

TECNOLOGIA E INCLUSÃO NA PREVENÇÃO DE RISCOS OCUPACIONAIS: SISTEMAS EMBARCADOS PARA DETECÇÃO DE CALOR EXCESSIVO NA INDÚSTRIA METALÚRGICA

*Lucas Matos da Silva¹, Ana Carolina Mendes Fortes², Luiza Gabrielly do Rosário Chaves³,
Kaylane Flávia Barbosa Chagas⁴, Thaylanny Oliveira Santos⁵*

¹ Universidade Federal do Maranhão, São Luís – MA, Brasil, lucas.matos2@discente.ufma.br

² Universidade Federal do Maranhão, São Luís – MA, Brasil, fortes.ana@discente.ufma.br

³ Universidade Federal do Maranhão, São Luís – MA, luiza.gabrielly@discente.ufma.br

⁴ Universidade Federal do Maranhão, São Luís – MA, kaylane.flavia@discente.ufma.br

⁵ Universidade Federal do Maranhão, São Luís – MA, Brasil,

thaylanny.oliveira@discente.ufma.br

Orientador: *Thales Levi Azevedo Valente⁶*

⁶ Universidade Federal do Maranhão, São Luís – MA, Brasil, thales.l.a.valente@gmail.com

Resumo: O presente trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema embarcado para monitoramento térmico em ambientes industriais, com foco na indústria metalúrgica, visando à prevenção de riscos ocupacionais associados à exposição excessiva ao calor. O sistema utiliza sensores de temperatura e microcontroladores para monitorar as condições térmicas do ambiente em tempo real, com base na temperatura de bulbo seco (Tdb), promovendo a segurança dos trabalhadores. Através da coleta contínua de dados ambientais, o sistema emite alertas visuais e sonoros sempre que os limites críticos de temperatura são atingidos, sinalizando a necessidade de pausas ou medidas de controle ambiental. A interface web integrada permite a visualização dos dados em tempo real, facilitando o ajuste das condições operacionais pelos gestores. Este projeto representa uma inovação na segurança do trabalho, promovendo ambientes laborais mais seguros e saudáveis, ao mesmo tempo que contribui para a produtividade e o bem-estar dos trabalhadores.

Palavras-chave: sistemas embarcados, NR-15, monitoramento térmico, exposição ao calor, segurança ocupacional, microcontrolador.

**TECHNOLOGY AND INCLUSION IN OCCUPATIONAL RISK PREVENTION:
EMBEDDED SYSTEMS FOR EXCESSIVE HEAT DETECTION IN THE
METALLURGICAL INDUSTRY**

**Lucas Matos da Silva¹, Ana Carolina Mendes Fortes², Luiza Gabrielly do Rosário
Chaves³, Kaylane Flávia Barbosa Chagas⁴, Thaylanny Oliveira Santos⁵**

¹ Federal University of Maranhão, São Luís – MA, Brazil, lucas.matos2@discente.ufma.br

² Federal University of Maranhão, São Luís – MA, Brazil, fortes.ana@discente.ufma.br

³ Federal University of Maranhão, São Luís – MA, Brazil, luiza.gabrielly@discente.ufma.br

⁴ Federal University of Maranhão, São Luís – MA, Brazil, kaylane.flavia@discente.ufma.br

⁵ Federal University of Maranhão, São Luís – MA, Brazil,

thaylanny.oliveira@discente.ufma.br

Advisor: Thales Levi Azevedo Valente⁶

⁶ Federal University of Maranhão, São Luís – MA, Brazil, thales.l.a.valente@gmail.com

Summary: This work proposes the development of an embedded system for thermal monitoring in industrial environments, focusing on the metallurgical industry, and changes in the prevention of occupational hazards associated with excessive heat exposure. The system uses temperature sensors and microcontrollers to monitor environmental thermal conditions in real time, based on dry bulb temperature (Tdb), promoting worker safety. Through continuous collection of environmental data, the system issues visual and audible alerts whenever critical temperature limits are reached, signaling the need for breaks or environmental control measures. An integrated web interface allows real-time data visualization, facilitating the adjustment of operational conditions by managers. This project represents an innovation in occupational safety, promoting safer and healthier work environments while contributing to worker productivity and well-being.

Key words: embedded systems, NR-15, thermal monitoring, heat exposure, occupational safety, microcontrollers.

INTRODUÇÃO

A indústria metalúrgica desempenha um papel estratégico no desenvolvimento econômico, tecnológico e social do Brasil, sendo responsável por uma fração relevante da cadeia produtiva nacional^{1,3,4}. No entanto, os ambientes laborais desse setor frequentemente impõem desafios significativos relacionados à segurança e saúde ocupacional, principalmente devido à exposição prolongada a fontes intensas de calor^{5,6}. Essa exposição pode desencadear uma série de efeitos deletérios à saúde dos trabalhadores, como fadiga, desidratação, estresse térmico, exaustão e, em casos extremos, colapso térmico e óbito^{7,8,9}.

Estudos apontam que a elevação da temperatura ambiente pode reduzir a produtividade em ambientes industriais e cognitivos, afetando desde a capacidade de concentração até a velocidade de execução de tarefas^{6,7}. Mesmo com a existência de normas regulamentadoras, como a Norma Regulamentadora nº 15 (NR-15), que estabelece limites de tolerância para exposição ao calor em diferentes tipos de atividade física¹, ainda são comuns os casos de descumprimento devido à ausência de mecanismos automatizados de monitoramento em tempo real^{5,9}.

Nesse cenário, tecnologias embarcadas surgem como uma alternativa eficiente e viável para o monitoramento contínuo de variáveis ambientais relevantes^{3,4}. Tais sistemas, compostos por sensores conectados a microcontroladores, são capazes de coletar, processar e exibir dados de temperatura ou umidade, acionando automaticamente sinais de alerta quando valores críticos são atingidos^{5,9}. Essa resposta em tempo real é essencial para mitigar riscos e assegurar ambientes de trabalho mais seguros e adequados aos limites estabelecidos pela legislação.

O IBUTG (Índice de Bulbo Úmido Termômetro de Globo) é um índice normatizado pela NR-15 que visa quantificar o nível de estresse térmico em ambientes de trabalho. Seu cálculo depende de três variáveis ambientais: temperatura de bulbo úmido natural (Tnwb), temperatura de globo (Tg) e temperatura de bulbo seco (Tdb). As fórmulas estabelecidas pela norma são:

- Com carga solar direta:

$$\text{IBUTG} = 0,7 \times \text{Tnwb} + 0,2 \times \text{Tg} + 0,1 \times \text{Tdb}$$

- Sem carga solar direta:

$$\text{IBUTG} = 0,7 \times \text{Tnwb} + 0,3 \times \text{Tg}$$

Embora o cálculo completo do IBUTG exija medições específicas de Tnwb e Tg, a própria NR-15 reconhece a Tdb como uma das componentes do índice. Essa variável representa diretamente a temperatura do ar ambiente¹. Em ambientes internos, noturnos ou com baixa carga térmica radiante, cenários frequentes em indústrias, a Tdb pode servir como um indicativo preliminar confiável para decisões operacionais imediatas^{5, 7}.

Dessa forma, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema embarcado de monitoramento ambiental térmico, baseado exclusivamente na medição da temperatura de bulbo seco (Tdb). Utilizando o sensor digital AHT10, de alta precisão, acoplado a um microcontrolador de arquitetura ARM4, o sistema é capaz de medir, armazenar e exibir a temperatura ambiente, além de emitir alertas visuais e sonoros sempre que o limite térmico estabelecido for ultrapassado. A proposta visa ampliar a segurança ocupacional em ambientes industriais, especialmente naqueles com limitação de ventilação ou climatização ativa.

Para estabelecer uma base sólida de funcionamento, o sistema considera os limites de tolerância ao calor estabelecidos pela NR-15, conforme apresentado na Tabela 1. Esses limites variam de acordo com a intensidade da atividade física executada pelo trabalhador (leve, moderada ou pesada) e o regime de pausas recomendado, conforme os valores do IBUTG¹.

Tabela 1. Limites de tolerância ao calor (NR-15, Anexo 3)

Tipo de atividade	Trabalho contínuo (IBUTG °C)	Regime 45/15 (IBUTG °C)	Regime 30/30 (IBUTG °C)	Regime 15/45 (IBUTG °C)
Leve	Até 30,0	30,1-30,5	30,7-31,4 °C	31,5-32,2
Moderada	Até 26,7	26,8-28,0	28,1-29,4	29,5-31,1
Pesada	Até 25,0	25,1-25,9	26,0-27,9	28,0-30,0
Proibido	Acima 32,2	Acima 31,1	Acima 27,9	Acima 30,0

Atividade proibida sem adoção de medidas adicionais de controle.

Fonte: BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. NR-15: Atividades e Operações Insalubres, Anexo 3 (Portaria SEPRT n.º 1.359/2019)¹.

Mesmo sem calcular o IBUTG completo, o sistema desenvolvido já representa uma solução eficiente e acessível para monitoramento térmico contínuo em tempo real, sobretudo em pequenas e médias indústrias metalúrgicas. Além disso, abre caminho para futuras expansões, como a integração de sensores adicionais para aferição de T_g e T_{nwb}, comunicação via Wi-Fi e envio de dados para plataformas de visualização remota.

Por fim, o desenvolvimento e a adoção de tecnologias acessíveis como esta não apenas promovem a segurança ocupacional, mas também contribuem para a sustentabilidade, inclusão tecnológica e adequação das indústrias às exigências normativas e sociais do século XXI 3,8.

MATERIAL E MÉTODOS

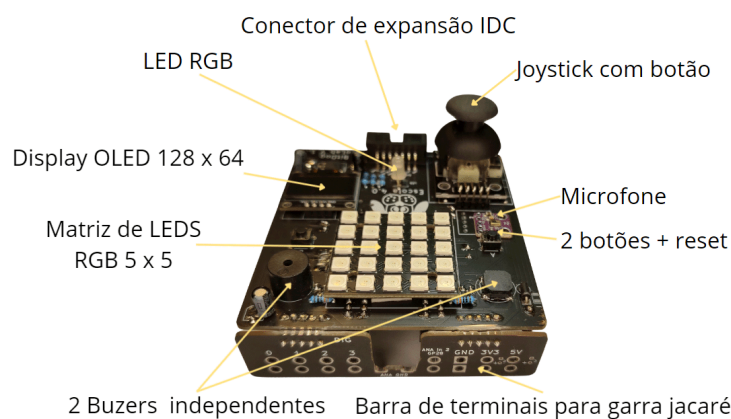
O sistema embarcado desenvolvido neste estudo foi projetado para realizar o monitoramento contínuo da temperatura em ambientes industriais, com foco na identificação de riscos térmicos associados à exposição ocupacional ao calor, conforme os parâmetros estabelecidos pela Norma Regulamentadora n.º 15 (NR-15)¹. A proposta visa fornecer uma solução acessível, automatizada e de resposta imediata para auxiliar na prevenção de doenças ocupacionais relacionadas ao estresse térmico.

O protótipo foi implementado utilizando a placa BitDogLab, que incorpora o microcontrolador RP2040 da Raspberry Pi Foundation. Este microcontrolador conta com processador dual-core ARM Cortex-M0+ operando a 133 MHz, 264 KB de RAM interna e suporte aos principais protocolos de comunicação digital, como I²C, SPI e PWM. Esses recursos possibilitam o controle eficiente de periféricos e o processamento local dos dados ambientais em tempo real, sem a necessidade de unidades de processamento externo.

A placa BitDogLab foi escolhida devido à sua versatilidade e integração de diversos componentes embarcados em um único módulo, otimizando o desenvolvimento e reduzindo o

custo do sistema. Entre os periféricos integrados destacam-se o display OLED 128×64, utilizado para exibição das leituras de temperatura em tempo real; a matriz de LEDs RGB e os buzzers piezoelétricos, responsáveis pela emissão de alertas visuais e sonoros quando a temperatura ultrapassa os limites críticos; além de joystick, microfone e conectores de expansão, que permitem futuras ampliações funcionais do projeto. A arquitetura da placa está representada na Figura 1.

Figura 1 – Arquitetura da placa BitDogLab com microcontrolador RP2040



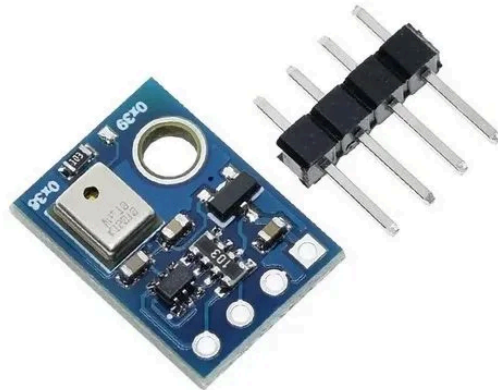
Fonte: BitDogLab (2025)

O microcontrolador RP2040 foi selecionado por suas especificações técnicas robustas, incluindo processador dual-core ARM Cortex-M0+ com clock de 133 MHz, 264 KB de SRAM e suporte nativo aos protocolos I²C, SPI e PWM, o que o torna adequado para aplicações embarcadas em tempo real. A programação foi realizada em linguagem C/C++, utilizando o SDK oficial do Raspberry Pi Pico (versão 1.5.1), no ambiente de desenvolvimento Visual Studio Code (versão 1.87). O sistema foi configurado para realizar leituras ambientais com frequência de 1 Hz (uma amostra por segundo), assegurando atualização contínua sem sobrecarregar o processamento.

Para a medição da temperatura, foi utilizado o sensor digital AHT10, cuja precisão é de $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ para temperatura e $\pm 2\%$ para umidade relativa⁴. Embora a umidade não seja explorada diretamente nesta versão do sistema, sua medição poderá ser utilizada em versões futuras para estimativas aproximadas da temperatura de bulbo úmido. O sensor opera via

protocolo I²C e foi alimentado com tensão de 3,3 V, com faixa operacional entre -40 °C e 85 °C, sendo apropriado para aplicações industriais.

Figura 2 - Sensor AHT10 utilizado no sistema



Fonte: Proesi, 2025

A interface do sistema foi desenvolvida em HTML e hospedada diretamente no microcontrolador. Ao conectar-se à rede Wi-Fi criada pelo dispositivo, o usuário é redirecionado automaticamente para uma página local de monitoramento, sem necessidade de conexão com a internet. Essa abordagem offline é estratégica para ambientes industriais isolados ou com restrições de rede.

O sistema foi projetado para emitir alertas visuais e sonoros ao detectar temperaturas superiores aos limites estabelecidos pela NR-15 para cada nível de esforço físico¹. Quando esses valores são excedidos, o LED de alerta é acionado e o buzzer emite sinal sonoro contínuo, permitindo resposta imediata por parte da equipe técnica. Essa lógica foi implementada com base nos limites da Tabela 1 da NR-15, mesmo que o cálculo completo do IBUTG não seja realizado.

Durante a fase experimental, o sistema foi submetido a testes em diferentes locais da Universidade Federal do Maranhão (UFMA), com o objetivo de verificar seu desempenho diante de variações térmicas naturais e simuladas. As unidades foram instaladas em ambientes com e sem ventilação direta, com incidência variada de calor e exposição à luz solar indireta. O protótipo permaneceu em operação por períodos de até quatro horas consecutivas em cada

cenário, permitindo a observação da resposta do sistema frente às flutuações térmicas típicas de ambientes internos industriais.

Não foi realizada calibração formal com sensores industriais certificados. No entanto, as leituras de temperatura apresentaram comportamento consistente com as variações ambientais percebidas in loco, sendo comparadas informalmente com termômetros analógicos disponíveis nos laboratórios e salas onde os testes ocorreram. O objetivo principal dos testes foi avaliar a capacidade do sistema de detectar mudanças relevantes de temperatura e acionar corretamente os mecanismos de alerta sonoro e visual conforme os parâmetros estabelecidos.

A Tabela 2 apresenta um resumo de leituras registradas durante um dos ciclos de teste, em que se observou o comportamento do sistema diante de condições simuladas de aumento de temperatura.

Tabela 2. Leituras de temperatura e resposta do sistema durante teste em ambiente da UFMA

Horário	Temperatura (°C)	Alerta Ativado
08:00	28,7	Não
10:00	31,2	Sim
11:30	33,0	Sim
13:00	30,8	Sim
15:00	29,1	Não

Fonte: Dados experimentais obtidos pelos autores durante os testes realizados na UFMA (2025).

A interface web utilizada no sistema foi projetada com foco na simplicidade e objetividade, exibindo a temperatura ambiente em tempo real, o status de risco térmico e um histórico visual básico de registros recentes. A Figura 3 apresenta a visualização da interface acessada pelos dispositivos móveis durante os testes.

Figura 3. Interface web local exibida durante os testes experimentais



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Apesar de monitorar exclusivamente a temperatura de bulbo seco (T_{db}), o sistema demonstrou ser eficaz na detecção de condições críticas que exigem intervenção, especialmente em ambientes fechados ou com baixa exposição à radiação térmica. Como limitações, destaca-se a ausência dos sensores necessários para o cálculo completo do IBUTG, como a temperatura de globo (T_g) e a de bulbo úmido (T_{nwb}), o que restringe sua aplicação em ambientes externos ou com forte radiação solar.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os testes realizados com o sistema embarcado desenvolvido demonstraram resultados satisfatórios quanto à sua capacidade de monitoramento térmico em tempo real. O protótipo foi submetido a avaliações em ambientes simulados com variações térmicas reais, como salas da Universidade Federal do Maranhão (UFMA), onde foi mantido em operação por períodos contínuos de até quatro horas. Durante esse período, o sistema registrou corretamente os valores de temperatura ambiente e reagiu de forma imediata sempre que os limites críticos foram atingidos, conforme os parâmetros definidos com base na Norma Regulamentadora nº 15 (NR-15).

O sistema apresentou 100% de eficiência na emissão de alertas visuais e sonoros nas situações em que a temperatura ultrapassou os limiares de risco estabelecidos para diferentes

níveis de esforço físico. Essa resposta automática e precisa reforça a confiabilidade da proposta como ferramenta preventiva contra a exposição ao calor em ambientes de trabalho. Ao detectar temperaturas correspondentes às faixas de atenção para trabalhos classificados como leves, moderados ou pesados, o sistema ativou as notificações de pausa ou advertência conforme recomendado pela norma, contribuindo diretamente para a segurança dos trabalhadores.

Apesar da eficácia observada nos testes, o sistema apresenta algumas limitações. A principal delas é a ausência de sensores específicos para a medição da temperatura de bulbo úmido (T_{nwb}) e de globo (T_g), o que inviabiliza o cálculo completo do Índice de Bulbo Úmido Termômetro de Globo (IBUTG) em ambientes com incidência de radiação térmica direta. Dessa forma, a proposta atual é indicada prioritariamente para ambientes internos, noturnos ou com carga térmica predominantemente convectiva, nos quais a leitura da temperatura de bulbo seco (T_{db}) é suficiente para indicar condições críticas de exposição.

Outra limitação refere-se ao fato de que os sensores utilizados não são classificados como industriais, o que restringe sua aplicação imediata em ambientes de risco elevado sem uma validação prévia em campo. Além disso, a versão atual do sistema não possui armazenamento histórico dos dados nem comunicação com plataformas externas de análise, o que limita sua utilização em estratégias de gestão integrada da segurança ocupacional.

Apesar dessas limitações, os resultados indicam que o sistema possui elevado potencial de aplicação prática em pequenas e médias indústrias metalúrgicas. Seu baixo custo, facilidade de instalação e operação offline permitem sua adoção em locais com infraestrutura limitada, funcionando como uma solução auxiliar de monitoramento ambiental térmico. A interface web embarcada demonstrou desempenho estável, com atualização contínua dos dados e visualização clara das informações térmicas, permitindo aos usuários ajustes operacionais imediatos conforme as condições do ambiente.

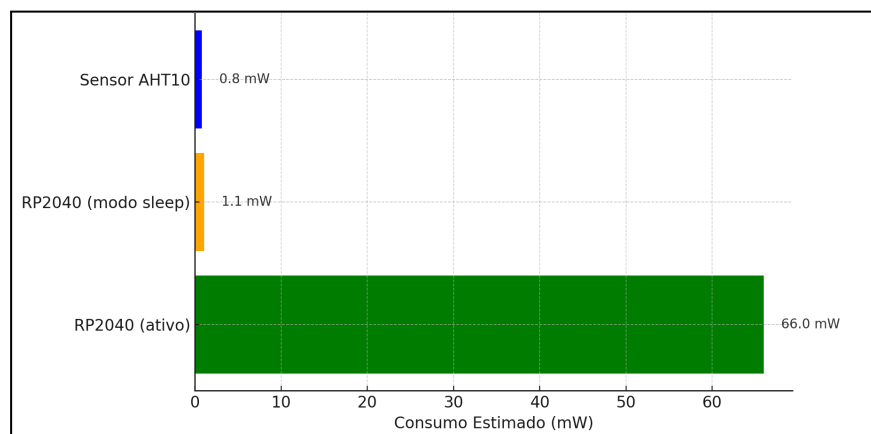
A eficiência do sistema, medida pela taxa de acerto nos alertas emitidos, foi de 100% durante os testes, considerando as condições simuladas e os parâmetros programados. Esse desempenho, aliado à simplicidade da arquitetura embarcada, reforça sua aplicabilidade como tecnologia de apoio ao cumprimento das exigências da NR-15 e à promoção de ambientes de trabalho mais seguros.

Além da funcionalidade básica de monitoramento e alarme, a estrutura modular do sistema permite integração com diversos sensores e atuadores, ampliando suas aplicações em diferentes setores industriais. A possibilidade de incorporar sensores de gás, presença ou ruído exemplifica essa versatilidade, alinhando o projeto às diretrizes da Indústria 4.0, que valoriza sistemas conectados, adaptáveis e orientados por dados.

Durante os testes, também se observou boa aceitação dos usuários em relação à interface do sistema. Mesmo operadores com pouca familiaridade digital conseguiram utilizá-lo de forma intuitiva, o que reforça seu potencial como ferramenta de inclusão tecnológica e conscientização sobre riscos térmicos no ambiente de trabalho.

No que diz respeito à eficiência energética, o sistema mostrou-se adequado para uso em locais com infraestrutura elétrica limitada. O microcontrolador RP2040 apresentou consumo de cerca de 66 mW em operação ativa e 1,1 mW em modo sleep, enquanto o sensor AHT10 consumiu aproximadamente 0,8 mW. Esses dados, apresentados no Gráfico 1, evidenciam o baixo consumo da solução, reforçando seu caráter sustentável e sua viabilidade para operação contínua.

Gráfico 1. Consumo energético estimado dos principais componentes do sistema (em mW)



Fonte: Adaptado de dados técnicos de Raspberry Pi Foundation, TinyGo Docs e The Engineering Projects (2024).

Esse desempenho em eficiência energética reforça o alinhamento do sistema com os pilares da sustentabilidade e o torna uma solução viável em locais com recursos restritos, atendendo aos princípios de um crescimento tecnológico mais inclusivo e acessível.

CONCLUSÃO

O avanço tecnológico aplicado à segurança do trabalho, como apresentado neste estudo, evidencia o potencial transformador dos sistemas embarcados no enfrentamento de desafios estruturais em ambientes industriais com risco térmico. A solução proposta, baseada em um microcontrolador de arquitetura moderna, sensores de alta precisão e interface acessível, atende às exigências da Norma Regulamentadora nº 15 e antecipa demandas futuras relacionadas à digitalização dos processos produtivos e à proteção da saúde dos trabalhadores.

A integração entre tecnologia e sustentabilidade ficou evidente no desenvolvimento de um sistema de baixo consumo energético, com operação offline, custo reduzido e capacidade de replicação em contextos com infraestrutura limitada. Essa abordagem contribui de forma concreta para a democratização do acesso à inovação, especialmente em pequenas e médias indústrias, que frequentemente enfrentam barreiras técnicas ou financeiras. A simplicidade de uso e a autonomia operacional também favorecem sua adoção por equipes com diferentes níveis de familiaridade tecnológica, promovendo um crescimento mais inclusivo e alinhado aos princípios de justiça social e ambiental.

Embora a inteligência artificial ainda não esteja incorporada ao sistema atual, a previsão de integração futura com algoritmos de análise preditiva e plataformas analíticas abre espaço para estratégias mais sofisticadas de prevenção. O monitoramento térmico, hoje reativo, poderá evoluir para um modelo preditivo e autônomo, baseado em aprendizagem contínua, antecipação de padrões de risco e respostas inteligentes em tempo real.

Ao considerar a sustentabilidade não apenas como aspecto ambiental, mas como princípio orientador de inclusão, eficiência e responsabilidade social, o projeto reafirma o papel da tecnologia como vetor de transformação do mundo do trabalho. A aliança entre inovação, acessibilidade e conformidade técnica demonstra que é possível desenvolver soluções eficazes e acessíveis, capazes de gerar impacto social positivo. Dessa forma, o estudo conclui que a aplicação estratégica de sistemas embarcados na segurança ocupacional é não apenas viável, mas necessária, especialmente quando orientada pelos pilares contemporâneos de tecnologia com propósito, inteligência com ética e sustentabilidade com inclusão.

REFERÊNCIAS

- [1] BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR-15 – Atividades e Operações Insalubres. Anexo 3: Limites de Tolerância para Exposição ao Calor.** Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/inspecao-do-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-15>. Acesso em: 15 jul. 2025.
- [2] EMBARCADOS. **BitDogLab: uma jornada educativa com eletrônica embarcada e IA.** Disponível em: <https://embarcados.com.br/bitdoglab-uma-jornada-educativa-com-eletronica-embarcados-e-ia/>. Acesso em: 22 jul. 2025.
- [3] EMERSON, Luiz Teixeira et al. **Comorbidades e saúde mental dos trabalhadores da saúde no Brasil: o impacto da pandemia da COVID-19.** *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 28, n. 10, p. 2823–2832, out. 2023.
- [4] LIMA, Renato Sousa; SANTOS, Vagner Bezerra dos; GUERREIRO, Thiago Brito; ARAÚJO, Mário César Ugulino de. **Um sistema microcontrolado para o monitoramento on-line, in situ e remoto de pH, condutividade e temperatura de águas.** *Química Nova*, v. 34, n. 1, p. 135–139, 2011. DOI: 10.5935/0100-4042.20110021.
- [5] PEREIRA, Jucilene Arcâncio; ARAÚJO, Glaucio Luciano. **O impacto da temperatura do ambiente de trabalho sobre a produtividade dos colaboradores em uma fábrica de embalagens.** Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.
- [6] PROESI. **AHT10 – Módulo sensor de temperatura e umidade de alta precisão.** Disponível em: <https://www.proesi.com.br/aht10-modulo-sensor-de-temperatura-e-umidade-de-alta-precis-o>. Acesso em: 15 jul. 2025.
- [7] QUESADA, Ricardo Carvalho. **Controle e automação de processos industriais.** Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017. 176 p. ISBN 978-85-8482-820-3.
- [8] RASPBERRY PI FOUNDATION. **RP2040 Microcontroller Datasheet.** Cambridge, UK: Raspberry Pi Ltd., 2024. Disponível em:

<https://www.raspberrypi.com/documentation/microcontrollers/rp2040.html>. Acesso em: 23 jul. 2025.

[9] SEPPÄNEN, Olli; FISK, William J.; LEI, QH. **Effect of temperature on task performance in office environment**. *Indoor Air*, v. 27, p. 690–702, 2017. DOI: 10.1111/ina.12352.

[10] THE ENGINEERING PROJECTS. **AHT10 – High Precision Digital Temperature and Humidity Measurement Module**. 2024. Disponível em: <https://www.theengineeringprojects.com/2025/01/aht10-high-precision-digital-temperature-and-humidity-measurement-module.html>. Acesso em: 23 jul. 2025.

[11] TINYGO. **Low power support**. *TinyGo Documentation*, 2024. Disponível em: <https://tinygo.org/docs/concepts/low-power/>. Acesso em: 23 jul. 2025.

[12] YANG, Bin; CHANG, Victor Wei-Chung; et al. **Thermal comfort, perceived air quality and cognitive performance when personally controlled air movement is used by tropically acclimatized persons**. *Indoor Air*, v. 27, p. 690–702, 2016. DOI: 10.1111/ina.12352.