DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA EMBARCADO DE UM NÓ DE UMA REDE DE SENSORES SEM FIO PARA APLICAÇÕES EM RODOVIAS

Ayrton César Teixeira e Silva[1]

Mayssa Alves da Silva[2]

Ewaldo Eder Carvalho Santana[3]

Maria Teresinha de Medeiros Coelho[4]

Walter Canales Sant'Ana[5]

Marcelo Viana da Silva[6]

INTRODUÇÃO

A infraestrutura rodoviária é o pilar da logística de transportes de qualquer nação, mas sua durabilidade é constantemente desafiada por fatores ambientais e pelo tráfego intenso. No Brasil, a condição de conservação das rodovias exige a adoção de estratégias inovadoras para monitoramento e manutenção preventiva. Neste cenário, a integração de tecnologias de Internet das Coisas (IoT) e Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) emerge como uma solução fundamental para a instrumentação inteligente de estruturas viárias.

Uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) pode ser definida como um conjunto de dispositivos autônomos e interconectados, chamados nós sensores, que coletam dados ambientais, processam-nos e os transmitem para uma unidade central através de comunicação sem fio, podendo estar em zonas urbanas ou rodoviárias. Segundo Verdone et al. (2008), Akyildiz e Vuran (2010) e Yick, Mukherjee e Ghosh (2008), o baixo custo, a aquisição distribuída de dados e a eficiência energética caracterizam essas redes, tornando-as adequadas ao monitoramento contínuo e colaborativo de grandes áreas. A aplicação de RSSFs em cenários de monitoramento ambiental e infraestrutura permite a obtenção de informações locais confiáveis para apoiar processos de avaliação e tomada de decisão, mesmo em áreas extensas ou de difícil acesso (Al-Turjman, 2018; Keshtgari; Deljoo, 2012).

No contexto da pavimentação asfáltica, o monitoramento térmico é crucial. As rodovias brasileiras, majoritariamente compostas por pavimentos flexíveis, possuem camadas estruturais sobrepostas, incluindo base e revestimento asfáltico, responsáveis pela distribuição dos esforços do tráfego e pela resistência às ações ambientais (DNIT, 2006; Huang, 2004). O ligante asfáltico, sendo um material termoplástico, sofre redução de viscosidade em temperaturas elevadas, aumentando a suscetibilidade do pavimento a deformações plásticas permanentes, como os

1 Discente em Engenharia da Computação, Universidade Estadual do Maranhão (UEMA). Bolsista PIBIC/FAPEMA. E-mail: ayrton10teixeira@hotmail.com

2 Doutora em Engenharia Civil, Docente do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA). E-mail: mayssasousa@professor.uema.br

3 Ewaldo Eder Carvalho Santana. Docente do Departamento de Engenharia da Computação da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA). E-mail: ewaldoeder@gmail.com

4 Maria Teresinha de Medeiros Coelho. Docente do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA). E-mail: mariacoelho1@professor.uema.br

5 Walter Canales Sant'Ana. Docente do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA). E-mail: waltercanales@uema.br

6 Marcelo Viana da Silva. Doutorando, mestre e bacharel em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA). E-mail: marceloviana12@gmail.com

afundamentos de trilhas de roda. Albayati e Al.Ani (2021) destacam que altas temperaturas afetam diretamente o desempenho e a vida útil do asfalto, influenciando na taxa de deformação plástica. Além disso, a diferença de temperatura entre a superfície e as camadas mais profundas gera gradientes térmicos verticais que induzem tensões internas, acelerando processos de fadiga e fissuração. O monitoramento contínuo dessas variações é uma estratégia fundamental para validar modelos de previsão de desempenho e otimizar políticas de manutenção preditiva.

Os sistemas embarcados desempenham um papel central no monitoramento rodoviário. De acordo com Wolf (2012) e Heath (2017), esses sistemas são projetados para executar funções específicas com eficiência, confiabilidade e baixo consumo de energia. A implementação de um sistema embarcado em uma RSSF permite a obtenção de dados em tempo real, otimizando processos de manutenção estrutural e aumentando a segurança viária. Microcontroladores como o ESP32 são amplamente utilizados neste setor por oferecerem uma combinação ideal de baixo custo, poder de processamento dual-core e conectividade nativa Wi-Fi e Bluetooth, sendo ideais para a implementação autônoma de nós sensores inteligentes. O ESP32, em particular, suporta modos de economia de energia, como o *Deep Sleep*, que reduzem o consumo a menos de 10 μA, característica essencial para prolongar a autonomia de sistemas alimentados por bateria.

Para garantir a comunicação eficiente em extensos trechos rodoviários, a tecnologia LoRa (Long Range) apresenta-se como uma alternativa adequada por possibilitar comunicação sem fio de longo alcance e baixo consumo energético em aplicações de Internet das Coisas (Semtech Corporation, 2020). Diferentemente de padrões como Wi-Fi e Bluetooth, o LoRa opera em frequências sub-gigahertz, possibilitando transmissões de longo alcance (até 15 km em zonas rurais) com consumo energético reduzido. Essa característica é vital para a longevidade dos nós sensores alimentados por bateria, que constituem o projeto, uma vez que a restrição energética é uma das principais limitações das RSSFs (Gungor; Hancke, 2009). O uso da banda de 915 MHz, adotada neste trabalho, permite o alcance necessário para cobrir grandes áreas com poucos pontos de recepção.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver e validar experimentalmente um sistema embarcado para um nó sensor aplicado ao monitoramento térmico de pavimentos asfálticos, concentrando-se na arquitetura de hardware, no gerenciamento da aquisição de dados via protocolo 1-Wire e na estabilidade da comunicação LoRa em ambiente de campo.

METODOLOGIA

O desenvolvimento do sistema embarcado e a implementação do nó da rede de sensores sem fio (RSSF) foram conduzidos por meio de etapas sequenciais que garantiram a fundamentação teórica, a escolha otimizada dos componentes e a validação experimental.

Seleção e Caracterização dos Componentes

A escolha dos componentes foi baseada em requisitos de precisão, robustez térmica, eficiência energética e facilidade de integração em um sistema embarcado de baixo custo. O ESP32 foi selecionado como unidade de processamento por apresentar interfaces de comunicação integradas, capacidade de processamento adequada para aplicações embarcadas e suporte a modos de economia de energia, características compatíveis com sistemas de aquisição de dados em campo (Espressif Systems, 2024). O sensor DS18B20 foi escolhido devido à sua precisão, robustez em ambientes externos e comunicação digital pelo protocolo 1-Wire, características adequadas à integração de múltiplos pontos de medição em sistemas embarcados (Maxim Integrated, 2021).

O Quadro 1 detalha os componentes principais, suas funções e as justificativas técnicas para a escolha no projeto.

Quadro 1 – Especificação e Justificativa Técnica dos Componentes Embarcados

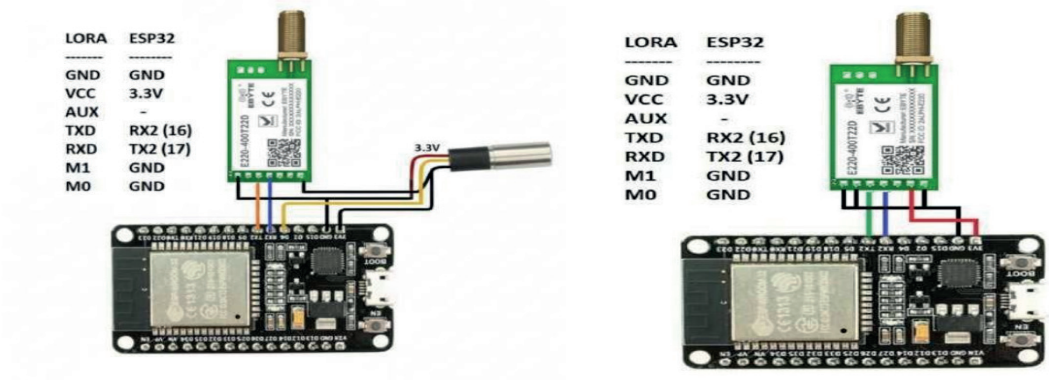
Componente	Função	Justificativa de Escolha
ESP32	Microcontrolador/Unidade de Processamento	Baixo custo, capacidade de processamento, conectividade Wi-Fi e suporte a modos de economia de energia (Espressif Systems, 2024).
DS18B20	Sensor Digital de Temperatura	Alta precisão, resolução configurável de até 12 bits, faixa de operação de -55 °C a +125 °C e comunicação 1-Wire (Maxim Integrated, 2021).
Módulo LoRa E220	Comunicação Sem Fio	Longo alcance (até 550 metros testados, potencial de 15 km) e baixo consumo energético.
Baterias Li-ion NCR18650B	Alimentação do Nó Transmissor	Alta capacidade energética e estabilidade operacional.

Fonte: Autores (2026).

Arquitetura de Hardware e Configuração LoRa

O sistema foi estruturado em dois módulos: Nó Transmissor e Nó Receptor. Ambos foram implementados utilizando microcontroladores ESP32 e módulos de comunicação LoRa E220 (Figura 1), configurados para operar no modo de Transmissão Fixa e Recepção, respectivamente.

Figura 1 – Conexão do módulo LoRa ao ESP32: a) nó transmissor; b) nó receptor.



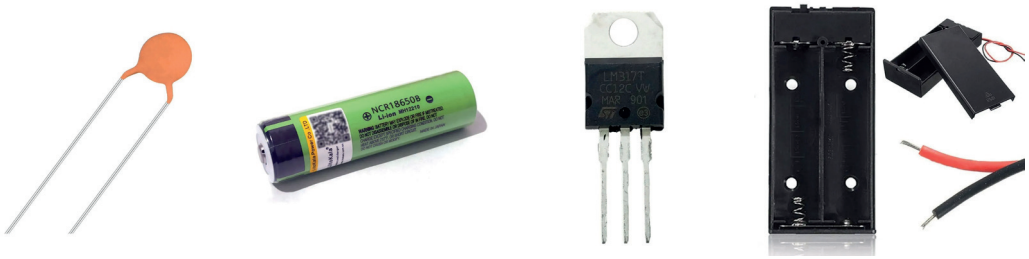
(a) (b)

Fonte: Autores (2026).

Alimentação Elétrica

Para a operação autônoma do Nó Transmissor em campo, implementou-se um sistema de alimentação baseado em duas baterias Li-ion modelo NCR18650B, cada uma com capacidade de 450 mAh. A tensão fornecida pelo conjunto foi estabilizada e condicionada por um circuito regulador de tensão linear, auxiliado por capacitores de filtragem, a fim de garantir a estabilidade elétrica do ESP32 e do módulo LoRa e mitigar a suscetibilidade a ruídos. O Nó Receptor, utilizado em bancada, foi alimentado via USB-C. Os principais componentes empregados no sistema de alimentação do nó transmissor estão apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Componentes do sistema de alimentação do nó transmissor:
a) case de suporte; b) capacitor; c) bateria NCR18650; d) regulador de tensão.



a) (b) (c) (d)

Fonte: Casa da Robótica.

Execução dos Ensaios em Bancada e em Campo

Os ensaios foram divididos em fases de laboratório (bancada) e campo. Os testes em bancada focaram na validação da lógica de programação do ESP32, na integração serial com o módulo LoRa e na leitura simultânea dos sensores DS18B20 via 1-Wire. Foi confirmada a correta aquisição, formatação e serialização dos dados em uma estrutura de *packet* antes da transmissão.

Campo Experimental 1

O primeiro campo experimental foi implantado no Campus Paulo VI da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA) com o objetivo de validar a instrumentação térmica básica do sistema. A estrutura física do protótipo foi construída com dimensões de 40 cm de largura e 60 cm de comprimento (Figura 3), apresentando uma configuração de camadas composta por 3 cm de espessura para a base e 5 cm para o revestimento asfáltico.

A instrumentação consistiu na instalação vertical de dois sensores digitais de temperatura DS18B20 posicionados em profundidades distintas: o primeiro inserido no corpo da camada de revestimento asfáltico e o segundo alocado na camada de base. O regime de aquisição de dados concentrou-se pontualmente no intervalo entre 13h e 15h, intervalo correspondente ao período de pico da irradiância solar e máximo estresse térmico do pavimento. Para garantir a densidade amostral necessária ao cálculo de médias diárias representativas, o nó transmissor realizou a leitura e o envio dos pacotes de dados de maneira contínua a cada 10 segundos.

Figura 3 – Construção do Campo Experimental 1 para instalação dos sensores de temperatura.



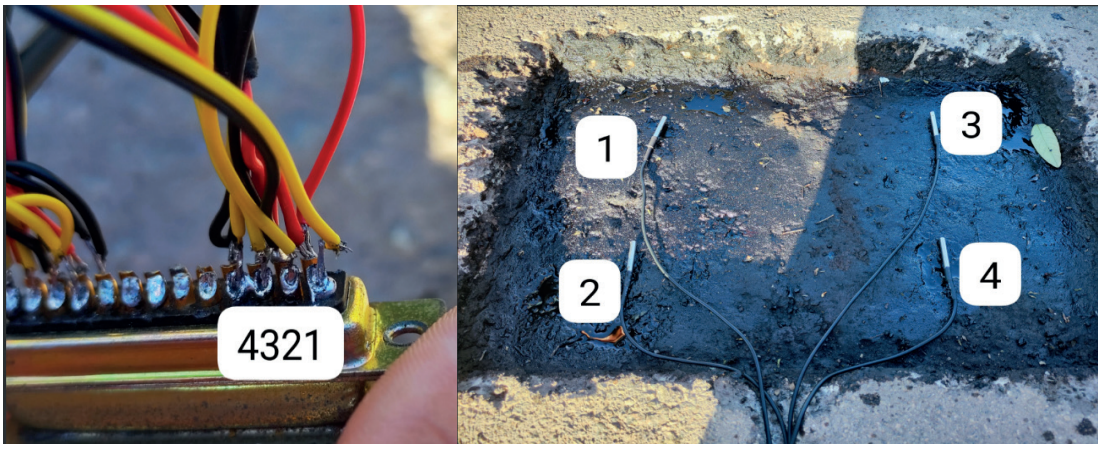
Fonte: Autores (2026).

Campo Experimental 2

O segundo campo experimental foi desenvolvido com o intuito de ampliar a capacidade de análise do sistema, permitindo o monitoramento espacial detalhado do gradiente térmico no pavimento. Mantendo as dimensões de 40 cm de largura por 60 cm de comprimento, esta etapa utilizou a base estrutural preexistente e aplicou uma nova camada de revestimento asfáltico de 5 cm de espessura. Para capturar as variações térmicas tridimensionais com maior resolução, a instrumentação foi expandida para uma rede de oito sensores digitais DS18B20. Estes componentes foram estrategicamente distribuídos em duas profundidades, com quatro sensores alocados em cada nível (Figura 4). A malha sensorial superior foi instalada a 2 cm abaixo da superfície do revestimento, enquanto a malha inferior foi posicionada imediatamente acima da camada de imprimação, estabelecendo a leitura na interface térmica entre o revestimento asfáltico e a base.

Diferentemente da primeira etapa, o regime de aquisição de dados neste segundo cenário focou na viabilidade do hardware de forma imediata. Foram realizadas medições pontuais de validação logo após a instalação da mistura asfáltica. O objetivo principal desta fase consistiu em confirmar a integridade mecânica e elétrica das conexões sob estresse térmico da massa asfáltica, além de validar o funcionamento do nó sensor em uma arquitetura expandida, assegurando que o microcontrolador ESP32 fosse capaz de realizar a varredura e o empacotamento dos dados de múltiplos sensores simultaneamente.

Figura 4 – Distribuição dos sensores de temperatura no Campo Experimental.



Fonte: Autores (2026).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Montagem e Integração dos Nós

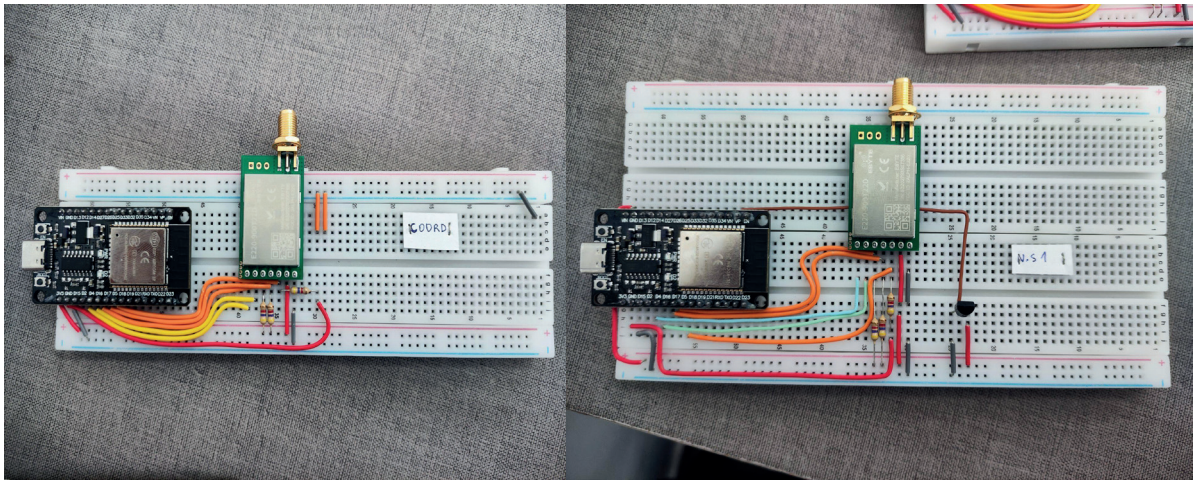
A montagem dos nós sensores representou uma etapa essencial para a validação inicial da arquitetura embarcada proposta. Nessa fase, os componentes eletrônicos foram organizados em protoboard, permitindo a verificação das conexões elétricas, da comunicação entre os módulos e da disposição física dos elementos antes de uma futura consolidação em placa de circuito impresso. Essa abordagem possibilitou maior flexibilidade para ajustes durante os testes, reduzindo riscos de falhas permanentes na etapa inicial de integração.

Conforme apresentado na Figura 5, foram montados dois protótipos funcionais: o nó receptor e o nó transmissor. Ambos utilizaram o microcontrolador ESP32 associado ao módulo de comunicação LoRa, permitindo estabelecer a estrutura básica da rede de sensores sem fio. O nó receptor foi configurado para receber os pacotes de dados enviados pelo sistema, enquanto o nó transmissor foi responsável pela aquisição das informações do sensor de temperatura e pelo envio dos dados por comunicação sem fio.

A diferenciação entre os dois protótipos está relacionada à função desempenhada por cada nó dentro da rede. O nó receptor, apresentado na Figura 5a, permaneceu em bancada e atuou como unidade de recepção dos dados transmitidos. Já o nó transmissor, apresentado na Figura 5b, incorporou o circuito de sensoriamento, sendo destinado à coleta das medições térmicas em campo. Essa separação funcional permitiu avaliar a comunicação entre dispositivos distintos e confirmou a viabilidade da arquitetura modular adotada no projeto.

Dessa forma, a montagem apresentada na Figura 5 forneceu subsídios práticos para o aperfeiçoamento do sistema e para o futuro desenvolvimento de uma placa de circuito impresso mais robusta, compacta e adequada às condições de aplicação em pavimentos asfálticos. Essa etapa, portanto, consolidou a integração inicial dos nós e demonstrou a funcionalidade da solução embarcada proposta.

Figura 5 – Nós: a) nó receptor; b) nó transmissor.



(a) (b)

Fonte: Autores (2026).

Análise do Comportamento Térmico do Pavimento

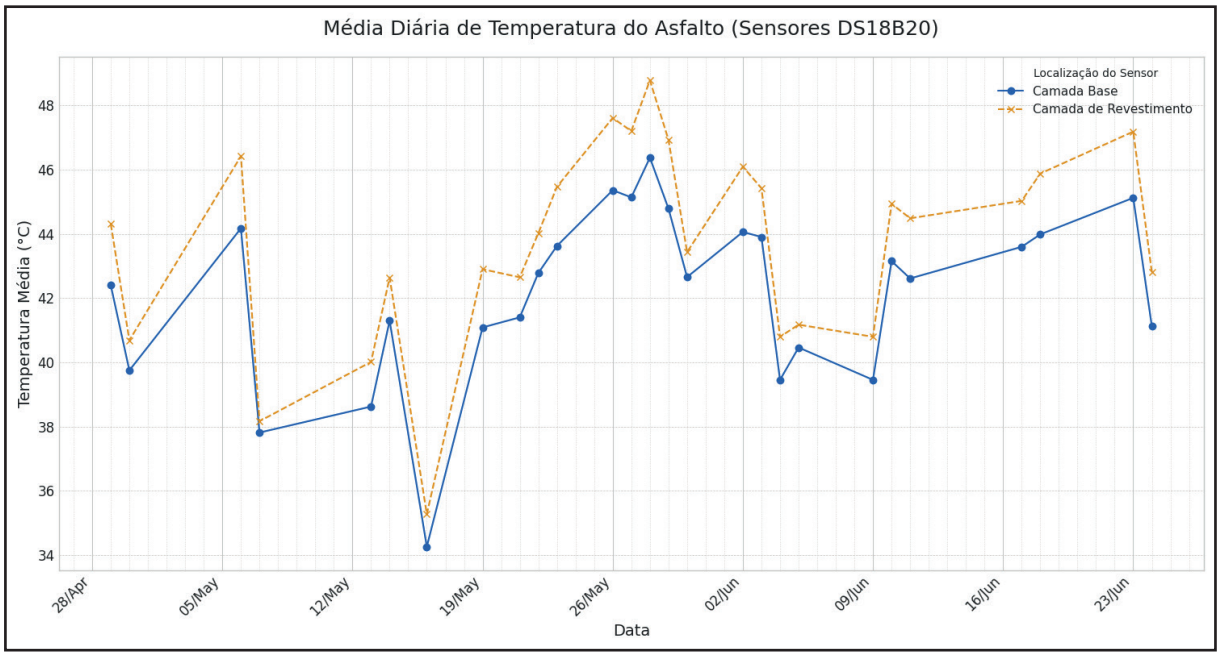
Os dados obtidos no Campo Experimental 1 permitiram avaliar a variação térmica do pavimento ao longo do período monitorado, considerando as temperaturas registradas em diferentes níveis da estrutura. Conforme apresentado no Gráfico 1, observa-se que as medições acompanharam as variações de aquecimento do pavimento, evidenciando diferenças entre os pontos instrumentados. Esse comportamento indica que a distribuição de temperatura no interior da estrutura não ocorre de maneira uniforme, sendo influenciada pela profundidade de medição e pela exposição térmica da camada superior.

A resposta térmica observada reforça a importância da instrumentação em diferentes pontos do pavimento, uma vez que a temperatura é uma variável diretamente associada ao desempenho do revestimento asfáltico. Em condições de maior aquecimento, o material tende a apresentar alterações em sua rigidez e maior suscetibilidade a deformações permanentes, especialmente em regiões de clima quente. Assim, o acompanhamento da variação térmica contribui para a compreensão do comportamento do pavimento e pode subsidiar estudos voltados à manutenção preventiva e à previsão de desempenho estrutural.

A relação entre as curvas apresentadas no Gráfico 1 também evidencia que a camada de revestimento apresentou, na maior parte do período analisado, temperaturas médias superiores às registradas na camada de base. Esse resultado é compatível com a maior exposição térmica da região superficial do pavimento, que recebe diretamente a radiação solar e transfere calor

gradualmente para as camadas inferiores. Assim, a diferença observada entre os sensores reforça a ocorrência de um gradiente térmico vertical, aspecto relevante para a avaliação do desempenho do pavimento, pois variações de temperatura ao longo da espessura podem influenciar o comportamento mecânico da estrutura asfáltica.

Gráfico 1 – Médias diárias de temperatura registradas no Campo Experimental 1.



Fonte: Autores (2026).

No Campo Experimental 2, os dados apresentados no Quadro 2 complementam essa análise ao demonstrar a capacidade do sistema de registrar leituras provenientes de múltiplos pontos de medição. Embora os valores correspondam a medições pontuais, e não a uma série temporal contínua, eles indicam que a arquitetura expandida manteve a funcionalidade após a instalação em campo. Dessa forma, a tabela deve ser interpretada principalmente como evidência da escalabilidade do sistema de aquisição e da viabilidade do uso do barramento 1-Wire para o monitoramento distribuído da temperatura no pavimento.

Quadro 2 – Médias de Temperatura Registradas no Campo Experimental 2

Data	Temp. Média Camada Inferior (ºC)	Temp. Média Camada Superior (ºC)	Gradiente (ºC) (Superior - Inferior)
11/07/2025	41,07	43,03	1,96
14/07/2025	41,03	43,06	2,03
15/07/2025	41,05	43,01	1,96
16/07/2025	41,07	43,17	2,10
Média	41,05	43,07	2,02

Fonte: Autores (2026).

Em conjunto, o Gráfico 1 e o Quadro 2 evidenciam que o sistema desenvolvido foi capaz de registrar variações térmicas em condições reais de aplicação, tanto em uma configuração inicial de monitoramento temporal quanto em uma configuração expandida de múltiplos sensores. Esses resultados sustentam a aplicabilidade da solução proposta para redes de sensores sem fio voltadas ao

monitoramento térmico de pavimentos asfálticos, especialmente em estudos que demandem coleta de dados em diferentes profundidades ou regiões da estrutura.

CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver e validar um sistema embarcado para um nó de uma rede de sensores sem fio aplicado ao monitoramento térmico de pavimentos asfálticos. A partir da integração entre o microcontrolador ESP32, sensores digitais DS18B20 e módulos de comunicação LoRa, foi possível estruturar uma arquitetura funcional para aquisição e transmissão de dados de temperatura em ambiente experimental.

Os resultados obtidos demonstraram que o sistema desenvolvido apresentou desempenho adequado nas etapas de montagem, integração e validação em campo. A utilização do sensor DS18B20 mostrou-se apropriada para a aplicação proposta, sobretudo pela comunicação digital via protocolo 1-Wire, que possibilitou a conexão de múltiplos sensores em um mesmo barramento e reduziu a complexidade do sistema de aquisição. Além disso, a comunicação LoRa permitiu a transmissão dos dados entre os nós, contribuindo para a viabilidade da solução em aplicações que exigem comunicação sem fio em ambientes externos.

A análise do comportamento térmico do pavimento evidenciou a capacidade do sistema em registrar variações de temperatura em diferentes pontos da estrutura. No primeiro campo experimental, os dados permitiram observar a variação térmica ao longo do tempo, enquanto no segundo campo foi possível verificar a funcionalidade da arquitetura expandida com múltiplos sensores. Esses resultados indicam que a solução proposta apresenta potencial para auxiliar estudos relacionados ao desempenho térmico de pavimentos asfálticos, especialmente em contextos de monitoramento contínuo e manutenção preventiva.

Dessa forma, conclui-se que o sistema embarcado desenvolvido constitui uma alternativa viável para aplicações em redes de sensores sem fio voltadas ao monitoramento rodoviário. A arquitetura proposta mostrou-se funcional, escalável e compatível com as necessidades iniciais do projeto, fornecendo uma base técnica para futuras melhorias, como o desenvolvimento de placas de circuito impresso, o aperfeiçoamento do encapsulamento dos nós sensores, a otimização do consumo energético e a ampliação dos testes em condições ambientais diversificadas.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA), pela concessão da bolsa de iniciação científica. À Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), ao Laboratório de Aquisição e Processamento de Sinais (LAPS) e ao Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LSP), pelo suporte técnico e estrutural durante o desenvolvimento da pesquisa. À Prof.ª Dr.ª Mayssa Alves da Silva e Professores colaboradores, pela orientação, acompanhamento e incentivo ao longo da execução do projeto.

REFERÊNCIAS

AKYILDIZ, I. F.; VURAN, M. C. Wireless Sensor Networks. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010.

ALBAYATI, A. H.; AL.ANI, A. F. Influence of temperature on mechanical properties of asphalt concrete mixture. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 856, n. 1, 012025, 2021. DOI: 10.1088/1755-1315/856/1/012025.

AL-TURJMAN, F. Wireless Sensor Networks. Boca Raton: CRC Press, 2018.

CASA DA ROBÓTICA. Componentes eletrônicos para robótica e sistemas embarcados. Disponível em: https://www.casadarobotica.com.

DNIT. Manual de Pavimentação. 3. ed. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2006.

ESPRESSIF SYSTEMS. ESP32 Series Datasheet. Shanghai: Espressif Systems, 2024. Disponível em: https://www.espressif.com.

GUNGOR, V. C.; HANCKE, G. P. Industrial wireless sensor networks: challenges, design principles, and technical approaches. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 56, n. 10, p. 4258-4265, 2009. DOI: 10.1109/TIE.2009.2015754.

HEATH, S. Embedded Systems Design. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2017.

HUANG, Y. H. Pavement Analysis and Design. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2004.

KESHTGARI, M.; DELJOO, A. A wireless sensor network solution for precision agriculture based on ZigBee technology. Wireless Sensor Network, v. 4, n. 1, p. 25-30, 2012. DOI: 10.4236/wsn.2012.41004.

MAXIM INTEGRATED. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer: data sheet. San Jose: Maxim Integrated, 2021. Disponível em: https://www.maximintegrated.com.

SEMTECH CORPORATION. LoRa and LoRaWAN: a technical overview. Camarillo: Semtech Corporation, 2020. Disponível em: https://www.semtech.com. Acesso em: 19 maio 2026.

VERDONE, R.; DARDARI, D.; MAZZINI, G.; CONTI, A. Wireless Sensor and Actuator Networks: Technologies, Analysis and Design. Oxford: Academic Press, 2008.

WOLF, M. Computers as Components: Principles of Embedded Computing System Design. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 2012.

YICK, J.; MUKHERJEE, B.; GHOSH, D. Wireless sensor network survey. Computer Networks, v. 52, n. 12, p. 2292-2330, 2008.