ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

# Sensor de temperatura e queda como suporte à prevenção de acidentes de trabalho na construção civil

## Temperature and fall sensor as support for preventing work accidents in civil construction

**Thales Henrique Castro de Barros**
UFPE | Recife | Brasil | thales.henrique@ufpe.br
**Bruna Brito Liberal**
UFPE | Recife | Brasil | bruna.liberal@ufpe.br
**Rachel Perez Palha**
UFPE | Recife | Brasil | rachel.palha@ufpe.br

**Resumo**

Com o advento da Indústria 4.0, diferentes setores têm se modernizado com o intuito de aumentar a produtividade e a segurança de seus processos. Dentro desse contexto, o presente trabalho propõe um capacete inteligente, capaz de indicar o não uso do equipamento de proteção individual (EPI) por parte do usuário, além de agregar informações adicionais como parâmetros ambientais e a detecção de quedas. O dispositivo foi desenvolvido, incorporando sensores de temperatura e umidade, além de um acelerômetro e um giroscópio, tornando-o capaz de avaliar o conforto térmico do usuário em tempo real, além de detectar, por exemplo, quedas resultantes de desmaios. Trata-se de uma importante contribuição para o setor, visto que o quantitativo de soluções baseadas na Internet das Coisas, paradigma da Indústria 4.0 que prevê a construção de dispositivos inteligentes interconectados, ainda é incipiente quando comparado a outros setores. A construção do protótipo é apresentada em conjunto com detalhes a respeito dos resultados obtidos nos primeiros testes, dos dispositivos utilizados e das possibilidades de personalização viáveis, bem como das limitações identificadas.

Palavras-chave: Internet das coisas. Automação na construção. Sensores. Segurança do trabalho.

**Abstract**

*With the advent of Industry 4.0, different sectors have been modernizing to increase the productivity and safety of their processes. Within this context, this paper proposes a smart helmet capable of indicating the non-use of personal protective equipment (PPE) by the user, in addition to aggregating additional information such as environmental parameters and fall detection. The device was developed incorporating temperature and humidity sensors, in addition to an accelerometer and a gyroscope, making it capable of assessing the user's thermal comfort in real time, in addition to detecting, for example, falls resulting from fainting. This is an important contribution to the sector, since the number of solutions based on the Internet of Things, a paradigm of Industry 4.0 that foresees the construction of interconnected smart devices, is still incipient when compared to other sectors. The construction of the prototype is*

Como citar:
CASTRO DE BARROS, T.; LIBERAL, B.; PALHA, R. Sensor de temperatura e queda como suporte à prevenção de acidentes de trabalho na construção civil. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

*presented together with details regarding the results obtained in the first tests, the devices used and the viable customization possibilities, as well as the limitations identified.*

*Keywords: Internet of things. Automation in Building. Sensors. Smart PPE.* Workplace safety.

## INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil, um dos mais tradicionais setores da economia, sempre foi um desafio do ponto de vista da segurança do trabalho [1]. Parte desse risco se deve à diversidade das atividades associadas a este setor, resultando na exposição contínua dos trabalhadores a diferentes tipos de riscos, como ruídos excessivos ou choques elétricos [1]. Embora alguns desses riscos sejam progressivamente mitigados em consequência do surgimento de novas tecnologias e implementação de legislações mais direcionadas à segurança do trabalhador [2], alguns tipos de riscos como quedas de nível tornam-se mais desafiadores diante da verticalização das construções.

A queda de nível, definida como queda de um indivíduo em decorrência de um desnível pré-existente [3], é um tipo de incidente tipicamente complexo e fatal, visto que pode ser resultado de diversos fatores, como rupturas de estruturas de sustentação ou desequilíbrios ocasionados por problemas médicos [4]. Por conta dessa multiplicidade, a elaboração de medidas unificadas com o intuito de eliminar todas as possíveis causas é inviável [4]. Como alternativa à impossibilidade de atuar sobre cada um desses fatores, medidas como a implementação de equipamentos de proteção individual e coletiva, como as linhas de vida já são definidos como obrigatórios pela legislação [3], [4].

Apesar da obrigatoriedade do uso de equipamentos como a linha de vida, a detecção de quedas é tema recorrente na literatura [5], visto que esse tipo de acidente continua ocorrendo, inclusive com uma parcela significativa podendo ser classificada como evitável [4]. Além disso, a detecção de quedas também apresenta grande relevância do ponto de vista da preservação da vida do operador, já que após o incidente, a velocidade da prestação de socorro pode ser o diferencial para a sobrevivência do acidentado [6].

Paralelamente, em um contexto de mudanças climáticas significativas, trabalhadores são expostos a temperaturas progressivamente mais altas, consolidando um importante tipo de risco físico, visto que promove o aumento da frequência de acidentes, incluindo possíveis quedas [7]. Além disso, o efeito dessas altas temperaturas pode ainda ser potencializado significativamente por exposição direta à radiação solar ou a um alto índice de umidade atmosférica, tendo como resultado a morte de trabalhadores em casos extremos [7], [8].

Especificamente a respeito da umidade, trata-se de um importante parâmetro, pois impacta diretamente na forma com a qual o corpo humano sente o estresse térmico causado por altas temperaturas [9]. Essa relação entre umidade e temperatura é chamada de sensação térmica e ocorre, pois, a umidade é capaz de contribuir ativamente para a desregulação metabólica dos indivíduos, reduzindo a taxa de evaporação da água, um dos principais mecanismos utilizados pelo organismo para reduzir a temperatura corporal e manter a homeostase [9].

Embora parâmetros ambientais sejam majoritariamente incontroláveis, as medições de grandezas físicas como temperatura e umidade podem constituir uma ferramenta

poderosa para o gerenciamento de recursos humanos e materiais. Tal gerenciamento pode otimizar os turnos de trabalho de forma a preservar a saúde do trabalhador, aumentando sua eficiência e evitando a perda de mão de obra qualificada. Objetivando viabilizar esse tipo de medição e, consequentemente, um mais eficiente gerenciamento de recursos humanos, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um capacete inteligente capaz de detectar quedas e medir em tempo real a sensação térmica a qual está exposto o trabalhador. Com essas funções a solução pretende se consolidar como uma importante ferramenta para o gerenciamento de recursos humanos durante a execução de projetos.

## REFERENCIAL TEÓRICO

### ACIDENTES DE TRABALHO

Um dos principais fatores causadores de acidentes graves e fatais é o trabalho em altura [3], que é aquele realizado com diferença de nível acima de dois metros do nível inferior, onde existe risco de queda. Especialmente na construção civil, os trabalhadores estão constantemente sujeitos a esse risco, tendo em vista a grande quantidade de construções verticais. Por conta desse contexto, EPIs voltados para mitigar a ocorrência de quedas são continuamente desenvolvidos, em especial os capacetes inteligentes (comumente referenciados como *smart helmets*) [10].

Em um dos estudos analidados, há a proposta de um capacete inteligente integrado a um conjunto de sensores e uma rede neural convolucional, com o intuito de detectar e analisar incidentes associados ao choque de objetos com o capacete [11]. Há também um estudo que combina tecnologia *bluetooth* com sensores, como acelerômetros e detectores de monóxido de carbono para mapear fatores de riscos associados ao local de trabalho [12]. Além disso, também utiliza uma análise da potência associada ao sinal transmitido pelos transceptores *bluetooth* para estimar a localização dos trabalhadores em relação aos andares da construção [12].

Paralelamente, um outro estudo propõe uma solução para um problema ainda mais básico associado à segurança do trabalho: o mal uso do EPI [13]. Dessa forma, utiliza-se de fotopletismografia para avaliar se o capacete está sendo utilizado corretamente pelo profissional [13]. Há também registros de uso para executar um mapeamento, porém com foco especificamente no uso de acelerômetro e giroscópio para coletar dados em tempo real, com o intuito de identificar padrões associados a quedas, caminhadas, corridas e outros tipos de possíveis deslocamentos [14].

### SENSAÇÃO TÉRMICA

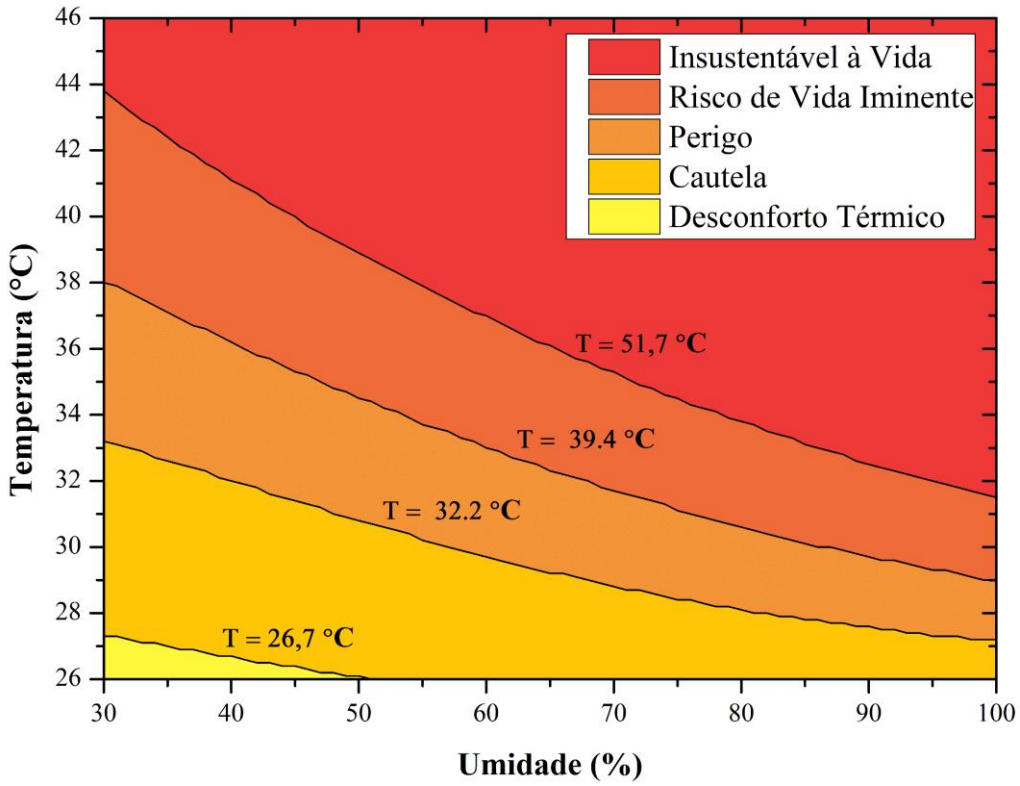
Há muitos estudos ligados aos índices de produtividade dentro da construção civil na literatura, porém nem sempre a sensação térmica é considerada ao analisar a produtividade dentro do canteiro de obras. O Índice de Desconforto Térmico [15] é um indicador fisiológico de estresse térmico que se baseia em como variáveis meteorológicas como temperatura do ar e umidade relativa afetam o conforto térmico

humano, como é mostrado na Figura 1. A partir do gráfico é possível observar as faixas de conforto térmico baseado na relação entre a temperatura e a umidade relativa do ar, indicando quais as sensações térmicas em cada uma das faixas. Em um país de escala continental como o Brasil, há diversas combinações de temperatura e umidade, e é necessário que haja um foco em desenvolver alternativas para promoção do conforto térmico laboral, tendo em vista que ondas de calor estão se tornando cada vez mais frequentes.

Esse aumento na frequência de altas temperaturas têm contribuído ativamente para a difusão de novos trabalhos na literatura focados no desenvolvimento de EPIs capazes de detectar situações de estresse térmico ou até mitigar seus efeitos. Há a proposta de um capacete na literatura com um termômetro infravermelho acoplado, capaz de medir a temperatura corporal do usuário sem contato físico [16]. Embora essa solução não meça a temperatura ambiental, a termografia corpórea mede a consequência direta desse estresse térmico sobre a fisiologia do trabalhador. Semelhantemente, um estudo também se utiliza da medição da temperatura corporal, mas para aumentar a efetividade desse tipo de medição na transdução do estresse térmico, se utiliza de um sensor para detectar a frequência cardíaca do trabalhador [17].

Do ponto de vista do sensoriamento ambiental, há a possibilidade de integrar em um capacete sensores de temperatura e umidade com o sensor termográfico infravermelho [18]. Entretanto, embora as medições de temperatura e umidade sejam realizadas em tempo real, essas informações foram utilizadas somente como fator de correção para as medidas obtidas a partir do termógrafo [18]. Também são realizadas medições ambientais em um dos estudos, mas sua proposta se baseia na integração de dois dispositivos inteligentes: o *smart helmet* e um cinto inteligente (*smart belt*) [19]. Os autores não apresentam uma correlação entre as medições de temperatura e umidade, em vez disso, a umidade é utilizada como parâmetro para determinar a qualidade do ar, enquanto a temperatura é avaliada separadamente [19].

**Figura 1: Sensação térmica a partir da relação entre temperatura e umidade.**




Fonte: Os autores (adaptado do Serviço Climático Americano [20]).

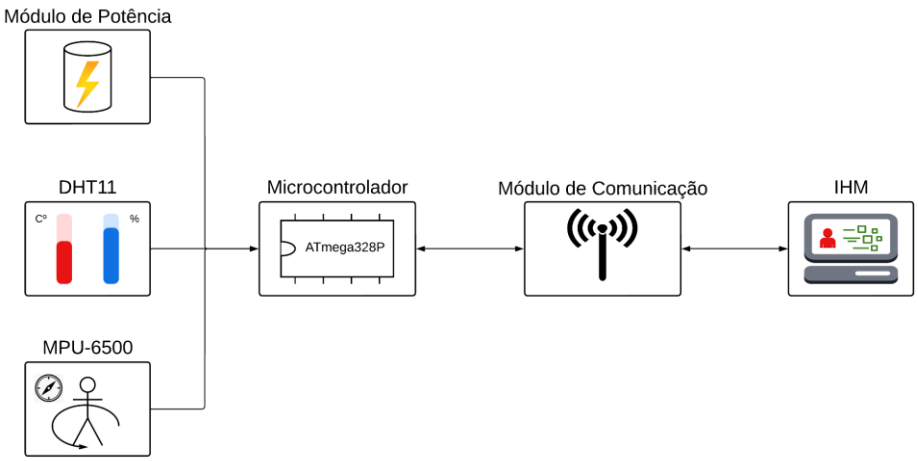
## MÉTODO

A construção do dispositivo proposto pode ser subdividida em duas etapas distintas: a definição do *hardware* utilizado e a construção da rotina através da programação deste *hardware*. Apesar dessa distinção, parte dessas etapas ocorreram concomitantemente devido às complexas relações de compatibilidade entre os componentes e o *software* utilizado. Por fim, após essas etapas foram realizados os testes individuais de cada componente e, posteriormente, o teste do dispositivo.

### DEFINIÇÃO DO HARDWARE

O *hardware* utilizado foi escolhido de acordo com a compatibilidade, mas a miniaturização do sistema também foi um parâmetro central no processo de tomada de decisão. O primeiro componente escolhido foi o microcontrolador, componente responsável pela leitura e processamento das informações. A definição desse primeiro elemento é um primeiro filtro para a escolha dos sensores posteriormente, visto que deve haver compatibilidade entre os níveis de tensão e a frequência de operação dos componentes. O diagrama de blocos do *hardware* utilizado está exibido na Figura 2, abaixo.

**Figura 2: Diagrama de blocos do hardware utilizado no estudo.**




Fonte: Os autores.

Conforme mostra a Figura 2, o microcontrolador escolhido foi o ATmega328P, um chip fabricado pela Microchip Technology Incorporated, conhecido pela alta performance, confiabilidade e baixo custo. Com o intuito de facilitar o processo de prototipação e aumentar a robustez da solução, a plataforma Arduino Pro Mini foi utilizada. Essa plataforma dispõe do ATmega328P já conectados a reguladores de tensão, pinos de entrada e saída e osciladores a cristal, dispensando o projeto desses componentes e a montagem desse circuito. Além disso, a plataforma também viabiliza a programação por uma interface de desenvolvimento própria, facilitando o processo de programação. Uma vez definido o microcontrolador, a partir de seus parâmetros operacionais, torna-se possível definir o conjunto de sensores que serão utilizados para a detecção de queda e a medição da sensação térmica.
A sensação térmica, por não se tratar de uma grandeza física que pode ser medida diretamente, é definida a partir da medição da temperatura e da umidade. Priorizando a miniaturização do sistema, o sensor DHT11 foi escolhido, pois trata-se de um sensor capaz de medir a temperatura e a umidade simultaneamente.

Com o intuito de viabilizar a detecção de quedas, a estratégia adotada foi a correlação entre um giroscópio e um acelerômetro. A integração desses sistemas permite um maior grau de efetividade na caracterização de um incidente como queda, evitando falsos positivos. Seguindo uma estratégia semelhante àquela utilizada na escolha do DHT11, o módulo MPU-6500 foi escolhido, visto que concentra em uma única placa um acelerômetro e um giroscópio, ambos de tri-axiais.

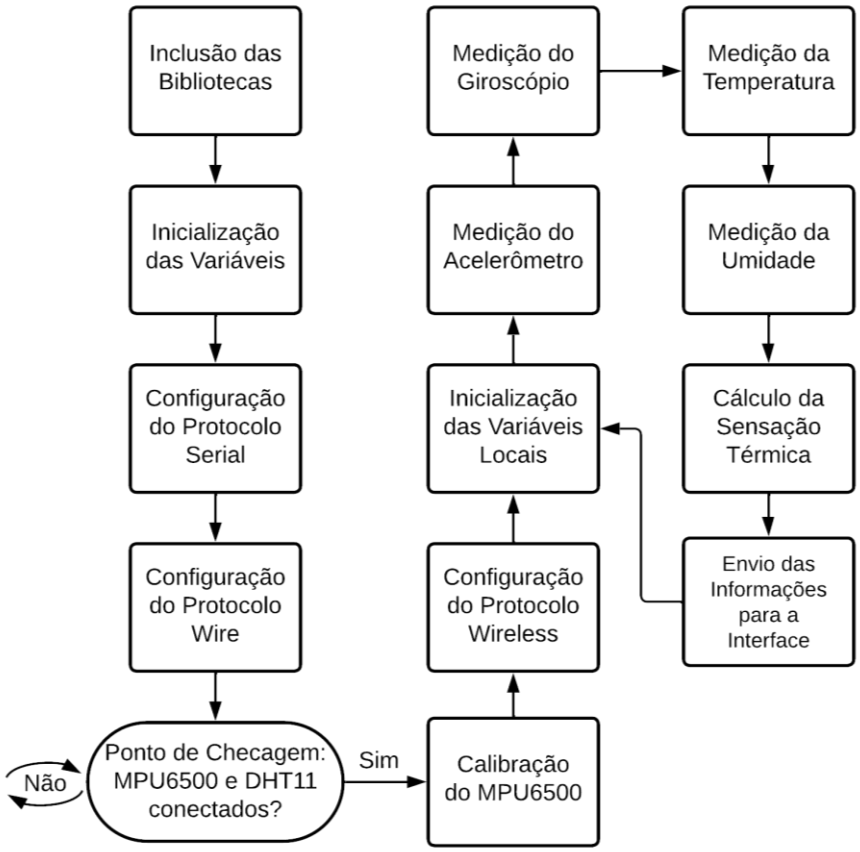
Por fim, conforme também mostrado na Figura 2, o sistema conta ainda com outros dois módulos de suporte. O primeiro deles é o módulo de potência, composto por uma bateria de íon-lítio com capacidade de 3600 mAh e o circuito TP4056 para carregamento, gerenciamento e proteção de carga. O conjunto foi escolhido priorizando a autonomia de todo o sistema sem penalizar o conforto, tendo em vista que tipicamente o módulo de potência é o maior contribuinte para o aumento do peso do artefato.

O segundo módulo é o responsável pela intercomunicação do dispositivo com a interface homem-máquina (IHM), responsável pelo armazenamento e disponibilização das medidas. Durante os testes foram utilizados transceptores *wireless* NRF24L01, devido ao baixo custo, consumo de energia e grande alcance. Testes complementares utilizando tecnologias também foram realizados como por exemplo transceptores *long range* (*LoRa*) de 433 MHz, permitindo alcances ainda maiores mesmo em ambientes repletos de obstáculos. Ainda assim, devido ao custo mais baixo e a efetividade satisfatória para aplicações mais usuais, o NRF24L01 foi escolhido como a tecnologia padrão.

CONSTRUÇÃO DO ALGORITMO

Uma vez definido os componentes do sistema, tem-se início a programação do ATmega328P. Esse processo é o responsável por efetivamente definir as rotinas de aquisição de dados e o processamento das informações adquiridas. Além disso, nesse algoritmo também são executadas verificações com o intuito de corrigir localmente possíveis erros. Todo o algoritmo está representado no diagrama de blocos da Figura 3.

**Figura 3: Diagrama de funcionamento do algoritmo.**




Fonte: Os autores.

A primeira etapa do algoritmo é a importação de bibliotecas, conjunto de rotinas pré-programadas pelos fabricantes dos dispositivos utilizados, como o DHT11. Esses arquivos são compilados uma única vez durante a configuração do microcontrolador e viabilizam a comunicação entre os sensores, o arduino e o módulo de comunicação. Após essa importação, as variáveis necessárias são inicializadas, alocando espaço físico na memória do microcontrolador para guardar as informações necessárias para seu funcionamento e os dados enviados ou recebidos pelos demais dispositivos. Em seguida, o *software* configura os protocolos de comunicação, estabelecendo os parâmetros utilizados nas trocas de informações que chegam e saem da unidade central de processamento.

Os dois primeiros protocolos de comunicação configurados são o "*seria*l" e o "*wire*", onde o primeiro modula a troca de informações via barramento serial e o segundo permite a comunicação interdispositivo por ligação física, isto é, fios condutores. Embora não seja fundamental para o seu funcionamento, o protocolo *serial* foi mantido visto que, sem um grande custo computacional, ele é capaz de viabilizar o envio rápido de dados para um computador, permitindo agilidade em um eventual ajuste ou configuração futura.

Antes da execução das medições, uma rotina adicional de checagem foi inserida no algoritmo, sinalizando para o usuário caso algum dos sensores esteja indisponível. A inclusão dessa rotina facilita a detecção de possíveis falhas, indicando exatamente qual módulo defeituoso. Após esses primeiros passos, tem-se início os processos de medição. Inicialmente, o MPU6500 é calibrado de forma que seja definido seu posicionamento de referência. Esse procedimento deve ser realizado com o capacete apoiado em uma superfície plana e estável e pode ser repetido livremente caso o usuário assim deseje.

Com o MPU6500 calibrado, o sistema configura o último protocolo de comunicação, viabilizando o envio de dados via rede *wireless* e inicia o processo de medição. Para efetuar essas medições, novos espaços físicos são alocados na memória do dispositivo (variáveis locais), em seguida, são recolhidas as informações enviadas pelos sensores e, por fim, os dados são disponibilizados nas interfaces disponíveis. Vale salientar que as etapas referentes as medições constituem uma estrutura de *loop* sendo executado continuamente, enquanto o dispositivo permanecer ligado.

Após a montagem do sensor e a execução dos primeiros testes com o intuito de assegurar a confiabilidade de todas as conexões, fixação do dispositivo e o funcionamento dos protocolos de comunicação, uma segunda rodada de testes foi executada. Essa segunda etapa apresentou um intuito mais funcional e foi inicializada pela medição dos parâmetros ambientais. O intervalo de medição para essa etapa foi de aproximadamente 24 horas.

Para realização das medições envolvendo detecção de queda, o protótipo foi largado diversas vezes de uma altura média de 2,5 metros. Os valores obtidos foram

sincronizados a partir do relógio interno do microcontrolador e, em seguida, foi realizada a média aritmética dos valores, ponto a ponto. Ao todo, o sistema apresenta seis variáveis, sendo três delas referentes à medição da aceleração e três delas à medição da velocidade angular nos eixos cartesianos. Para simplificar o processamento dos dados, foi inserido na programação uma rotina capaz de calcular os valores resultantes dessas grandezas, reduzindo de seis para duas variáveis. A Equação 01 foi a expressão utilizada para esse cálculo.

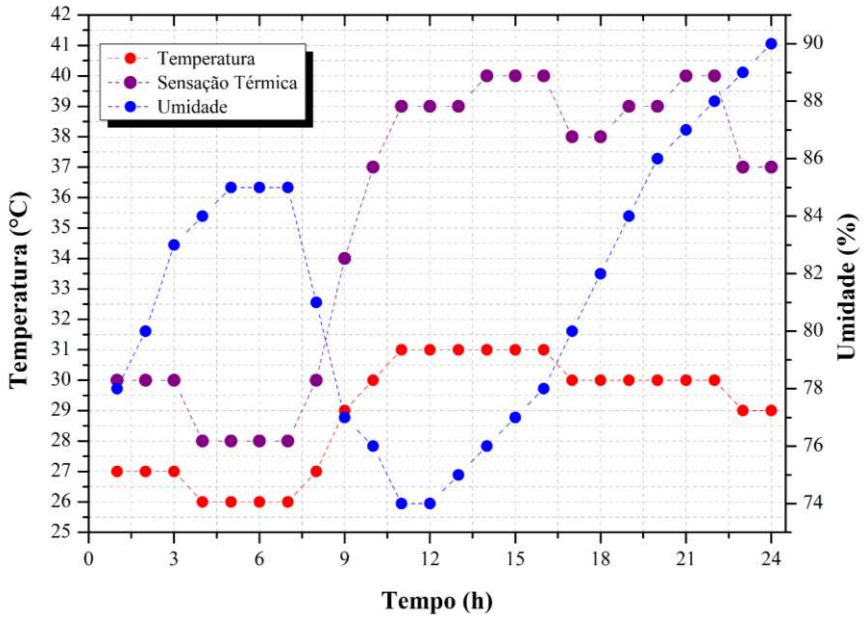
$$K_R = \sqrt{(k_X)^2 + (k_y)^2 + (k_Z)^2} \qquad \text{Eq. 01}$$

onde $K_R$ e $k_X$, $k_Y$ e $k_Z$ representam o valor resultante da grandeza avaliada e suas componentes, respectivamente.

## RESULTADOS

Com a execução das medições, conforme previamente descrito, foi obtido inicialmente o registro dos parâmetros ambientais durante todo o intervalo de medição (≈24 horas). Essas informações estão dispostas na Figura 4 e buscam simular as medições em um sítio de construção, embora em aplicações práticas o intervalo de medição seja correspondente a duração dos turnos de trabalho.

**Figura 4: Medições de temperatura e umidade e cálculo da sensação térmica a partir desses parâmetros.**




Fonte: Os autores.

A partir dos valores sensoriados, representados pelas curvas azul e vermelha na Figura 4, o sistema também calculou em tempo real a sensação térmica, também exibida no mesmo gráfico. Embora a frequência de medição tenha sido de aproximadamente uma medição por hora, essa velocidade não é um limitante, sendo escolhida, pois permite a comparação dos valores experimentais com valores de referências. Por sua vez, esses valores de referência foram obtidos por consultas à bancos de dados climatológicos que comumente são disponibilizados hora após hora. O desvio médio em relação as

medições de referência foi de cerca de ± 0,5 °C para o sensor de temperatura e ± 1% para o sensor de umidade.

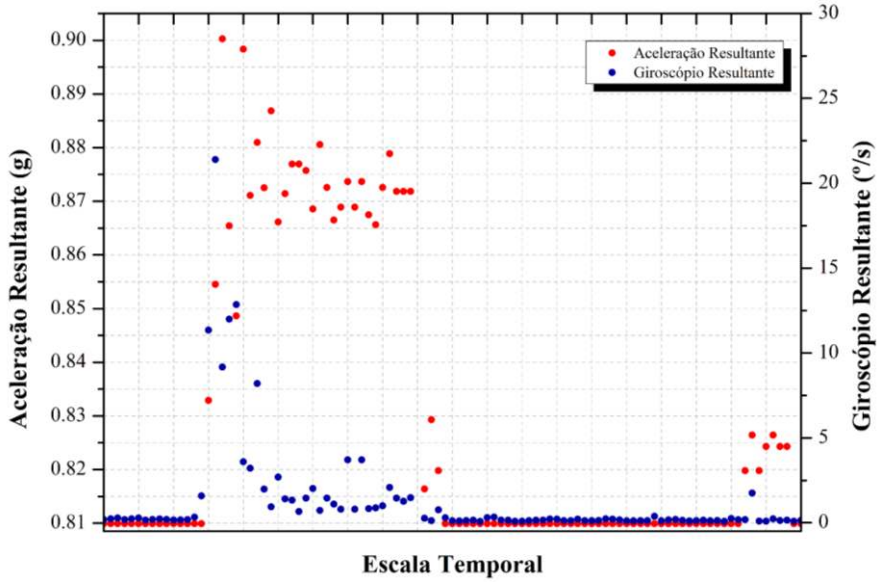
Além disso, vale ressaltar que o tempo mínimo de ciclo, definido como o menor intervalo de tempo que o sistema pode executar completamente sua rotina de medição, é cerca de 30 milissegundos. Dessa forma, o usuário tem a possibilidade de personalizar o intervalo de medição para qualquer valor superior a esse limite, podendo realizar ajustes considerando a disponibilidade de um banco de dados, por exemplo. Embora parâmetros como temperatura e umidade não variem tão abruptamente em condições ambientais usuais, considerar esse limite é especialmente importante na detecção de quedas, tendo em vista que ele pode delimitar a resolução espacial do dispositivo, conforme a Equação 02.

$$\Delta h = v_o t + \frac{gt^2}{2} \qquad \text{Eq. 02}$$

onde $\Delta h$ representa o desnível entre as alturas de início e fim da queda, $v_0$ representa a velocidade vertical do corpo no início da queda, $g$ a gravidade terrestre e $t$ o tempo total decorrido entre o início e fim da queda. Sem perda de generalidade, pode-se considerar que não há componentes verticais da velocidade no início da queda ($v_0 = 0$) e que a gravidade terrestre é de aproximadamente 9,81 m/s². Dessa forma, ao aplicar o tempo mínimo de ciclo na equação, chega-se a uma resolução espacial inferior a um centímetro, evidenciando que a duração dos ciclos de medição não limita a utilização do dispositivo para a aplicação proposta.

A Figura 5 exibe os dados obtidos mediante a queda livre do protótipo. Embora esse experimento seja um bom indicativo da disponibilidade do dispositivo, novos experimentos realizados a fim de avaliar o comportamento do dispositivo mediante quedas em condições diversas, como diferentes alturas.

**Figura 5: Medições da aceleração resultante e da velocidade angular resultante do protótipo em queda.**




Fonte: Os autores.

Ao avaliar o gráfico da Figura 5, é possível constatar que há uma súbita variação nos parâmetros sensoriados a partir do início da queda livre. Especificamente a respeito dos valores referentes à aceleração resultante, vale ressaltar que ela se apresenta menor que o valor teórico esperado (correspondente à gravidade terrestre). Essa diferença não impacta significativamente na operação do dispositivo, tendo em vista que a resolução do sensor é suficientemente alta para detectar a diferença entre os valores encontrados. A partir do mesmo gráfico, também é possível verificar que o módulo giroscópio atua de forma complementar, servindo como marca passo para o início da queda.

DISCUSSÕES COMPLEMENTARES

Em decorrência da flexibilidade da plataforma adotada, o algoritmo também dispõe de suporte a inúmeras modificações, promovendo um alto grau de personalização. Essa capacidade torna possível a adaptação do sistema para quaisquer tipos de projetos e necessidades sem grandes alterações físicas. Um bom exemplo desse tipo de versatilidade é a capacidade de gerenciar o uso do EPI através dos dados obtidos a partir da MPU-6500, pois, uma vez que permite identificar o deslocamento do sistema, também é capaz de indicar se o capacete está sendo utilizado.

Ainda sobre o módulo MPU-6500, em testes preliminares foi verificada a capacidade de sensoriar vibrações mecânicas provindas de máquinas como martelos pneumáticos. Esse tipo de medida pode ser utilizado como ferramenta adicional para assegurar a segurança do trabalhador, tendo em vista que estresse mecânico por vibração ocupacional representa um importante fator de risco para danos severos à saúde do trabalhador.

Por fim, não foram encontrados na literatura, dispositivos semelhantes que apresentem a integração em tempo real dos dados obtidos de temperatura e umidade para executar avaliações sobre o estresse térmico vivenciado pelo usuário com detecção de queda. Por exemplo, trabalhos como [18] e [19] apresentam capacetes inteligentes com instrumentação semelhante, porém a umidade em ambos os casos é utilizada para propósitos diversos e não para avaliação do estresse térmico. Em contrapartida, os dispositivos encontrados que apresentaram a detecção de queda, por vezes se limitaram somente a detecção de temperatura do usuário, como [16] ou ainda utilizaram medidas diferentes como sensores de batimentos cardíacos [17].

## CONCLUSÃO

O presente trabalho propôs a automação dos capacetes utilizados como EPI pelos trabalhadores da construção civil. A solução apresentada incorpora conceitos de Internet das Coisas para agregar funcionalidades ao EPI, dando-o a capacidade de medir em tempo real a temperatura e umidade relativa do ar, permitindo que a sensação térmica possa ser calculada com precisão. Esse tipo de medida permite gerenciar o turno de trabalho de um indivíduo moderando sua exposição a situações de estresse térmico. Esse controle, por sua vez, objetiva mitigar possíveis danos à

saúde do trabalhador e a ocorrência de diversos tipos de acidente resultantes de sintomas comuns associados a esse tipo de estresse, como desmaios, tontura ou fraqueza muscular. Complementarmente, o sistema proposto também foi projetado para agregar a função de detecção de quedas, um dos principais tipos de risco associados à construção civil. Medidas complementares serão realizadas em trabalhos futuros com o intuito de dar continuidade aos testes, possibilitando otimizar a resposta do sensor.

## REFERÊNCIAS


[1] R. A. HASLAM *ET AL.*, "Contributing factors in construction accidents," *Applied ergonomics*, vol. 36, no. 4, pp. 401–415, 2005, doi: 10.1016/J.APERGO.2004.12.002.

[2] A. KARAKHAN, Y. XU, C. NNAJI, AND O. ALSAFFAR, "Technology Alternatives for Workplace Safety Risk Mitigation in Construction: Exploratory Study," *Advances in Informatics and Computing in Civil and Construction Engineering*, pp. 823–829, 2019, doi: 10.1007/978-3-030-00220-6_99.

[3] "Ministério da Previdência Social." https://www.gov.br/previdencia/pt-br (accessed Jul. 27, 2024).

[4] S. WINGE AND E. ALBRECHTSEN, "Accident types and barrier failures in the construction industry," *Safety Science*, vol. 105, pp. 158–166, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.SSCI.2018.02.006.

[5] Y. C. FANG AND R. J. DZENG, "Accelerometer-based fall-portent detection algorithm for construction tiling operation," *Automation in Construction*, vol. 84, pp. 214–230, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.AUTCON.2017.09.015.

[6] LOUI. MCCURLEY, "Falls from height : a guide to rescue planning," 2013.

[7] R. RAMEEZDEEN AND A. ELMUALIM, "The Impact of Heat Waves on Occurrence and Severity of Construction Accidents," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 14, no. 1, Jan. 2017, doi: 10.3390/IJERPH14010070.

[8] T. UMAR AND C. EGBU, "Heat stress, a hidden cause of accidents in construction," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Municipal Engineer*, vol. 173, no. 1, pp. 49–60, Feb. 2020, doi: 10.1680/JMUEN.18.00004.

[9] A. SOBOLEWSKI, M. MŁYNARCZYK, M. KONARSKA, AND J. BUGAJSKA, "The influence of air humidity on human heat stress in a hot environment," *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, vol. 27, no. 1, pp. 226–236, 2021, doi: 10.1080/10803548.2019.1699728.

[10] S. RASOULI, Y. ALIPOURI, AND S. CHAMANZAD, "Smart Personal Protective Equipment (PPE) for construction safety: A literature review," *Safety Science*, vol. 170, Feb. 2024, doi: 10.1016/J.SSCI.2023.106368.

[11] I. CAMPERO-JURADO, S. MÁRQUEZ-SÁNCHEZ, J. QUINTANAR-GÓMEZ, S. RODRÍGUEZ, AND J. M. CORCHADO, "Smart Helmet 5.0 for Industrial Internet of Things Using Artificial Intelligence," *Sensors 2020, Vol. 20, Page 6241*, vol. 20, no. 21, p. 6241, Nov. 2020, doi: 10.3390/S20216241.

[12] K.-B. SEO, S. D. MIN, S.-H. LEE, AND M. HONG, "Design and Implementation of Construction site Safety management System using Smart Helmet and BLE Beacons," *Journal of Internet Computing and Services*, vol. 20, no. 3, pp. 61–68, Jun. 2019, doi: 10.7472/JKSII.2019.20.3.61.

[13] J. H. KIM, B. W. JO, J. H. JO, Y. S. LEE, AND D. K. KIM, "Autonomous Detection System for Non-Hard-Hat Use at Construction Sites Using Sensor Technology," *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 1102*, vol. 13, no. 3, p. 1102, Jan. 2021, doi: 10.3390/SU13031102.

[14] M. YAN, H. YU, S. TANG, AND M. HE, "Design and Realization of Intelligent Safety Helmet Based on NB-IoT," *2021 IEEE 6th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing, ICSP 2021*, pp. 933–936, Apr. 2021, doi: 10.1109/ICSP51882.2021.9408761.

[15] E. C. THOM, "The Discomfort Index," *Weatherwise*, vol. 12, no. 2, pp. 57–61, Apr. 1959, doi: 10.1080/00431672.1959.9926960.

[16] H. ZHANG, X. YAN, H. LI, R. JIN, AND H. F. FU, "Real-Time Alarming, Monitoring, and Locating for Non-Hard-Hat Use in Construction," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 145, no. 3, p. 04019006, Mar. 2019, doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001629.

[17] D. FYFFE, C. LANGENDERFER, AND C. JOHNS, "The Smart Hard Hat," *Williams Honors College, Honors Research Projects*, Jan. 2016, Accessed: Jul. 27, 2024. [Online]. Available: https://ideaexchange.uakron.edu/honors_research_projects/267

[18] L. LI, J. YU, H. CHENG, AND M. PENG, "A Smart Helmet-Based PLS-BPNN Error Compensation Model for Infrared Body Temperature Measurement of Construction Workers during COVID-19," *Mathematics 2021, Vol. 9, Page 2808*, vol. 9, no. 21, p. 2808, Nov. 2021, doi: 10.3390/MATH9212808.

[19] S. M. SERGIO AND C. R. J. MANUEL, "Smart protective protection equipment for an accessible work environment and occupational hazard prevention," *Proceedings of the Confluence 2020 - 10th International Conference on Cloud Computing, Data Science and Engineering*, pp. 581–585, Jan. 2020, doi: 10.1109/CONFLUENCE47617.2020.9058188.

[20] N. N. W. S. US DEPARTMENT OF COMMERCE, "Peachtree City, GA".