, nas posições sentado e deitado. Os resultados obtidos foram validados a partir da comparação com um oxímetro comercial e o erro medido foi de 3 RPM. Com a mesma capacidade de aferição de até 3 indivíduos simultaneamente, o estudo apresentado por [25] apresentou os resultados de variabilidade cardíaca (HRV – *Heart Rate Variability*) com um sistema de radar FMCW comercial de 76 GHz. Um sistema de ECG com 3 eletrodos (1 derivação) foi usado como *ground truth* e o erro medido foi de 28 milissegundos (3,4%).

A monitorização de FR e FC em motoristas dentro de veículos em movimento com radar de 77 GHz foi proposto em [26]. Neste estudo, os resultados de FC e FR são comparados com um sensor de ECG comercial e com uma cinta peitoral, respectivamente. Também focado em monitorização dentro de veículos em movimento, o artigo [27] propôs o uso de um sistema de radar FMCW de 24 GHz para aferição de FR, com foco em passageiros localizados nos bancos traseiros. O sistema de radar apresentado utiliza *tags* colocadas nos cintos de segurança associado com a inovadora técnica chamada *time-division multiple tags* (TDMT), usando a multiplexação no tempo para a monitorização de múltiplos usuários.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nenhum dos cinco trabalhos revisados respondeu às nove perguntas propostas, indicando eventuais lacunas disponíveis para novas pesquisas. Dentre elas, o uso de IoT ou IoMT aliado com as técnicas de monitorização de sinais vitais com radares FMCW, que foi abordado apenas superficialmente nos artigos como uma promissora tecnologia futura. Nenhum trabalho demonstrou a preocupação com a usabilidade prática dos sinais vitais estimados por parte dos profissionais de saúde para análise, diagnóstico e acompanhamento médico. Esse é um importante indicador de que a temática proposta na RSL apresenta potencial de exploração, qualificando a relação entre médicos e pacientes.

REFERÊNCIAS

- [1] World Health Organization. Cardiovascular diseases (cvds), 2021.
- [2] World Heart Federation. World heart report 2023 confronting the world's number one killer, 2023.
- [3] GBD Chronic Respiratory Disease Collaborators. Prevalence and attributable health burden of chronic respiratory diseases, 1990-2017: a systematic analysis for the global burden of disease study 2017. *Lancet Respir. Med.*, 8(6):585–596, June 2020.
- [4] Melonie Heron. Deaths: Leading causes for 2017. *Natl. Vital Stat. Rep.*, 68(6):1–77, June 2019.
- [5] Mohamed Ali, Ali Elsayed, Arnaldo Mendez, Yvon Savaria, and Mohamad Sawan. Contact and remote breathing rate monitoring techniques: A review. *IEEE Sens. J.*, 21(13):14569–14586, July 2021.
- [6] Julie D Lankiewicz, Tess Wong, and Marilyn Moucharite. The relationship between a single-patient-use electrocardiograph cable and lead system and coronary artery bypass graft surgical site infection within a medicare population. *Am. J. Infect. Control.*, 46(8):949–951, August 2018.
- [7] M.A. Hassan, A.S. Malik, D. Fofi, N. Saad, B. Karasfi, Y.S. Ali, and F. Meriaudeau. Heart rate estimation using facial video: A review. *Biomedical Signal Processing and Control*, 38:346–360, 2017.
- [8] Muhammed Raheel, Faisal Tubbal, Raad Raad, Philip Ogunbona, James Coyte, Christopher Patterson, Dana Perlman, Saeid Iranmanesh, Nidhal Odeh, and Javad Foroughi. Contactless vital sign monitoring systems: a comprehensive survey of remote health sensing for heart rate and respiration in internet of things and sleep applications. *Sensors & Diagnostics*, 3, 05 2024.
- [9] Weixuan Chen, Javier Hernandez, and Rosalind Picard. Estimating carotid pulse and breathing rate from near-infrared video of the neck. *Physiological Measurement*, 39, 10 2018.
- [10] Menghan Hu, Guangtao Zhai, Duo Li, Yezhao Fan, Huiyu Duan, Wenhan Zhu, and Xiaokang Yang. Combination of near-infrared and thermal imaging techniques for the remote and simultaneous measurements of breathing and heart rates under sleep situation. *PLOS ONE*, 13(1):1–14, 01 2018.
- [11] Mona Alnaggar, Ali I. Siam, Mohamed Handosa, T. Medhat, and M.Z. Rashad. Video-based real-time monitoring for heart rate and respiration rate. *Expert Systems with Applications*, 225:120135, 2023.
- [12] Mamady Kebe, Rida Gadhafi, Baker Mohammad, Mihai Sanduleanu, Hani Saleh, and Mahmoud Al-Qutayri. Human vital signs detection methods and potential using radars: A review. *Sensors*, 20(5), 2020.
- [13] Jianxuan Tu and Jenshan Lin. Fast acquisition of heart rate in noncontact vital sign radar measurement using time-window-variation technique. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 65(1):112–122, 2016.
- [14] Fang Zhu, Kuangda Wang, and Ke Wu. Doppler radar techniques for vital signs detection featuring noise cancellation. In *2019 IEEE MTT-S International Microwave Biomedical Conference (IMBioC)*, volume 1, pages 1–4, 2019.
- [15] Zhaoxi Yu, Cong Shi, Tianfang Zhang, Shuping Li, Yichao Yuan, Chung-Tse Michael Wu, Yingying Chen, and Athina Petropulu. Simultaneous monitoring of multiple people's vital sign leveraging a single phased-mimo radar. *IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology*, 6(3):311–320, 2022.
- [16] Junjun Xiong, Hong Hong, Lei Xiao, E. Wang, and Xiaohua Zhu. Vital signs detection with difference beamforming and orthogonal projection filter based on simo-fmcw radar. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 71(1):83–92, 2023.
- [17] María-José López, César Palacios Arias, Jordi Romeu, and Luis Jofre-Roca. In-cabin mimo radar system for human dysfunctional breathing detection. *IEEE Sensors Journal*, 22(24):23906–23914, 2022.
- [18] Ting Wu, Theodore S. Rappaport, and Christopher M. Collins. Safe for generations to come: Considerations of safety for millimeter waves in wireless communications. *IEEE Microwave Magazine*, 16(2):65–84, 2015.
- [19] GR Pradyumna, Roopa B Hegde, KB Bommegowda, Tony Jan, and Ganesh R Naik. Empowering healthcare with iomt: Evolution, machine learning integration, security, and interoperability challenges. *IEEE Access*, 2024.
- [20] Research and Markets. Internet of medical things (iomt) market: Global industry analysis, trends, market size, and forecasts up to 2030, 06 2023.
- [21] Parsifal - Perform Systematic Literature Reviews. KerkoCite.ItemAlsoKnownAs: 2405685:EPGBQNMQ 2486141:HPI6447P.
- [22] Jenny Mueller-Alexander. Libguides: Engineering (basic): Formulating questions w/pico, 01 2024.
- [23] Steven Marty, Andrea Ronco, Federico Pantanella, Kanika Dheman, and Michele Magno. Frequency matters: Comparative analysis of low-power fmcw radars for vital sign monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 73:1–10, 2024.
- [24] Aditya Riksy Ramadhan, Aloysius Adya Pramudita, and Fiky Y. Suratman. Multi-target detection method on fmcw radar for non-contact breathing measurement. In *2023 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITA)*, pages 710–715, 2023.
- [25] Fengyu Wang, Xiaolu Zeng, Chenshu Wu, Beibei Wang, and K.J. Ray Liu. mmhrv: Contactless heart rate variability monitoring using millimeter-wave radio. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(22):16623–16636, 2021.
- [26] Fengyu Wang, Xiaolu Zeng, Chenshu Wu, Beibei Wang, and K. J. Ray Liu. Driver vital signs monitoring using millimeter wave radio. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(13):11283–11298, 2022.
- [27] Wei Kang, Yinhui Li, and Wen Wu. In-vehicle multiple passengers respiration monitoring based on surface-circuit metasurface tags using time-division fmcw radar. *IEEE Internet of Things Journal*, 11(5):7756–7771, 2024.