

Construindo Redes de Apoio para Hipoxêmicos Introduzindo o Paradigma Multi-Agente no Uso de Oxímetros

Manoel Jorge de Lima Mieiro, Diego Cardoso Borda Castro,
Carlos Eduardo Pantoja, Nilson Mori Lazarin

¹Bacharelado em Sistemas de Informação
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow Da Fonseca (CEFET/RJ)
20.785-223 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil

manoel.mieiro@aluno.cefet-rj.br

diego.castro, nilson.lazarin, carlos.pantoja@cefet-rj.br

Abstract. *This work proposes the application of the Multi-Agent System (MAS) paradigm to enhance the autonomy of oximeters, enabling intelligent data collection, management, and notification of critical SpO₂ deficiency conditions to support networks, aiming for more efficient patient monitoring. The solution was developed using the Jason framework in conjunction with the ARGO architecture, which manages the hardware based on an ATMEGA microcontroller (Arduino). The study assessed the feasibility of this approach through a functional prototype built with a society of agents whose perceptions were derived from the Arduino microcontroller.*

Resumo. *Este trabalho propõe a aplicação do paradigma de Sistemas Multi-Agentes (SMA) para conferir maior autonomia a oxímetros, permitindo a coleta inteligente, o gerenciamento e a notificação de quadros críticos da deficiência de SpO₂ a redes de apoio, para acompanhamento mais eficiente do quadro. A solução foi desenvolvida com o uso do framework Jason, em conjunto com a arquitetura ARGO, responsável pelo controle do hardware baseado no microcontrolador ATMEGA (Arduino). O estudo aferiu a viabilidade desse tipo de aplicação por meio do protótipo construído, o qual fez uso de uma sociedade de agentes, cujas percepções advinham do microcontrolador Arduino.*

1. Introdução

Immich (2023) [Immich 2023] define hipoxemia como a redução da oxigenação arterial (CaO₂), que é influenciada por meio das variáveis de saturação arterial de oxigênio (SpO₂), a concentração de hemoglobina (Hb) e a afinidade do oxigênio à Hb, sendo interpretado como a facilidade com que o oxigênio se liga ou se desprende da molécula de Hb. Collins et al. (2015) [Collins et al. 2015] afirmam que a hipoxemia contribui para a redução na produção de energia nas células, o que compromete o funcionamento adequado de tecidos e órgãos. Em seu trabalho, destaca como métodos determinantes de hipoxemia, com destaque para os exames de sangue e uso de oxímetro de dedo; sendo o último o único não invasivo.

Oxímetros de dedo, além de não invasivos, apresentam o menor tempo de diagnóstico [Collins et al. 2015]; mas apostam na autonomia do operador. Então,

tratando-se de um usuário leigo (paciente), não agrega valor ao processo de identificação da deficiência de saturação do oxigênio, já que o operador não é capaz de emitir parecer técnico sobre as informações exibidas no aparelho. Dessa forma, é necessário acompanhamento ativo por um profissional qualificado, uma vez que esses dados ficam retidos no local de medição. Diante disso, este artigo busca comprovar a viabilidade na aplicação de Sistemas Multi-Agente no monitoramento, gestão e propagação das medidas obtidas de pacientes hipoxêmicos em oxímetros, permitindo diagnóstico e acompanhamento técnico integral por meio de mecanismos de comunicação Multi-Agente. Para isso, foi adotada uma arquitetura em camadas, na qual cada módulo possui uma responsabilidade única — desde a coleta dos dados até a triagem e notificação — organizada como uma sociedade de agentes voltada ao acompanhamento do paciente hipoxêmico. A solução foi construída por meio da codificação do SMA, fazendo uso da **ChonIDE**, conectada a um microcontrolador Arduino UNO. Este realiza a leitura dos níveis de SpO_2 do paciente, com valores inseridos experimentalmente via um teclado LCD acoplado ao controlador.

O presente trabalho apresenta potencial contribuição para a área médica, uma vez que o monitoramento remoto contínuo fornecido pelo SMA-oxímetro pode reduzir a ocupação de unidades de emergência ao possibilitar o diagnóstico precoce de hipoxemia. Ademais, o sistema diminui a sobrecarga do médico responsável, cuja atuação presencial passa a ser exigida apenas em situações críticas identificadas automaticamente pelo sistema de triagem e mensageria.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta uma breve descrição de alguns conceitos que podem não ser de conhecimento do leitor. A Seção 3 descreve o estudo de caso desenvolvido neste trabalho. A Seção 4 conclui com as considerações finais e trabalhos futuros.

2. Conceitos Gerais

A hipoxemia é definida como a redução do conteúdo arterial de oxigênio (CaO_2); sendo medida com base na pressão parcial de O_2 no sangue arterial (PaO_2) [Immich 2023]. A saturação fracional da hemoglobina pode ser obtida de maneira invasiva, por meio de exame de sangue arterial, ou de forma não invasiva, com o uso do oxímetro [Collins et al. 2015]. Este último fornece uma medida chamada SpO_2 , que difere menos de 2% do valor obtido por métodos invasivos como o exame de sangue, conforme explica Collins et al. (2015) [Collins et al. 2015].

O oxímetro é um equipamento útil para diagnósticos iniciais da deficiência de oxigenação arterial. É considerado confortável para o paciente e oferece resultados imediatos, com monitoramento contínuo. No entanto, o dispositivo ainda carece de autonomia operacional, sendo dependente de um operador especializado. Também não possui mecanismos de interpretação ou acompanhamento ativo do estado do paciente, limitando-se a fornecer medidas contínuas que podem não ter significado direto para usuários leigos.

Nesse contexto, surgem alternativas baseadas na Internet das Coisas (IoT), que permitem conectar dispositivos médicos à rede. Trabalhos como os de Bhuyan e Sheikh (2021) [Bhuyan and Sheikh 2021], Hidayat et al. (2020) [Hidayat et al. 2020] e Ganesh et al. (2022) [Ganesh et al. 2022] já exploram essa abordagem, mas com enfoque na

construção do microcontrolador oxímetro e sua conectividade. O presente trabalho, no entanto, busca também conferir autonomia operacional ao equipamento por meio de Sistemas Multiagentes (SMA, do inglês *Multi-Agent System*).

Cardoso e Fernando (2021) [Cardoso and Ferrando 2021] explicam que agentes são entidades computadorizadas capazes de raciocinar, tomar decisões de forma independente, colaborar com outros agentes quando necessário e perceber o contexto em que estão inseridas e reagir a ele. Por fim, agentes tomam iniciativa para concluir objetivos, sendo, portanto, proativos.

A construção de SMAs se dá, como em qualquer outro software, por meio de algoritmos escritos em texto, que posteriormente são interpretados ou compilados pelo computador. Para tornar esse processo mais ágil, foram criados os *Integrated Development Environments* (IDEs), que funcionam analogamente a uma ponte entre o desenvolvedor e o computador. No entanto, IDEs tradicionais ainda não oferecem suporte integral ao ferramental necessário para a construção de SMAs [Siqueira et al. 2024]. O *Cognitive Hardware on Network – Integrated Development Environment* (ChonIDE) é uma plataforma web de código aberto que se destaca justamente por fornecer esse suporte especializado [Alexandre et al. 2024]. O paradigma *Agent-Oriented Programming Language* (AOPL) é utilizado na camada lógica da construção dos SMAs, por meio da linguagem de programação AgentSpeak [Pantoja et al. 2016b]. O interpretador Jason permite a execução de AgentSpeak sobre a linguagem Java, uma das mais populares para o tema de pesquisa. A ChonIDE utiliza Jason para estabelecer a comunicação entre os agentes e os microcontroladores, com o auxílio do *middleware* Javino [Lazarin and Pantoja 2015]. A arquitetura ARGO, baseada em Jason [Pantoja et al. 2016b], também está disponível na ChonIDE e permite separar o desenvolvimento de SMAs em duas camadas: uma dedicada ao *hardware* e outra à lógica de raciocínio (*reasoning layer*) [Pantoja et al. 2016b], permitindo assim o desenvolvimento de agentes por meio de camadas de responsabilidades bem definidas.

3. Metodologia

O acompanhamento é pautado nos níveis de SpO₂ detectados pelo SMA-oxímetro; com a triagem feita de forma autônoma pelo sistema. graças à sociedade de agentes embarcada no microcontrolador. O SMA faz o monitoramento integral do enfermo, mantendo uma rede de apoio e um responsável técnico (médico) cientes de casos críticos. O fluxo de interação entre usuários e o SMA está disposto na Figura 1.

A medição é feita estabelecendo a comunicação entre os componentes do microcontrolador e o programa AgentSpeak; que é feita pela compilação do *firmware* do Arduino, ARGO [Pantoja et al. 2016a], na ChonIDE. A inicialização das percepções do *hardware* também é feita na IDE, pelo botão de **Play**, sendo o valor de saturação padrão 98%, nível considerado normal em indivíduos saudáveis [Collins et al. 2015].

Alterações nos níveis de SpO₂ podem ser observadas durante a interação do usuário com o teclado LCD, sendo o botão direito responsável pelo incremento e o esquerdo, pelo decremento no percentual de saturação, respectivamente.

O sistema, durante a percepção, baseando-se nos níveis de SpO₂ começa a efetuar o diagnóstico inicial e comunicar o quadro de risco correlato à leitura ao agente **monitor**,

que exibe essa informação no console da aplicação. A classificação de risco efetuada pela aplicação é ilustrada na Tabela 1

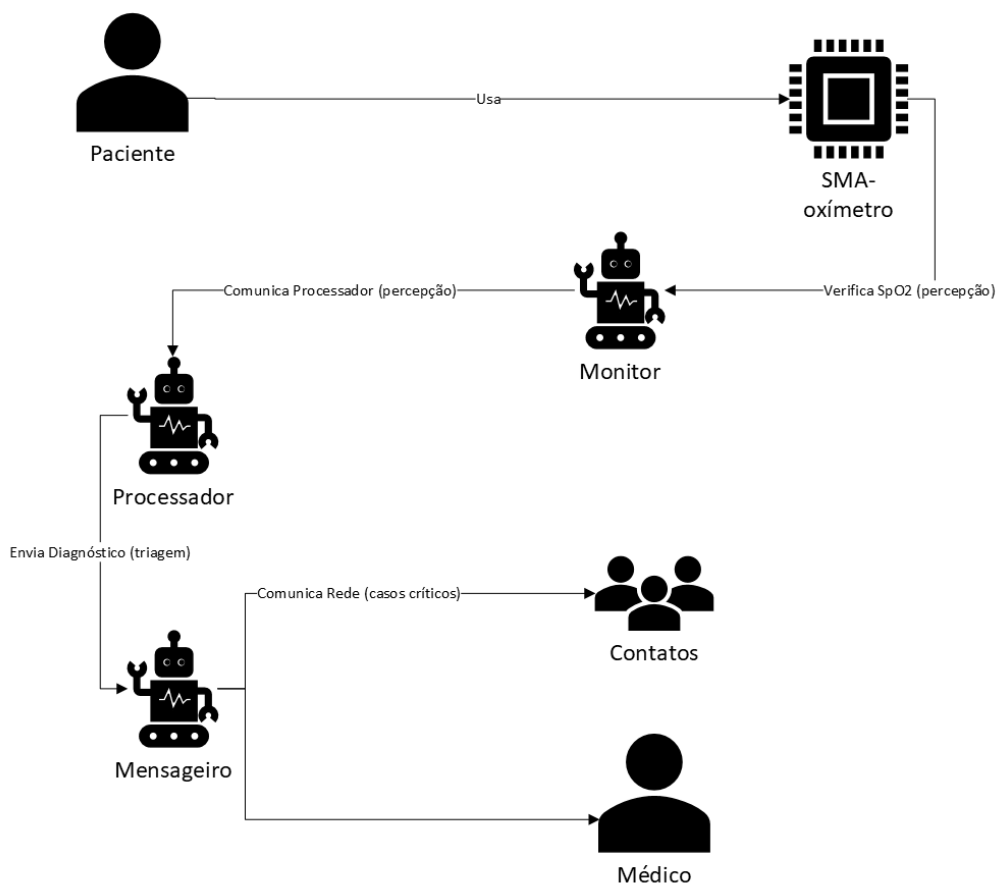


Figura 1. Diagrama de Interações

| Risco | Mínimo (%) | Máximo (%) |
|---------|------------|------------|
| Normal | 96 | 100 |
| Alerta | 90 | 95 |
| Crítico | 0 | 89 |

Tabela 1. Indicadores de Risco SpO₂ (adaptado)[Kadarina and Priambodo 2018]

Casos considerados críticos são comunicados ao agente **mensageiro**, cuja responsabilidade é identificar a rede de apoio atrelada ao paciente e disparar mensagens acerca de seu quadro de saúde. Esse cenário pode ser observado nas Figuras 2 e 3

```

Agent Tracer
[monitor] Enviando taxa para processador...
[monitor] New perception-> SPo2 rate's: 91 %
[monitor] Enviando taxa para processador...
[processador] Taxa SPo2 recebida de monitor: 95%
[monitor] Enviando taxa para processador...
[processador] Taxa SPo2 recebida de monitor: 94%
[monitor] Enviando taxa para processador...
[processador] Taxa SPo2 recebida de monitor: 93%
[monitor] Saturacao eviada com sucesso.
[processador] Taxa SPo2 recebida de monitor: 92%
[monitor] Saturacao eviada com sucesso.
[processador] Taxa SPo2 recebida de monitor: 91%
[monitor] Saturacao eviada com sucesso.
[processador] SpO2: 91%. Status: CRITICO - Emergencia medica!

```

Figura 2. Estado Crítico

```

Agent Tracer
[processador] Aguardando diagnostico...
[processador] EMERGENCIA! Notificando rede de apoio...
[processador] EMERGENCIA! Notificando rede de apoio...
[processador] EMERGENCIA! Notificando rede de apoio...
[processador] EMERGENCIA! Notificando rede de apoio...
[mensageiro] Quadro de gravidade CRITICO recebido de processador
[mensageiro] Adicionando severidade do caso a base de beliefs...
[mensageiro] Quadro de gravidade CRITICO recebido de processador
[mensageiro] Adicionando severidade do caso a base de beliefs...
[processador] EMERGENCIA! Notificando rede de apoio...
[mensageiro] Quadro de gravidade CRITICO recebido de processador
[mensageiro] Adicionando severidade do caso a base de beliefs...
[mensageiro] Severidade Armazenada! Notificando rede de apoio...
[mensageiro] Lucy Steel, favor procurar pelo paciente Jonny Joestar
[mensageiro] Caso confirmado de hipoxemia
[mensageiro] Diego Brando, favor procurar pelo paciente Jonny Joestar
[mensageiro] Caso confirmado de hipoxemia
[mensageiro] Funny Valentine, favor procurar pelo paciente Jonny Joestar
[mensageiro] Caso confirmado de hipoxemia
[mensageiro] Gyro Zepelli, favor procurar pelo paciente Jonny Joestar
[mensageiro] Caso confirmado de hipoxemia
[mensageiro] Rede de apoio completamente notificada!

```

Figura 3. Contactando Rede

O modelo conceitual da arquitetura de responsabilidade única usado na construção do oxímetro está ilustrado na Figura 4. No diagrama está disposto todo o fluxo de interação e processamento de dados feito pelo oxímetro, desde a etapa de coleta até a mensageria.

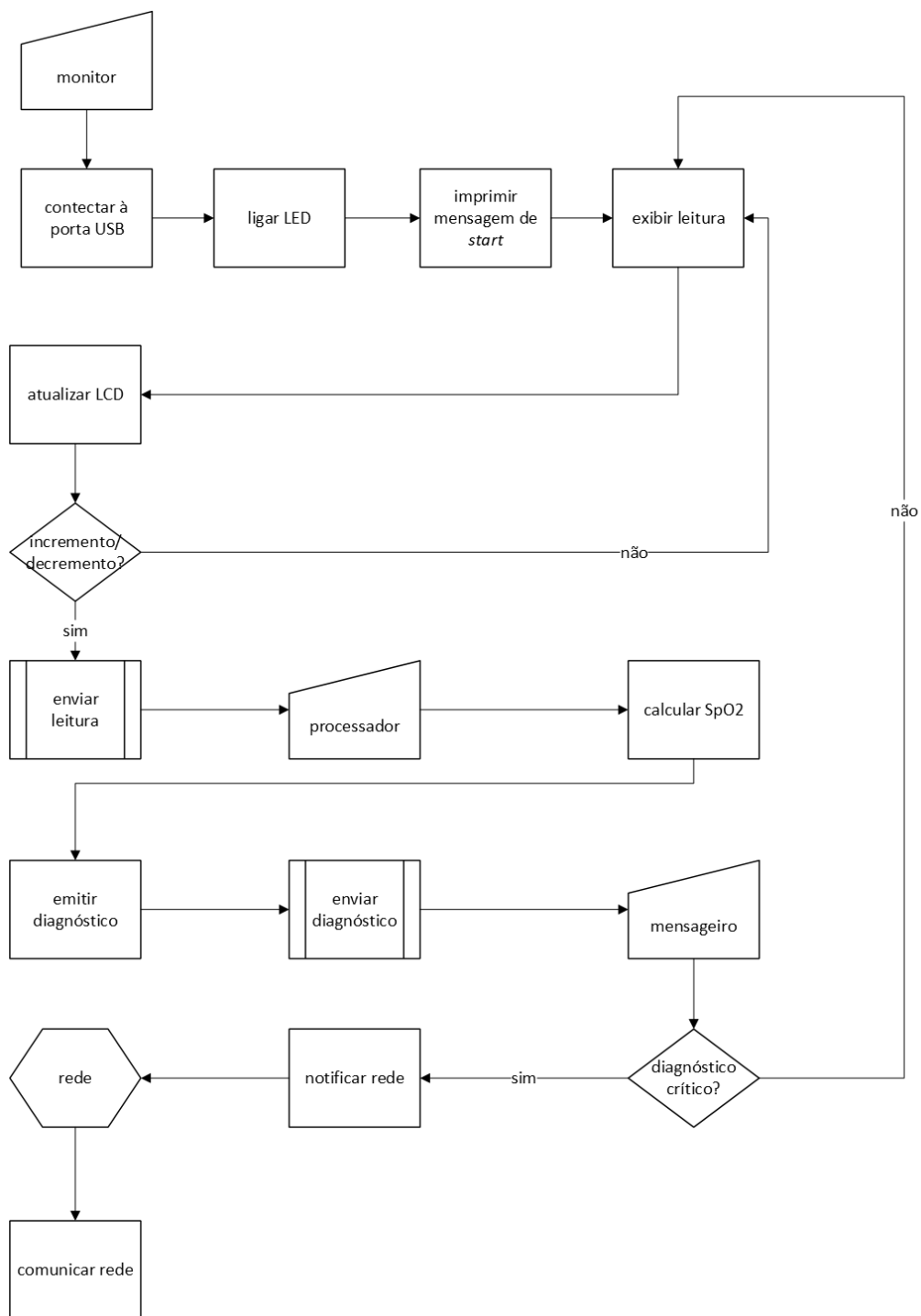


Figura 4. Arquitetura Conceitual

4. Métodos

A presente pesquisa adota uma abordagem avaliativa, a fim de validar o funcionamento do protocolo de comunicação Multi-Agente aplicado à medição dos níveis de saturação periférica de oxigênio (SpO₂). O estudo baseia-se na construção de um protótipo funcional de oxímetro, utilizando Arduino UNO, e no desenvolvimento de um sistema

lógico de controle e monitoramento escrito na linguagem AgentSpeak, compilado e executado na ferramenta ChonIDE. A coleta de dados ocorre diretamente no protótipo físico, enquanto o processamento e a interpretação das informações são realizados pelo programa denominado *Oximeter*. Essa configuração permite avaliar, de forma objetiva e controlada, a capacidade de comunicação entre hardware e software e a fidelidade das informações apresentadas no console, validando o comportamento esperado do sistema frente às condições experimentais simuladas.

5. Implementação

Nesta pesquisa, foi realizada a construção de um protótipo SMA, embarcado em uma placa Arduino; para aferir a viabilidade do uso de SMAs na construção de oxímetros autônomos. A escolha do microcontrolador se deu pela sua compatibilidade com a ChonIDE a nível de *firmware*, enquanto o uso do teclado se deu pela simplicidade de implementação e a conveniência de mecanismos de entrada e saída (*I/O*) de dados; o que facilitou os testes de *software*. O sistema foi capaz de realizar a coleta ativa dos níveis de SpO₂ do paciente, efetuar a classificação de risco e realizar o *broadcast* do diagnóstico em casos considerados graves.

O protótipo foi equipado com um teclado LCD e três LEDs distintos; sendo o uso do teclado pela necessidade de atualização das crenças do agente monitor, responsáveis pela quantificação dos níveis de SpO₂ no sangue. Ademais, o componente também possui saída de dados por meio do visor LCD, para constatação dos dados exibidos na ChonIDE. Os LEDs foram escolhidos para identificar o status do hardware ao carregar o firmware compilado. A escolha desse ferramental se deu pelo seu baixo custo e amplo suporte aos componentes, tornando a experimentação viável. O aparato descrito pode ser observado na Figura 5

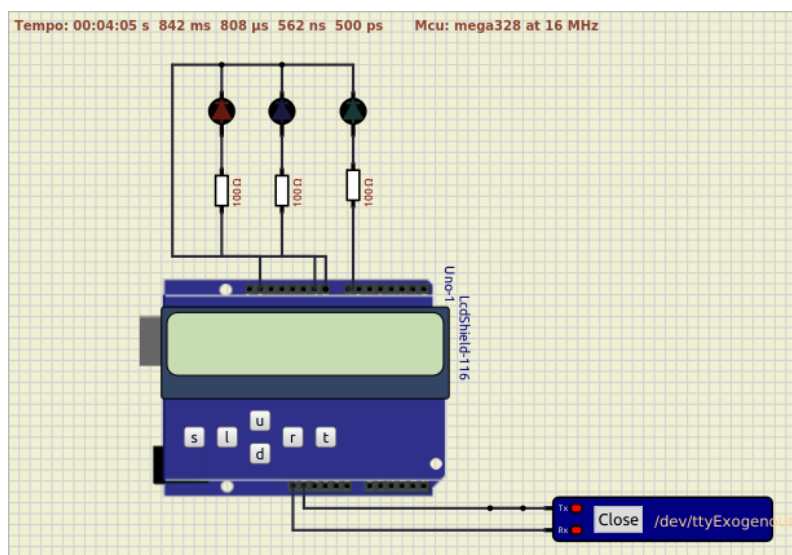


Figura 5. Protótipo do Oxímetro.

Já a parte lógica do projeto foi construída em *AgentSpeak* na ChonIDE, para integração com o microcontrolador Arduino, por meio do Javino; durante a compilação

do firmware escrito em ArduINO. Oximeter, projeto criado na ChonIDE para esta pesquisa, foi arquitetado seguindo o paradigma Multi-Agente, sendo constituído de quatro camadas de responsabilidade compostas por um agente cada. Assim, há melhor manutenção e escalabilidade ao projeto, seguindo os preceitos arquiteturais do ARGO [Pantoja et al. 2016b].

6. Conclusão e Trabalhos Futuros

O paradigma Multi-Agente foi aplicado de forma adequada ao domínio do problema, conforme demonstrado no protótipo funcional. A chave para esse resultado foi a simplicidade da implementação, cujo objetivo consistiu em integrar o microcontrolador Arduino a uma sociedade de agentes para automação do monitoramento de hipoxêmicos. Esse propósito foi alcançado por meio da criação de uma arquitetura em camadas de responsabilidade única, simulando a triagem hospitalar, com etapas de leitura, diagnóstico e acompanhamento. Embora simples, a validação da viabilidade de implantação abre caminho para trabalhos futuros com *hardware* mais sofisticado, concebidos sob o mesmo paradigma, o que se mostra promissor ao se considerar a escalabilidade da solução para modelos de Inteligência Artificial, especialmente no contexto da IoT.

Como trabalhos futuros, pretende-se incluir sensores para detecção direta de SpO₂, dispensando a inserção manual do dado; desenvolver mecanismos de notificação mais robustos, como WhatsApp e ligações, para aprimorar a comunicação com a rede de apoio; e empregar meios de armazenamento dos dados coletados, possibilitando análises históricas do paciente, o que pode contribuir para a identificação das causas da hipoxemia. Além disso, serão conduzidas avaliações por meio de questionários de aceitação tecnológica, de forma a verificar a utilidade da proposta, sempre considerando os aspectos éticos envolvidos no processo.

Por resultante, é importante ressaltar que a pesquisa expõe certas ameaças à validade [Ihantola and Kihn 2011] que comprometem a habilidade de gerar resultados confiáveis e limitam a possibilidade de generalizá-los. Dentre as ameaças, podem ser citadas as ameaças de constructo, resultantes da ausência de avaliações com usuários, e as ameaças internas, originadas pela falta de garantia do comportamento esperado, em virtude de possíveis relações de causa e efeito presentes no estudo.

Referências

- [Alexandre et al. 2024] Alexandre, T., Pantoja, C., and Bernadini, F. (2024). Investigação de modelos organizacionais para a criação de máquinas Éticas. In *Anais do XVIII Workshop-Escola de Sistemas de Agentes, seus Ambientes e Aplicações*, pages 150–155, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- [Bhuyan and Sheikh 2021] Bhuyan, M. H. and Sheikh, M. (2021). Designing, implementing, and testing of a microcontroller and iot-based pulse oximeter device. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*, ISSN: e-2278-1676, p-2320-3331, 16(5):38–48.
- [Cardoso and Ferrando 2021] Cardoso, R. C. and Ferrando, A. (2021). A review of agent-based programming for multi-agent systems. *Computers*, 10(2):16.

- [Collins et al. 2015] Collins, J.-A., Rudenski, A., Gibson, J., Howard, L., and O’Driscoll, R. (2015). Relating oxygen partial pressure, saturation and content: the haemoglobin–oxygen dissociation curve. *Breathe*, 11(3):194–201.
- [Ganesh et al. 2022] Ganesh, K. V. S. S., Jeyanth, S. S., and Bevi, A. R. (2022). Iot based portable heart rate and spo2 pulse oximeter. *HardwareX*, 11:e00309.
- [Hidayat et al. 2020] Hidayat, A., Wardhany, V. A., Nugroho, A. S., Hakim, S., Jhoswanda, M., Syamsiana, I. N., Agustina, N. A., et al. (2020). Designing iot-based independent pulse oximetry kit as an early detection tool for covid-19 symptoms. In *2020 3rd international conference on computer and informatics engineering (IC2IE)*, pages 443–448. IEEE.
- [Ihantola and Kihn 2011] Ihantola, E.-M. and Kihn, L.-A. (2011). Threats to validity and reliability in mixed methods accounting research. *Qualitative Research in Accounting & Management*, 8(1):39–58.
- [Immich 2023] Immich, A. (2023). Capacitação em oxigenoterapia no ambiente hospitalar: Um estudo de pré e pós-teste.
- [Kadarina and Priambodo 2018] Kadarina, T. M. and Priambodo, R. (2018). Monitoring heart rate and SpO2 using Thingsboard IoT platform for mother and child preventive healthcare. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 453(1):012028.
- [Lazarin and Pantoja 2015] Lazarin, N. M. and Pantoja, C. E. (2015). A robotic-agent platform for embedding software agents using raspberry pi and arduino boards. In *Workshop-Escola de Sistemas de Agentes, seus Ambientes e Aplicações (WESAAC)*, pages 13–20. SBC.
- [Pantoja et al. 2016a] Pantoja, C. E., Stabile, M. F., Lazarin, N. M., and Sichman, J. S. (2016a). ARGO: An Extended Jason Architecture that Facilitates Embedded Robotic Agents Programming. In Baldoni, M., Müller, J. P., Nunes, I., and Zalila-Wenkstern, R., editors, *Engineering Multi-Agent Systems*, pages 136–155, Cham. Springer International Publishing.
- [Pantoja et al. 2016b] Pantoja, C. E., Stabile Jr, M. F., Lazarin, N. M., and Sichman, J. S. (2016b). Argo: An extended jason architecture that facilitates embedded robotic agents programming. In *International workshop on engineering multi-agent systems*, pages 136–155. Springer.
- [Siqueira et al. 2024] Siqueira, E. M. P., Ramos, G., Raboni, T., Pantoja, C. E., and Lazarin, N. M. (2024). Análise comparativa de um protótipo de ide para desenvolvimento de sma embarcados. In *Workshop-Escola de Sistemas de Agentes, seus Ambientes e Aplicações (WESAAC)*, pages 85–95. SBC.