

Revisão Sistemática em IoT: Sensores Químicos Vestíveis

Carlos E. do Egito Araújo¹, Livia F. Sgobbi², Renato Bulcão Neto¹,
Iwens G. Sene Jr¹, Sergio T. Carvalho¹

¹Instituto de Informática – Universidade Federal de Goiás (UFG)
Cep 74690-900 - Goiânia - GO - Brasil – Brazil

²Instituto de Química – Universidade Federal de Goiás (UFG)
Cep 74690-900 - Goiânia - GO - Brasil – Brazil

{cegito, rbulcao, iwens, sergio, livia.sgobbi}@ufg.br

Abstract. *Health applications have received greater attention with the use of the Internet of Things - IoT, due to the use of sensors for remote monitoring, not only in hospital environments, but also in domestic environments and in activities daily living. Wearable chemical sensors have been proposed in the health area for the continuous monitoring of the individual's well-being, however, the challenges related to the convergence of these two areas still require a lot of research for the solutions to be effectively applied. The objective of this paper is to present the results of a systematic literature review carried out with the purpose of highlighting the applications that employ the use of wearable chemical sensors in IoT contexts. The results found present several challenges and open questions of a promising research field involving IoT and wearable chemical sensors.*

Resumo. *As aplicações de saúde têm recebido maior atenção com o uso de Internet das Coisas - IoT, por conta do uso de sensores para o monitoramento remoto, não apenas em ambientes hospitalares, mas também em ambientes domésticos e nas atividades diárias e de rotina. Sensores químicos vestíveis têm sido propostos na área da saúde para o monitoramento contínuo do bem-estar do indivíduo, entretanto, os desafios relacionados à convergência dessas duas áreas ainda necessitam de muita pesquisa para que as soluções sejam efetivamente aplicadas. O objetivo deste artigo é apresentar os resultados de uma revisão sistemática da literatura realizada com o propósito de destacar as aplicações que empregam o uso de sensores químicos vestíveis em contextos de IoT. Os resultados encontrados apresentam vários desafios e questões em aberto de um campo de pesquisa promissor envolvendo IoT e sensores químicos vestíveis.*

1. Introdução

A Internet das Coisas (IoT) é a rede de objetos físicos – dispositivos, instrumentos, veículos, edifícios e outros itens embarcados com eletrônica, circuitos, software, sensores e conectividade de rede - que permite que esses objetos coletem e troquem dados. A Internet das Coisas permite que objetos sejam detectados e controlados remotamente em infraestrutura de rede, criando oportunidades para uma integração mais direta do mundo físico em sistemas baseados em computação. [Gokhale et al. 2018]

Um dos principais desafios identificados é a integração dos sensores químicos vestíveis com a computação. Para tratar as informações oriundas dos sensores químicos, a maioria dos estudos aborda o tipo de detecção e transmissão, mas não a forma como são tratados estes dados. O que se observa é que os estudos citam o uso de software proprietário, em sua maioria, e de código não aberto, que está vinculado ao equipamento que irá realizar a análise do sensor. Portanto, faz-se importante compreender como as aplicações que utilizam sensores químicos vestíveis podem receber, tratar e armazenar estes dados, por exemplo, em um ambiente em nuvem.

Neste sentido, este trabalho tem por objetivo realizar uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) para explorar e analisar o uso de sensores químicos vestíveis como solução e integração de aplicações em IoT. Um desafio do uso de sensores químicos vestíveis é tornar essa tecnologia mais acessível com a integração da área da química com a computação, com intuito de tornar as aplicações otimizadas no processo de coleta, análise e obtenção de resultados de forma automatizada.

Este artigo está assim organizado: a Seção 2 detalha os métodos adotados no planejamento e execução do protocolo do estudo sistemático da literatura; a Seção 3 reporta resultados obtidos ao longo da condução e da análise desses resultados; a Seção 4 apresenta uma síntese dos resultados; e, por fim, a Seção 5 apresenta as considerações finais e trabalhos futuros.

2. Métodos

Esta seção descreve o protocolo utilizado para realizar a RSL segundo a abordagem proposta por [Scannavino et al. 2017]. Está dividido em três etapas: (I) Definição do protocolo da revisão, constituída pelas questões de pesquisa, palavras-chave, sinônimos, estratégia de busca, e os critérios de inclusão e exclusão dos estudos; (II) Condução da revisão, composta pela realização das buscas, seleção dos trabalhos, extração e análise dos dados dos trabalhos selecionados e, por fim, (III) Resultados e Discussão, que apresenta, além dos resultados, as respostas às questões de pesquisa.

A revisão foi projetada para explorar as seguintes questões de pesquisa:

- QP1: Como integrar dispositivos do tipo sensores químicos em uma rede IoT?
Estudar os dispositivos existentes e a melhor maneira de utilizá-los na rede.
- QP2: Como interpretar os dados recebidos de sensores químicos vestíveis?
Descobrir a melhor maneira de tratar os dados para usá-los de maneira eficiente, ajudando no monitoramento de doenças e anomalias.
- QP3: Quais os tipos de sensores químicos vestíveis estão sendo usados?
Investigar quais sensores químicos existem atualmente na literatura para saber qual seria o mais adequado para a proposta de pesquisa.
- QP4: Quais são os problemas/desafios apontados no contexto de sensores químicos vestíveis no domínio das aplicações dos estudos abordados?
Analisar os problemas/desafios apontados na literatura para que estes sejam objetos de melhoramento desta pesquisa.

- QP5: Em quais os domínios de aplicações os sensores químicos vestíveis estão sendo aplicados?
Investigar quais as aplicações existentes e se elas atendem as necessidades das pessoas que desejam ou precisam monitorar doenças e/ou anomalias.

A string de busca foi gerada com base no conhecimento dos especialistas das áreas da computação e da química, autores deste artigo:
(*"chemical sensors"OR "electrochemical sensors"*) AND (*"wireless"OR "bluetooth"*).

A string foi aplicada nas seguintes bases bibliográficas: Science Direct, IEEE, ACM e Scopus, por serem os principais acervos que se relacionam à área da computação, e a escolha das bases Springer e Web of Science por abordarem a área da química. As bases PubMed e BVS, por sua vez, por relacionar-se com a área da saúde.

Como critério de inclusão, é importante que os trabalhos sejam selecionados por abordarem "sensores químicos" e "IoT":

CI1 – O estudo deve envolver sensores químicos e IoT.

Para a exclusão de estudos foram adotados os seguintes critérios:

- CE1 - O artigo não descreve um estudo primário.
- CE2 - O documento retornado não é um artigo.
- CE3 - O texto completo do artigo não está escrito em inglês.
- CE4 - O texto completo do artigo não está disponível para acesso.
- CE5 - O artigo é uma versão mais antiga de outro já considerado.
- CE6 - O estudo não trata de sensores químicos vestíveis.

Como critérios de qualidade, foram utilizados 5 (cinco) critérios abaixo listados:

- CQ1 - Há novas tecnologias sendo aplicadas?
- CQ2 - Forma de coleta de dados.
- CQ3 - As descobertas são aceitáveis?
- CQ4 - É tratado com potenciostato ?
- CQ5 - Descrição detalhada da maneira de interpretar dados?

O CQ1 destina-se aos estudos que mostram os tipos de sensores químicos e apresentam soluções de como integrar IoT com estes sensores. Neste critério de qualidade, foram associadas 2 (duas) questões de pesquisa: QP1 e QP3. Um dos focos principais da pesquisa é a integração e os tipos de sensores que estão sendo utilizados, e este critério de qualidade vem reforçar este ponto.

O CQ2 visa mostrar de que maneira os dados são tratados via software, apresentando os tipos de coleta e tratamento. Foi associada a esse critério a QP2. Uma das informações relevantes para esta pesquisa é a maneira como são interpretados os dados recebidos e a questão de qualidade vem reforçar a importância desta interpretação.

O CQ3 é utilizado para valorizar os estudos que apresentam os problemas e desafios da área, com intuito de dar um panorama do estado da arte. Foi associada ao

CP3 à QP4, que aborda quais problemas/desafios são apresentados nas pesquisas e este critério vem avaliar a importância desses problemas e desafios na construção de um sensor químico vestível.

O CQ4 aponta se é usado o respectivo instrumento para aplicar potencial e obter a corrente resultante. Neste critério de qualidade, foi associado à QP2, pois a maneira que obter os dados é através do potenciostato, ou seja, essa informação é de fundamental importância.

O CQ5 tem o intuito de demonstrar como se detalha o modo em que são interpretados os dados e foi associada a QP2, que mais vez reforça a importância da interpretação dos dados. Mesmo estabelecendo os critérios de qualidade, nenhum estudo foi eliminado.

A maneira de realizar o cálculo das notas do critérios de qualidade é: $CQ1 + CQ2 + CQ3 + CQ4 + CQ5$, ou seja, dentro de cada critério de qualidade existe uma variação de pontos entre 1(um), 0,5 (zero vírgula cinco) e 0 (zero) e que após atribuído o valor é realizada a adição para ter o total das questões de qualidade. Foram utilizados os seguintes campos do formulário de extração de dados (FED): ano de publicação, veículo de publicação, dispositivos IoT aplicados, quais os tipos de sensores, material dos sensores, propósito do software, tipo do código, tipo de tecnologia, forma de interpretar dados, desafios/problemas, domínio e tendências. Foi utilizada a plataforma Parsifal¹ na síntese e análise de dados.

3. Resultados

O protocolo utilizado na RSL², após ser aplicado nas bases de dados, resultou um número inicial de 272 (duzentos e setenta e dois) artigos, sendo que foram identificados 56 (cinquenta e seis) duplicados e, após aplicar os critérios de inclusão e exclusão, foram aceitos 22 (vinte e dois) artigos. Iniciou-se a leitura completa dos artigos e após esta leitura foram eliminados mais 7 (sete) artigos, chegando ao número final de 15 (quinze) artigos, conforme Figura 1. Detalhes sobre os estudos eliminados, duplicados, seleção inicial e seleção final estão disponíveis³.

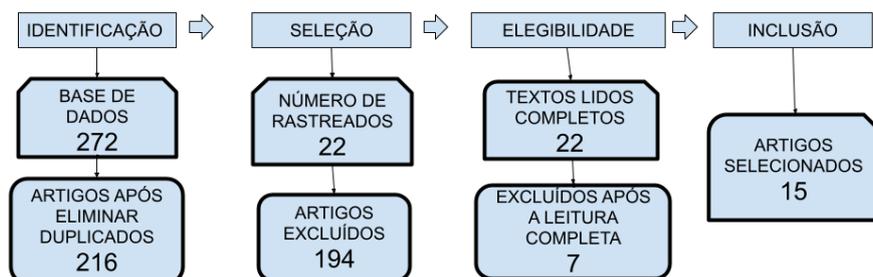


Figura 1. Fluxo da informação com as diferentes fases.

Os estudos primários selecionados com sua devida referência são mostrados na Tabela 1. Foi realizada uma revisão em 8 (oito) bases de dados, sendo que a maioria dos artigos foi publicada na IEEE Access, conforme observado na Figura 2.

¹Disponível para acesso em: <http://parsif.al/>

²Disponível para acesso em: <https://bit.ly/3STgLMP>

³Disponível para acesso em: <https://bit.ly/3JU9UPr>

Tabela 1. Artigos selecionados.

Artigos	Referência
S1: A flexible and physically transient electrochemical sensor for real-time wireless nitric oxide monitoring	[Li et al. 2020]
S2: A novel semiconductor based wireless electrochemical sensing platform for chronic disease management	[Mujeeb-U-Rahman et al. 2019]
S3: A Sensitive Potentiometric Biosensor Using MBs-AO/GO/ZnO Membranes-Based Arrayed Screen-Printed Electrodes for AA Detection and Remote Monitoring	[Chou et al. 2019a]
S4: Chemical Sensing at the Robot Fingertips: Toward Automated Taste Discrimination in Food Samples	[Ciui et al. 2018]
S5: Determination of L-Ascorbic Acid Using MBs-AOX/GO/IGZO/Al by Wireless Sensing System and Microfluidic Framework	[Chou et al. 2019b]
S6: EcoPatches: Maker-Friendly Chemical-Based UV Sensing	[Mariakakis et al. 2020]
S7: Electroanalytical Sensor for Diabetic Foot Ulcer Monitoring with Integrated Electronics for Connected Health Application	[Roy et al. 2020]
S8: Eyeglasses based wireless electrolyte and metabolite sensor platform	[Sempionatto et al. 2017]
S9: Eyeglasses-based tear biosensing system: Non-invasive detection of alcohol, vitamins and glucose	[Sempionatto et al. 2019]
S10: Highly self-healable and flexible cable-type pH sensors for real-time monitoring of human fluids	[Yoon et al. 2020]
S11: Machine Learning Assisted Multi-Functional Graphene-Based Harmonic Sensors	[Hajizadegan et al. 2021]
S12: PH Watch - Leveraging Pulse Oximeters in Existing Wearables for Reusable, Real-Time Monitoring of PH in Sweat (Demo)	[Balaji et al. 2019]
S13: Self-Sustainable Smart Ring for Long-Term Monitoring of Blood Oxygenation	[Magno et al. 2019]
S14: Simultaneous Monitoring of Sweat and Interstitial Fluid Using a Single Wearable Biosensor Platform	[Kim et al. 2018]
S15: Wearable electrochemical glove-based sensor for rapid and on-site detection of fentanyl	[Barfidokht et al. 2019]

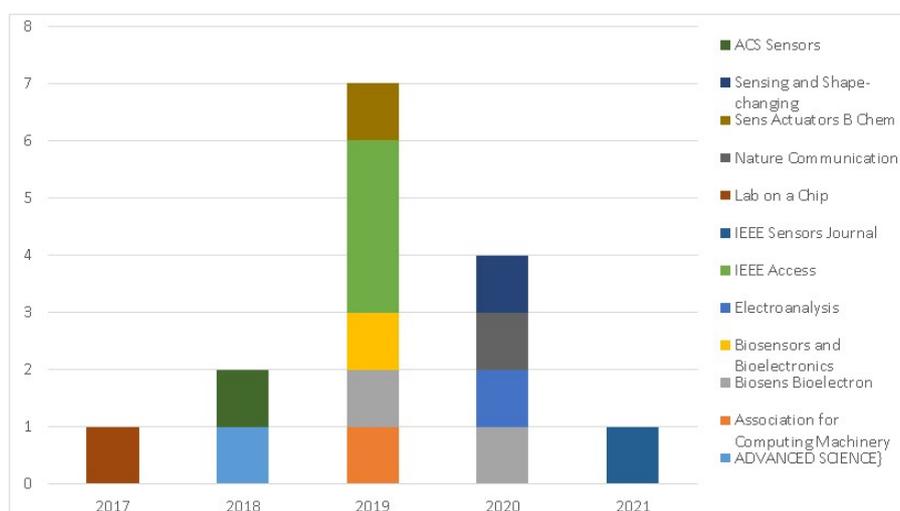


Figura 2. Artigos por ano e veículo de publicação.

4. Discussão

Esta seção apresenta a análise e a síntese das informações extraídas de cada um dos 15 (quinze) estudos selecionados. O resultado das atividades de análise e síntese permite responder às QPs desta RSL, como apresentado a seguir.

Para responder a questão QP1, foram utilizados os seguintes campos do formulário de extração de dados: ano de publicação, veículo de publicação, dispositivos IoT aplicados, tipo de tecnologia e tendências.

Nos trabalhos analisados, foram encontrados 15 (quinze) tipos de sensores, sendo que 14 (catorze) são sensores químicos e 1 (um) sensor físico. O sensor físico de propósito geral é representado no artigo (S13). Neste tipo de sensor, a proposta é realizar um monitoramento da oxigenação no sangue.

Entre os trabalhos analisados, há uma singularidade entre PC e *smartphone* como

tipos de tecnologia, em que 2 (dois) trabalhos mostram soluções que executam tanto em PCs quanto em *smartphones*, enquanto que nos trabalhos (S7, S8) são utilizados por *tablet*, conforme Figura 3. Devido à popularidade dos dispositivos hoje em dia, há uma tendência de uma forma geral de uso em qualquer dispositivo. Entretanto, dentre os trabalhos analisados, apenas 1 (um) artigo mostra uma aplicação que é possível a execução em dispositivos diferentes, e observa-se que em nenhum dos artigos é especificado qualquer requisito para o funcionamento em algum dispositivo.

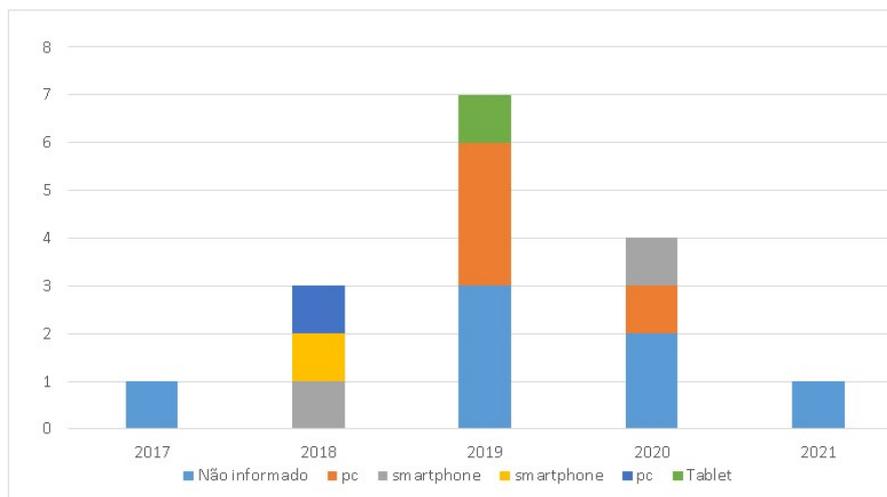


Figura 3. Tipo de tecnologia por ano.

A conclusão é que a maioria dos artigos está voltada para criação de sensores e que as tecnologias utilizadas somente são mencionadas para apresentar o resultado final, sendo que há uma concentração nos anos de 2019 e 2020.

Para responder à questão QP2, foram utilizados cinco campos do formulário de extração de dados: propósito do software, tipo do código, tipo de tecnologia, forma de interpretar os dados e tendências. Na maioria dos artigos, 11 (onze), não é informado qual software é utilizado, e em apenas 4 (quatro) há a utilização de software proprietário (S3, S5, S13, S14), conforme Figura 4. O software especializado foi desenvolvido especificamente para tratar os dados adquiridos dos sensores, sendo relevante destacar que destes 4 (quatro) artigos, 3 (três) são softwares proprietários (S3, S5, S14), conforme Figura 5. Entende-se como software especializado aquele que acompanha o dispositivo (potenciostato) e através do qual serão extraídos os dados do sensor químico, em que será determinada a potência de entrada e a potência final e, a partir deste comando inserido no software, obtém-se os resultados daquele sensor químico.

Na forma de interpretar os dados, somente 4 (quatro) artigos mencionam o assunto, sendo que em 1(um) é abordada a possibilidade de usar a técnica de *machine learning*. Foram estabelecidas cinco maneiras de interpretação nos artigos: algoritmo de tratamento de dados, IA, manual, não informado e outros, sendo que mais de 50% (cinquenta por cento) dos artigos não informa qual maneira é utilizada para interpretar esses dados, e apenas 5 (cinco) utilizam algum algoritmo (S3, S5, S6, S12, S13). Um dos artigos afirma que é possível usar IA para interpretar os dados (S11) e o último (S8) não especifica exatamente como seria tratado o assunto, conforme mostrado na Figura 6.

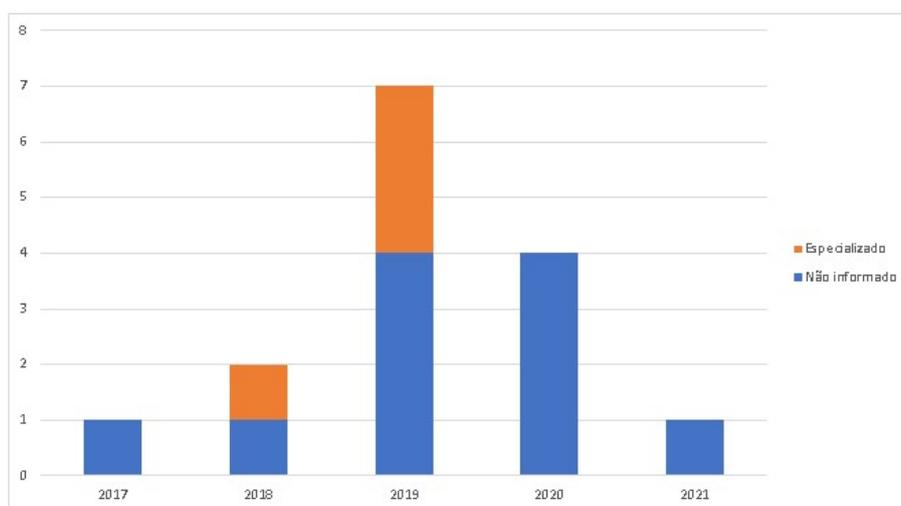


Figura 4. Proposito do software.

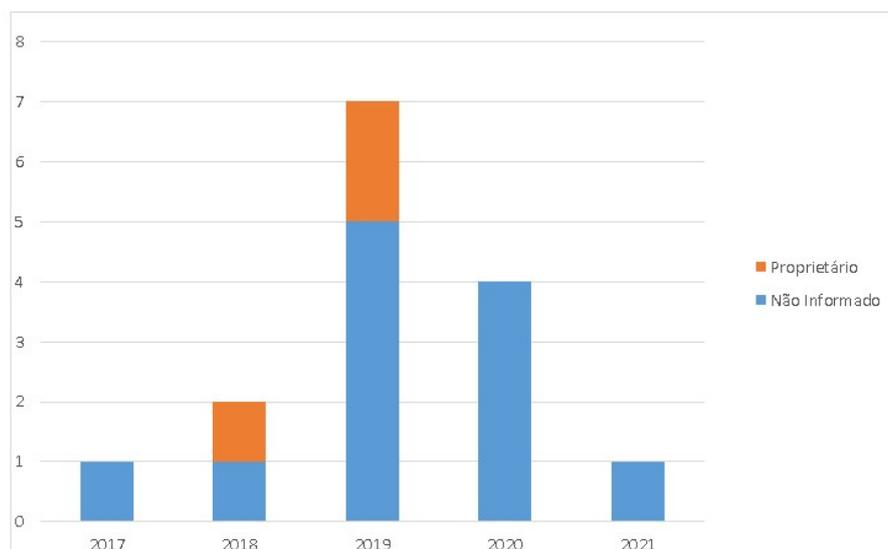


Figura 5. Tipo do código.

Portanto, baseado nos campos que foram extraídos, pode-se inferir que não há uma grande utilização de softwares especializados/proprietários para se realizar a interpretação dos dados. Em sua maioria, não é informado como é feita, ou não detalha, essa interpretação, podendo-se observar uma oportunidade para se produzir um software de código aberto que possa contribuir para futuras pesquisas nesta área.

Na questão QP3 foram utilizados 3 (três) campos do formulário de extração de dados: quais os sensores utilizados, material do sensor e tendências. O intuito é o de identificar os sensores químicos vestíveis utilizados. Dentre os 15 (quinze) artigos encontrados, 3 (três) abordam sensores de glicose (S2, S9, S14), outros 2 (dois) lidam com ácido ascórbico (S3, S5), e mais 2 (dois) lidam com álcool (S9, S14). Os demais trabalhos apresentam uma diversidade de monitoramento por parte dos sensores, como pode ser observado na Figura 7.

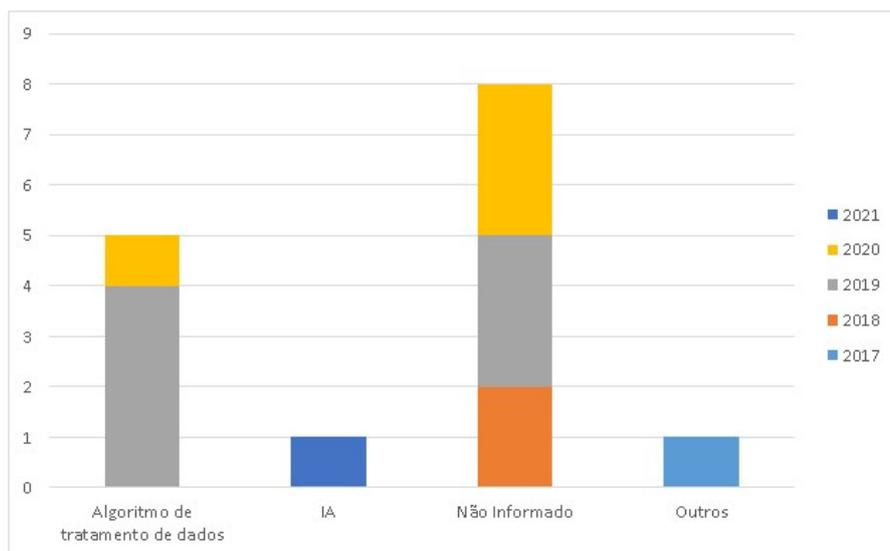


Figura 6. Forma de interpretar os dados por ano.

Na maioria dos casos apresentados nos artigos analisados, observa-se que os sensores químicos medem distúrbios metabólicos citados anteriormente, e apenas 2 (dois) artigos realizam abordagem diferente, como é o caso do artigo (S11) em que a proposta é utilizar *machine learning* para o tratamento dos dados. Os autores apresentam que este tratamento de dados pode ser aplicado no monitoramento de drogas, microfluídica, pressão, temperatura e agentes biológicos. Já o artigo (S13) destaca a monitoração da oxigenação do sangue a longo prazo por meio de um anel. Nesta questão conclui-se que, apesar do restrito número de artigos contabilizados, observa-se o monitoramento mais frequente de distúrbios relacionados à glicose, ácido ascórbico e álcool. Devido ao número incipiente de artigos e ao grande número de distúrbios metabólicos existentes, percebe-se que há vários potenciais campos de estudos e aplicações.

Na QP4, o campo utilizado do formulário de extração de dados foi desafios/problemas, nos quais 14 (catorze) artigos abordam a criação de sensores e 1 (um) artigo aborda o tratamento de dados através de *machine learning* (S11) e 1 (um) dentre os 14 (catorze) aborda a criação de um sensor para monitoramento do oxigênio no sangue (S13).

Alguns desafios apontados nos artigos estão relacionados à fabricação dos sensores para terem alta durabilidade e preço acessível. Uma outra característica detectada foi que os sensores são de propósitos específicos. Nesta questão de pesquisa, conclui-se que apenas 1 (um) artigo trata da possibilidade de uso da técnica de *machine learning* para o tratamento de dados de alguns sensores. A grande maioria dos artigos estudados não enfoca as aplicações, o que vem a ser uma área a ser explorada. Alguns destes artigos detalham os materiais para criação do sensor e dos circuitos eletrônicos para detecção remota, e colocam como desafios itens relacionados à construção do hardware.

Por fim, na QP5, na grande maioria dos artigos abordados prevalece a área de domínio da saúde, com exceção de 1 (um) trabalho que, além da saúde, envolve o domínio

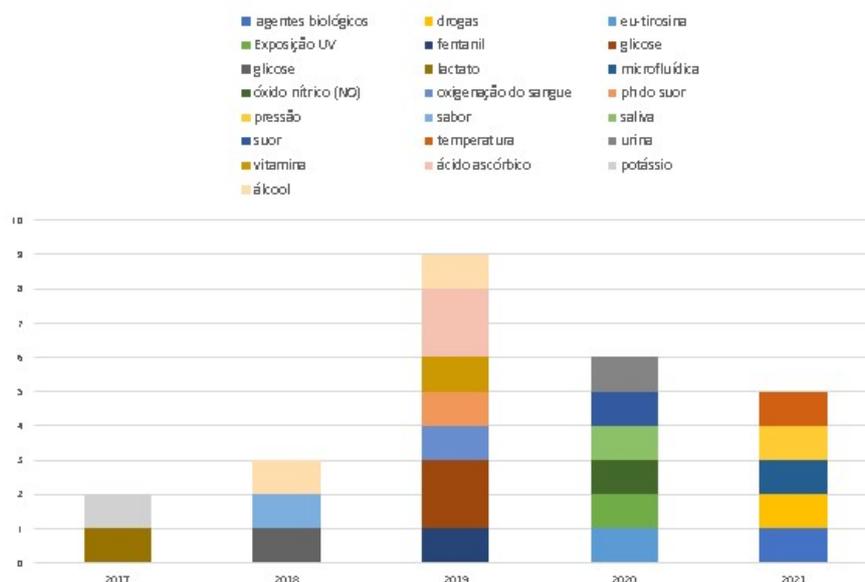


Figura 7. Tipo do monitoramento.

militar.

De maneira geral, os estudos analisados são voltados para algum tipo de sensor químico que detecta glicose, álcool, ácido ascórbico, dentre outros (S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10, S12, S13, S14, S15), sendo que apenas 2 (dois) trazem outro tipo de abordagem: um no contexto do monitoramento de oxigênio no sangue e outro no tratamento de dados de alguns sensores de pressão e temperatura. Dessa forma, é possível concluir que todos os sensores químicos apresentados têm por objetivo o melhoramento da qualidade de vida das pessoas, detectando e/ou monitorando aspectos relacionados à saúde.

5. Considerações finais

Essa revisão sistemática da literatura propôs uma investigação de sensores químicos vestíveis com IoT. Ao realizá-la, constatou-se que esta é uma área a ser explorada em virtude de não haver uma abordagem explícita da integração da área da química com a computação, ou seja, não é abordado com detalhes qual tipo de tecnologia foi utilizada para tratar os dados recebidos dos sensores. Dessa forma, considera-se uma oportunidade a realização de pesquisas nesta área, com intuito de otimizar o processo da coleta, tratamento e interpretação destes dados, e a consequente apresentação dos resultados de maneira rápida e eficiente.

Referências

Balaji, A. N., Yuan, C., Wang, B., Peh, L.-S., and Shao, H. (2019). PH Watch - Leveraging Pulse Oximeters in Existing Wearables for Reusable, Real-Time Monitoring of PH in Sweat (Demo). In *Proceedings of the 17th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, MobiSys '19*, pages 687–688, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery. event-place: Seoul, Republic of Korea.

- Barfidokht, A., Mishra, R. K., Seenivasan, R., Liu, S., Hubble, L. J., Wang, J., and Hall, D. A. (2019). Wearable electrochemical glove-based sensor for rapid and on-site detection of fentanyl. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 296:126422.
- Chou, J.-C., Lin, S.-H., Kuo, P.-Y., Lai, C.-H., Nien, Y.-H., Lai, T.-Y., and Su, T.-Y. (2019a). A Sensitive Potentiometric Biosensor Using MBs-AO/GO/ZnO Membranes-Based Arrayed Screen-Printed Electrodes for AA Detection and Remote Monitoring. *IEEE Access*, 7:105962–105972.
- Chou, J.-C., Wu, Y.-X., Kuo, P.-Y., Lai, C.-H., Nien, Y.-H., Lin, S.-H., Yan, S.-J., and Wu, C.-Y. (2019b). Determination of L-Ascorbic Acid Using MBs-AOX/GO/IGZO/Al by Wireless Sensing System and Microfluidic Framework. *IEEE Access*, 7:45872–45880.
- Ciui, B., Martin, A., Mishra, R. K., Nakagawa, T., Dawkins, T. J., Lyu, M., Cristea, C., Sandulescu, R., and Wang, J. (2018). Chemical Sensing at the Robot Fingertips: Toward Automated Taste Discrimination in Food Samples. *ACS Sensors*, 3(11):2375–2384.
- Gokhale, P., Bhat, O., and Bhat, S. (2018). Introduction to iot. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 5(1):41–44.
- Hajizadegan, M., Sakhdari, M., Abbasi, S., and Chen, P.-Y. (2021). Machine Learning Assisted Multi-Functional Graphene-Based Harmonic Sensors. *IEEE Sensors Journal*, 21(6):8333–8340.
- Kim, J., Sempionatto, J. R., Imani, S., Hartel, M. C., Barfidokht, A., Tang, G., Campbell, A. S., Mercier, P. P., and Wang, J. (2018). Simultaneous Monitoring of Sweat and Interstitial Fluid Using a Single Wearable Biosensor Platform. *ADVANCED SCIENCE*, 5(10).
- Li, R., Qi, H., Ma, Y., Deng, Y., Liu, S., Jie, Y., Jing, J., He, J., Zhang, X., Wheatley, L., Huang, C., Sheng, X., Zhang, M., and Yin, L. (2020). A flexible and physically transient electrochemical sensor for real-time wireless nitric oxide monitoring. *Nature Communications*, 11(1).
- Magno, M., Salvatore, G. A., Jokic, P., and Benini, L. (2019). Self-Sustainable Smart Ring for Long-Term Monitoring of Blood Oxygenation. *IEEE Access*, 7:115400–115408.
- Mariakakis, A., Chen, S., Nguyen, B. H., Bray, K., Blank, M., Lester, J., Ryan, L., Johns, P., Ramos, G., and Roseway, A. (2020). EcoPatches: Maker-Friendly Chemical-Based UV Sensing. In *Proceedings of the 2020 ACM Designing Interactive Systems Conference*, pages 1983–1994. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA.
- Mujeeb-U-Rahman, M., Honarvar Nazari, M., and Sencan, M. (2019). A novel semiconductor based wireless electrochemical sensing platform for chronic disease management. *Biosensors and Bioelectronics*, 124-125:66–74.
- Roy, S., Nagabooshanam, S., Krishna, K., Wadhwa, S., Chauhan, N., Jain, U., Kumar, R., Mathur, A., and Davis, J. (2020). Electroanalytical Sensor for Diabetic Foot Ulcer Monitoring with Integrated Electronics for Connected Health Application. *Electroanalysis*, 32(9):2082–2089.

- Scannavino, K. R. F., Nakagawa, E. Y., Fabbri, S. C. P. F., and Ferrari, F. C. (2017). *Revisão Sistemática da Literatura em Engenharia de Software: teoria e prática*. Elsevier.
- Sempionatto, J., Brazaca, L., García-Carmona, L., Bolat, G., Campbell, A., Martin, A., Tang, G., Shah, R., Mishra, R., Kim, J., Zucolotto, V., Escarpa, A., and Wang, J. (2019). Eyeglasses-based tear biosensing system: Non-invasive detection of alcohol, vitamins and glucose. *Biosensors and Bioelectronics*, 137:161–170.
- Sempionatto, J., Nakagawa, T., Pavinatto, A., Mensah, S., Imani, S., Mercier, P., and Wang, J. (2017). Eyeglasses based wireless electrolyte and metabolite sensor platform. *Lab on a Chip*, 17(10):1834–1842.
- Yoon, J. H., Kim, S.-M., Park, H. J., Kim, Y. K., Oh, D. X., Cho, H.-W., Lee, K. G., Hwang, S. Y., Park, J., and Choi, B. G. (2020). Highly self-healable and flexible cable-type pH sensors for real-time monitoring of human fluids. *Biosensors and Bioelectronics*, 150:111946.