

SISTEMA EXPERIMENTAL DE MONITORAMENTO GEORREFERENCIADO DA TEMPERATURA DE MASSA ASFÁLTICA COM VISUALIZAÇÃO EM MAPA DE CALOR

Guilherme Almeida Vieira da Silva, Jean Carlos Prado dos Santos, Luis Felipe de Miranda Barboza, Magdiel Natã Chaves, Fabio Rodrigo Milanez e Leonardo Yuji Ishizaki

RESUMO

O controle da temperatura da massa asfáltica é um fator predominante para a qualidade e a durabilidade dos pavimentos, sendo tradicionalmente realizado por medições pontuais e com limitada rastreabilidade espacial. Diante dessa limitação, este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema experimental para o monitoramento georreferenciado da temperatura da massa asfáltica, concebido como uma prova de conceito no contexto da Indústria 4.0. O objetivo do trabalho foi avaliar a viabilidade de integrar sensoriamento térmico, geolocalização baseada em redes Wi-Fi e visualização espacial dos dados. A metodologia adotada consistiu no uso de um microcontrolador ESP32 acoplado a um sensor infravermelho para aquisição da temperatura, com estimativa da posição geográfica por meio da Google Geolocation API. Os dados coletados foram transmitidos a um Raspberry Pi 4, no qual foi executado um código em Python para o processamento das informações e geração de mapas de calor, sendo a visualização realizada por meio de dashboards desenvolvidos no ambiente Node-RED. A validação do sistema ocorreu por meio de experimentos em bancada, cujos resultados evidenciaram margens de erro elevadas na estimativa da posição geográfica. Conclui-se que, embora a arquitetura proposta tenha se mostrado funcional, a viabilidade técnica do sistema está condicionada à redução do erro de geolocalização via Wi-Fi, indicando como trabalhos futuros o estudo de técnicas de mitigação desse erro.

Palavras-chave: monitoramento térmico; massa asfáltica; geolocalização via Wi-Fi; IoT; mapa de calor.

TÍTULO: Experimental System for Georeferenced Monitoring of Asphalt Mixture Temperature with Heat Map Visualization

ABSTRACT

Temperature control of asphalt mixtures is a predominant factor for pavement quality and durability and is traditionally performed through punctual measurements with limited spatial traceability. In view of this limitation, this paper presents the development of an experimental system for georeferenced monitoring of asphalt

mixture temperature, conceived as a proof of concept within the context of Industry 4.0. The objective of this study was to evaluate the feasibility of integrating thermal sensing, Wi-Fi-based geolocation, and spatial data visualization. The adopted methodology consisted of using an ESP32 microcontroller coupled with an infrared sensor for temperature acquisition, with geographic position estimation performed through the Google Geolocation API. The collected data were transmitted to a Raspberry Pi 4, where a Python-based application was executed for data processing and heat map generation, while data visualization was carried out through dashboards developed in the Node-RED environment. System validation was conducted through laboratory bench experiments, whose results revealed high error margins in geographic position estimation. It is concluded that, although the proposed architecture proved to be functional, the technical feasibility of the system is dependent on reducing the geolocation error associated with Wi-Fi-based positioning, indicating the need for mitigation techniques in future work.

Key words: thermal monitoring. asphalt mixture. Wi-Fi-based geolocation. IoT. heat map.

1 INTRODUÇÃO

O controle da massa asfáltica ao longo dos processos de transporte, lançamento e compactação constitui um fator determinante para a qualidade e a durabilidade dos pavimentos asfálticos. Variações térmicas inadequadas podem comprometer a facilidade de aplicação da mistura, a eficiência da compactação e o desempenho mecânico do revestimento, impactando diretamente sua vida útil (BERNUCCI et al., 2010; DNIT, 2006). Apesar de sua relevância, o monitoramento térmico da massa asfáltica ainda é, em muitos casos, realizado por meio de medições pontuais e manuais, com limitada rastreabilidade espacial, o que dificulta a análise contínua do processo e a tomada de decisões técnicas fundamentadas (KIM et al., 2018).

Com o avanço das tecnologias associadas à Indústria 4.0 e à Internet das Coisas (IoT), observa-se um crescente interesse no desenvolvimento de sistemas capazes de integrar sensoriamento, comunicação e processamento de dados para monitoramento inteligente de processos industriais e de infraestrutura. Nesse

contexto, a aplicação dessas tecnologias ao acompanhamento térmico da massa asfáltica apresenta-se como uma alternativa promissora, especialmente quando associada à geolocalização e à visualização espacial das informações coletadas.

Entretanto, soluções de monitoramento georreferenciado frequentemente dependem de sistemas de posicionamento dedicados, o que pode elevar os custos e limitar sua adoção em aplicações experimentais ou de baixo investimento. Assim, surge como problema de pesquisa a viabilidade de empregar técnicas de geolocalização baseadas em redes Wi-Fi para associar dados térmicos à posição geográfica. Nessa abordagem, a estimativa da posição é obtida pelo envio dos indicadores únicos BSSID e das intensidades de sinal RSSI dos pontos de acesso próximos à Google Geolocation API, que processa esses dados contra um banco de dados global para retornar coordenadas geográficas com precisão adequada e baixo custo de implementação (GOOGLE, 2026).

Diante deste cenário, o objetivo deste artigo é apresentar o desenvolvimento de um sistema experimental para o monitoramento georreferenciado da temperatura da massa asfáltica, concebido como uma prova de conceito. A proposta integra sensoriamento infravermelho, microcontrolador embarcado, processamento local e visualização dos dados em mapas de calor. Justifica-se a realização deste trabalho pela necessidade de investigar alternativas tecnológicas acessíveis para o monitoramento térmico georreferenciado, bem como de identificar limitações e desafios associados à estimativa de posição baseada em redes Wi-Fi, contribuindo para o avanço de pesquisas futuras nessa área.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A literatura técnica indica que a temperatura da massa asfáltica influencia diretamente a compactação e o desempenho do pavimento. De acordo com Roberts et al. (1996), desvios térmicos durante a aplicação podem resultar em aumento de porosidade, redução da densidade final e comprometimento da durabilidade do revestimento asfáltico. Além disso, Yoder e Witczak (1975) destacam que a

manutenção da faixa térmica adequada durante o transporte e a execução é essencial para garantir condições satisfatórias de aplicação da mistura. Nesse contexto, o monitoramento térmico adequado é apontado como um elemento fundamental para o controle da qualidade em obras de pavimentação.

2.1 Monitoramento térmico da massa asfáltica

Os métodos tradicionalmente empregados para o monitoramento da temperatura da massa asfáltica baseiam-se, em sua maioria, em medições pontuais realizadas por termômetros de contato ou sensores infravermelhos portáteis. Embora amplamente utilizados, esses métodos apresentam limitações quanto à frequência de coleta e à representatividade espacial dos dados, dificultando a análise contínua do comportamento da mistura ao longo do processo construtivo (ROBERTS et al., 1996; DNIT, 2006).

Estudos indicam que o monitoramento contínuo da temperatura da mistura asfáltica possibilita uma avaliação mais representativa das variações térmicas ao longo do processo construtivo, contribuindo para a identificação de regiões críticas e para o aprimoramento do controle de qualidade durante a execução do pavimento (ROBERTS et al., 1996; NAPA, 2015).

2.2 Georreferenciamento e representação espacial dos dados

O georreferenciamento consiste na associação de informações a uma posição geográfica específica, permitindo análises espaciais mais detalhadas. Em aplicações de engenharia, essa técnica viabiliza a correlação entre variáveis físicas e sua localização, favorecendo a identificação de padrões e anomalias ao longo da área monitorada (LONGLY et al., 2015).

A representação espacial dos dados por meio de mapas de calor tem sido amplamente utilizada para visualizar a distribuição de variáveis contínuas, como a temperatura. Segundo Burrough, McDonnell e Lloyd (2015), os mapas de calor são

ferramentas eficazes para visualização de padrões espaciais, auxiliando na identificação de regiões críticas e na avaliação da uniformidade dos processos.

Entretanto, a maioria das soluções de georreferenciamento emprega sistemas de posicionamento dedicados, como o Global Positioning System (GPS), os quais, apesar de apresentarem boa precisão, podem elevar os custos, o consumo energético e a complexidade dos sistemas, especialmente em aplicações experimentais ou de baixo investimento.

2.3 Computação em nuvem e serviços de geolocalização baseados em Wi-Fi

A computação em nuvem (*cloud computing*) é definida como um modelo de provisão de recursos computacionais sob demanda, permitindo acesso remoto a serviços de armazenamento, processamento e análise de dados por meio da internet (MELL; GRANCE, 2011). Esse paradigma tem viabilizado o desenvolvimento de aplicações distribuídas, nas quais dispositivos com recursos limitados delegam tarefas complexas a servidores remotos.

No contexto de geolocalização, a computação em nuvem possibilitou o surgimento de serviços capazes de estimar a posição geográfica de dispositivos sem a necessidade de receptores GPS. Esses serviços operam a partir da coleta de informações sobre redes Wi-Fi próximas, como identificadores únicos (Basic Service Set Identifier – BSSID) e intensidade do sinal (Received Signal Strength Indicator – RSSI), que são enviados a servidores remotos para processamento e comparação com bases de dados previamente construídas, permitindo a estimativa da posição do dispositivo (YOUSSEF; AGRAWALA, 2005; GOOGLE, 2026).

De acordo com a Google (2026), a Geolocation API realiza a estimativa da posição comparando os dados de rede Wi-Fi e torres de telefonia móvel recebidos com um banco de dados global mantido em seus datacenters, retornando coordenadas geográficas acompanhadas de um raio de precisão estimado. Essa abordagem permite a obtenção de informações de localização com baixo custo de

implementação e menor consumo energético, quando comparada a soluções baseadas exclusivamente em GPS.

Assim, o uso de serviços de geolocalização baseados em computação em nuvem representa uma alternativa viável para aplicações experimentais e protótipos, especialmente quando a simplicidade do sistema e a redução de custos são fatores relevantes.

2.4 Sistemas embarcados e plataformas de processamento para monitoramento distribuído

Sistemas embarcados são caracterizados pela integração de hardware e software dedicados à execução de funções específicas, frequentemente operando com restrições de energia, processamento e memória (NOERGAARD, 2013). Microcontroladores com conectividade sem fio integrada permitem a aquisição e transmissão de dados de sensores em tempo quase real.

Plataformas computacionais de placa única (*Single Board Computers - SBC*), como computadores de baixo consumo, têm sido empregadas para o processamento e visualização dos dados coletados. Segundo Upton e Halfacree (2016), essas plataformas possibilitam a integração entre dispositivos de campo, serviços em nuvem e interfaces de visualização, constituindo uma base tecnológica adequada para o desenvolvimento de sistemas experimentais alinhados aos conceitos da Indústria 4.0.

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se, quanto aos fins, como exploratória, pois busca avaliar a viabilidade térmica de um sistema experimental para o monitoramento georreferenciado da temperatura da massa asfáltica. Quanto aos meios, trata-se de uma pesquisa aplicada e experimental, baseada no desenvolvimento de um protótipo funcional e na realização de testes em ambiente controlado.

O estudo foi desenvolvido em ambiente acadêmico, tendo como unidade de análise um sistema experimental de monitoramento, composto por dispositivos embarcados, infraestrutura de comunicação e plataformas de processamento e visualização de dados. Não houve aplicação de questionários ou entrevistas, uma vez que o foco do trabalho esteve restrito à avaliação técnica da solução proposta.

Inicialmente, foi realizado um levantamento bibliográfico e técnico com o objetivo de compreender conceitos relacionados à computação em nuvem, serviços de geolocalização, sistemas embarcados e arquiteturas de monitoramento distribuído. Paralelamente, foram estudados frameworks e bibliotecas adequados ao desenvolvimento do código, bem como conceitos básicos sobre *Single Board Computers (SBCs)* e a linguagem Python, utilizada no processamento de dados.

A coleta de dados ocorreu por meio de experimentos em bancada, nos quais foi construído um protótipo utilizando um microcontrolador ESP32 acoplado a um sensor infravermelho para a aquisição da temperatura da massa asfáltica. A estimativa da posição geográfica foi realizada a partir da coleta de informações de rede Wi-Fi próximas, enviadas a um serviço de geolocalização em nuvem. Os dados obtidos foram transmitidos a um Raspberry Pi 4, no qual foi implementado, em linguagem *Python*, o processamento das informações e geração dos mapas de calor.

A visualização dos dados foi realizada por meio de dashboards desenvolvidos na plataforma Node-RED, possibilitando o acompanhamento gráfico e temporal das informações coletadas. A análise dos dados possui caráter quantitativo, sendo baseada na observação das variações térmicas e na avaliação dos desvios associados à estimativa da posição geográfica fornecida pelos serviços de geolocalização, conforme os resultados obtidos nos testes experimentais.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os experimentos realizados em bancada permitiram avaliar o desempenho do sistema experimental proposto para o monitoramento georreferenciado da

temperatura da massa asfáltica, conforme os objetivos definidos e a metodologia adotada. A análise dos resultados concentrou-se na estimativa da posição geográfica, na geração dos mapas de calor e na discussão de estratégias para mitigação dos erros de posicionamento observados.

4.1 Avaliação da estimativa de posição geográfica

A estimativa da posição geográfica foi realizada por meio de um serviço de geolocalização baseado em redes Wi-Fi, utilizando informações de pontos de acesso próximos. Nos testes iniciais, o sistema apresentou um raio de precisão estimado em aproximadamente 100 m, evidenciando limitações quanto à exatidão espacial da solução. Esse nível de erro mostrou-se elevado para aplicações que demandam maior precisão no georreferenciamento dos dados térmicos, impactando diretamente a fidelidade espacial das informações apresentadas.

Realizando ajustes no código, especialmente relacionados ao aumento do número de pontos de acesso Wi-Fi (Access Points – APs) enviados para processamento no serviço de geolocalização em nuvem, foi observada uma melhoria significativa na precisão estimada. Nessas condições, o raio de precisão passou a valores próximos de 20 m, indicando que a quantidade e a diversidade das informações fornecidas ao serviço de geolocalização influenciam diretamente a qualidade da posição estimada.

4.2 Geração e visualização dos mapas de calor

A partir das coordenadas geográficas estimadas e dos dados de temperatura coletados, foi realizado o processamento para a geração de mapas de calor no SBC, utilizando a linguagem Python. A integração com a plataforma Node-RED viabilizou a exibição dos resultados em dashboards para acompanhamento temporal. Entretanto, a análise visual dos mapas gerados no experimento revelou limitações significativas.

Devido à restrita área de deslocamento nos testes de bancada em comparação à margem de erro da geolocalização via Wi-Fi (mesmo após os ajustes de precisão), os mapas de calor resultantes apresentaram baixa definição espacial. As representações gráficas mostraram-se difusas, impossibilitando a distinção clara de gradientes térmicos ou a identificação precisa de pontos de variação de temperatura em curta distância. Na prática, a sobreposição dos pontos georreferenciados com incerteza posicional gerou "manchas" térmicas que não refletiram adequadamente a distribuição real da temperatura na pequena escala testada.

Essa constatação indica que a viabilidade prática da solução proposta é dependente da escala da aplicação. O sistema demonstraria maior eficácia e relevância técnica se aplicado ao monitoramento de obras de pavimentação linear de grande extensão (escala quilométrica). Nesse cenário, o deslocamento contínuo do equipamento ao longo de quilômetros de via superaria a magnitude do erro de geolocalização, permitindo que o mapa de calor representasse, com a devida clareza, o perfil térmico longitudinal do pavimento executado.

4.3 Abordagem de fusão de dados para mitigação do erro de posicionamento

Os resultados obtidos evidenciam que a estimativa de localização baseada em redes Wi-Fi, embora viável, apresenta limitações de precisão associadas à variabilidade dos sinais, à densidade de pontos de acesso (APs) e às características do ambiente. Diante dessas restrições, a literatura aponta a fusão de dados (*Data Fusion*) como uma estratégia promissora para aprimorar a acurácia dos sistemas de geolocalização baseados em software, sem a necessidade de alterações no hardware empregado (CHEN et al., 2015).

A abordagem de *Data Fusion* consiste na integração de múltiplas informações disponíveis no sistema, como a intensidade do sinal recebido (RSSI), dados temporais (*timestamp*) e informações contextuais relacionadas ao deslocamento do veículo. A utilização de dados temporais, por exemplo, permite correlacionar a posição estimada com o instante de saída do caminhão da usina e com o tempo

esperado de deslocamento, restringindo a área provável de localização e reduzindo incertezas espaciais (GREWAL; ANDREWS, 2014).

Outro aspecto amplamente discutido na literatura é o uso de filtros de Kalman para suavização das estimativas de posição fornecidas por APIs de geolocalização baseadas em Wi-Fi. Esses filtros permitem modelar a trajetória do objeto ao longo do tempo, reduzindo oscilações e inconsistências causadas por ruído nos sinais (GUSTAFSSON, 2010). No entanto, destaca-se que, no escopo deste trabalho, tais técnicas não foram implementadas, sendo consideradas como propostas para investigações futuras.

Estudos recentes também indicam a possibilidade de integração de técnicas de *Data Fusion* com métodos de aprendizado de máquina, visando explorar padrões espaciais e temporais dos sinais Wi-Fi para refinar ainda mais a estimativa de posição (LIU et al., 2023). Essas abordagens reforçam o potencial de evolução do sistema proposto, especialmente em aplicações que demandam maior precisão espacial.

Dessa forma, a aplicação de técnicas de fusão de dados, aliadas a filtros de Kalman e métodos inteligentes de processamento, configura-se como um caminho relevante para trabalhos futuros, podendo contribuir significativamente para a melhoria da precisão da localização em sistemas de monitoramento térmico georreferenciado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade de um sistema experimental de monitoramento térmico georreferenciado de baixo custo, empregando técnicas de geolocalização baseadas em redes Wi-Fi e processamento em nuvem, em substituição a sistemas de posicionamento dedicados. A metodologia adotada permitiu o desenvolvimento e a validação funcional da proposta, atendendo aos objetivos estabelecidos.

Os resultados evidenciaram que a geolocalização baseada em redes Wi-Fi é tecnicamente viável para aplicações experimentais, porém apresenta limitações

relevantes quanto à precisão espacial. Observou-se que a estimativa de posição sofre variações significativas, fortemente influenciadas pela quantidade e distribuição de pontos de acesso disponíveis no ambiente, o que resulta em um raio de incerteza elevado em determinados cenários. Ainda assim, verificou-se que o aumento do número de *Access Points* utilizados no processamento contribui para a redução desse erro, indicando caminhos para a melhoria da acurácia do sistema.

A implementação do mapa de calor em uma *Single Board Computer*, utilizando a linguagem Python, demonstrou ser adequada e compatível com aplicações embarcadas, reforçando o potencial de soluções simples, escaláveis e de baixo custo para monitoramento georreferenciado.

Diante das limitações identificadas, recomenda-se, como trabalhos futuros, a adoção de técnicas de fusão de dados para aprimorar a precisão da posição estimada. Nesse contexto, destaca-se a aplicação de filtro de Kalman como uma abordagem promissora para suavizar oscilações da geolocalização ao longo do tempo, integrando informações temporais e espaciais de forma mais consistente. Essa estratégia pode contribuir significativamente para a redução do erro de posicionamento, ampliando a confiabilidade do sistema em aplicações reais.

Conclui-se, portanto, que a solução proposta é funcional e apresenta potencial de evolução, especialmente com a incorporação de métodos avançados de processamento e filtragem de dados, consolidando-se como uma alternativa viável para sistemas de monitoramento georreferenciado de baixo custo.

REFERÊNCIAS

BERNUCCI, Liedi Légi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Carlos Pereira. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/0d316eee-ef3b-4fb0-bdf7-fbd2bc7b0863/Bernucci-2008-Pavimentacao%20asfaltica.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2026., 2008.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A.; LLOYD, C. D.; **Principles of Geographical Information Systems**. 3. ed. Oxford: Oxford University Press, 2015.

CHEN, Z.; ZOU, H.; JIANG, H.; ZHU, Q.; SOH, Y. C.; XIE, L. **Fusion of WiFi, smartphone sensors and landmarks using the Kalman filter for indoor localization.** Sensors, Basel, v. 15, n. 1, p. 715-732, 2015.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação.** 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2023.

GOOGLE. **Geolocation API documentation.** Mountain View, 2023. Disponível em: <https://developers.google.com/maps/documentation/geolocation>. Acesso em: 15 jan. 2026.

GREWAL, M. S.; ANDREWS, A. P.; **Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB.** 4. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2014.

GUSTAFSSON, F. **Statistical Sensor Fusion.** 2. ed. Lund: Studentlitteratur, 2010.

KIM, Minkyum; PHALTANE, Pranjal; MOHAMMAD, Louay N.; ELSEFI, Mostafa. **Temperature segregation and its impact on quality and performance of asphalt pavements.** Frontiers of Structural and Civil Engineering, v. 12, n. 4, p. 536 – 547, 2018.

LIU, R.; WANG, S.; ZHANG, J. **A Survey of WiFi-Based Indoor Positioning: Techniques, Challenges, and Future Trends.** IEEE Internet of Things Journal, v. 10, n. 4, p. 3450-3465, 2023.

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Geographic Information Science and Systems.** 4. ed. Hoboken: Wiley, 2015.

MELL, P.; GRANCE, T. **The NIST Definition of Cloud Computing.** NIST Special Publication 800-145, 2011.

NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (NAPA). **Best Practices for Temperature Management of Hot Mix Asphalt.** Lanham: NAPA, 2015.

NOERGAARD, T. **Embedded Systems Architecture.** Oxford: Elsevier, 2012.

ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R.; LEE, D. Y.; KENNEDY, T. W.; **Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction.** 2. ed. Lanham: NAPA Research and Education Foundation, 1996.

UPTON, E.; HALFACREE, G.; **Raspberry Pi User Guide.** 4. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2016.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W.; **Principles of Pavement Design.** 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1975.

YOUSSEF, Moustafa; AGRAWALA, Anil. **The Horus WLAN location determination system.** In: Proceedings of the 3rd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. New York: ACM, 2005. P. 205-218.



Esta obra está licenciada com Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.
[Recebido/Received: Abril 30, 2023; Aceito/Accepted: Agosto 29, 2023]