

Sistema IoT para monitoramento de equipes em obras de infraestrutura remotas

IoT-based system for monitoring teams in remote infrastructure works

Thalys Rocha Rodrigues¹
Erikson Pedro da Silva Nicacio²
Samara Revoredo da Silva³
João Victor Peres Ferreira Pontes⁴
Jan Erik Mont Gomery Pinto⁵
Leonardo Gomes de Paiva Amorim⁶
Wagner de Oliveira⁷

Resumo

Este artigo apresenta o desenvolvimento e a validação de uma solução tecnológica baseada em Internet das Coisas (IoT) voltada ao monitoramento automatizado de equipes em obras de infraestrutura remotas, com ênfase em parques eólicos. O trabalho aborda a necessidade de maior confiabilidade nos processos de apontamento de presença, frequentemente comprometidos por métodos manuais em ambientes de difícil supervisão. A solução proposta utiliza identificação por radiofrequência (RFID) passiva integrada aos capacetes de segurança, associada a um microcontrolador ESP 32, módulo GPS para geolocalização e sincronização temporal e armazenamento local em cartão Micro SD, adotando a estratégia SD-First para garantir a integridade dos dados em cenários de conectividade instável. Os registros coletados em campo são transmitidos de forma segura por meio do protocolo HTTPS para uma API desenvolvida em Node.js, com posterior armazenamento em banco de dados PostgreSQL. A metodologia adotada envolveu testes de bancada, validações em ambiente controlado e testes de campo, permitindo avaliar o desempenho do sistema em condições reais de operação. Os resultados obtidos demonstraram robustez no armazenamento local, ausência de perda de dados durante períodos offline e alcance de leitura RFID de até 12 metros após a otimização das etiquetas utilizadas. Conclui-se que a solução desenvolvida atende aos requisitos de rastreabilidade, confiabilidade e monitoramento não intrusivo, contribuindo para a

¹ Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: tgbr66@gmail.com

² Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: eriksonpedro65ma@gmail.com

³ Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: samararevoredos15@hotmail.com

⁴ Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: joao.peres@ieee.org

⁵ Docente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: jan.pinto@ufersa.edu.br

⁶ Docente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: leonardo.amorim@escolar.ifrn.edu.br

⁷ Docente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: wagner.oliveira@ifrn.edu.br

modernização da gestão de equipes e para a consolidação de práticas alinhadas à Construção 4.0.

Palavras-chave: Internet das Coisas; RFID; Monitoramento de Obras; ESP32; Construção 4.0.

Abstract

This article presents the development and validation of a technological solution based on the Internet of Things (IoT) for the automated monitoring of teams working on remote infrastructure projects, with emphasis on wind farms. The study addresses the need for greater reliability in attendance tracking processes, which are often compromised by manual methods in environments with limited supervision. The proposed solution employs passive Radio Frequency Identification (RFID) integrated into safety helmets, combined with an ESP32 microcontroller, a GPS module for geolocation and time synchronization, and local storage on a Micro SD card, adopting the SD-First strategy to ensure data integrity in scenarios of unstable connectivity. The records collected in the field are securely transmitted via the HTTPS protocol to an API developed in Node.js, with subsequent storage in a PostgreSQL database. The adopted methodology involved bench testing, controlled environment validation, and field testing, enabling the evaluation of system performance under real operating conditions. The obtained results demonstrated robustness in local storage, absence of data loss during offline periods, and an RFID reading range of up to 12 meters after optimization of the tags employed. It is concluded that the developed solution meets the requirements of traceability, reliability, and non-intrusive monitoring, contributing to the modernization of workforce management and to the consolidation of practices aligned with Construction 4.0.

Keywords: Internet of Things; RFID; Construction Monitoring; ESP32; Construction 4.0.

1 INTRODUÇÃO

A gestão de equipes em obras de infraestrutura apresenta desafios significativos, especialmente em empreendimentos localizados em regiões remotas, como parques eólicos e grandes frentes de construção civil. A extensão territorial dos canteiros, a rotatividade de equipes e a limitação da supervisão presencial tornam os processos tradicionais de controle de presença suscetíveis a falhas, inconsistências e evasões, comprometendo a confiabilidade das informações utilizadas para fins operacionais, financeiros e de segurança. Nesse contexto, a incorporação de tecnologias digitais tem se mostrado fundamental para a modernização dos processos produtivos, alinhando-se aos princípios da chamada Construção 4.0.

A Internet das Coisas (IoT) destaca-se como uma das principais tecnologias habilitadoras dessa transformação, ao permitir a integração entre dispositivos físicos, sistemas computacionais e plataformas de análise de dados. Segundo Atzori, Iera & Morabito (2010), a IoT possibilita a coleta contínua de informações em tempo real, ampliando a capacidade de monitoramento e tomada de decisão em ambientes complexos. Na construção civil, estudos

recentes apontam a aplicação da IoT no monitoramento de ativos, condições ambientais e segurança do trabalho, contribuindo para maior eficiência operacional e redução de riscos (Evans, 2011; Kingston et al., 2010).

Entretanto, apesar dos avanços tecnológicos, o controle de presença de trabalhadores em obras remotas ainda é majoritariamente realizado por meio de apontamentos manuais ou sistemas que exigem a ação direta do colaborador, como registros biométricos ou cartões magnéticos. Essas abordagens apresentam limitações em ambientes externos e hostis, além de não garantirem, de forma integrada, o cumprimento das normas de segurança relacionadas ao uso de equipamentos de proteção individual. Conforme destaca Finkenzeller (2010), tecnologias de identificação por radiofrequência (RFID) surgem como alternativas viáveis para identificação automática e não intrusiva, especialmente em cenários onde não há visada direta ou condições ambientais favoráveis.

Diante desse cenário, emerge o seguinte problema de pesquisa: como desenvolver uma solução tecnológica capaz de monitorar, de forma automática, confiável e não intrusiva, a presença de equipes em obras de infraestrutura remotas, garantindo a integridade dos dados mesmo em condições de conectividade instável e associando o registro de presença ao uso de equipamentos de proteção individual? Esse problema reflete uma vivência prática observada em obras de grande porte e apresenta aplicabilidade social e industrial, ao impactar diretamente a gestão de recursos humanos, a segurança do trabalho e a conformidade operacional.

A justificativa desta pesquisa fundamenta-se na necessidade de oferecer uma solução tecnológica que supere as limitações dos métodos tradicionais de controle de ponto, contribuindo para a redução de inconsistências, aumento da rastreabilidade e fortalecimento das práticas de segurança. Do ponto de vista teórico, o estudo amplia a discussão sobre a aplicação de arquiteturas IoT resilientes no contexto da construção civil. Sob a perspectiva prática, os resultados podem auxiliar empresas do setor na adoção de sistemas mais eficientes, auditáveis e alinhados às demandas da Construção 4.0.

Assim, o objetivo deste trabalho é desenvolver e validar um sistema embarcado baseado em Internet das Coisas para o monitoramento automatizado de equipes em obras de infraestrutura remotas, utilizando tecnologia RFID integrada a equipamentos de proteção individual, microcontrolador ESP 32, geolocalização via GPS e armazenamento local de dados. Ao final, busca-se demonstrar que a solução proposta é tecnicamente viável, confiável e aplicável em ambientes reais de operação, atendendo às necessidades identificadas no contexto do problema estudado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica deste trabalho tem como objetivo apresentar o referencial conceitual que sustenta a proposta de desenvolvimento de um sistema baseado em Internet das Coisas para o monitoramento de equipes em obras de infraestrutura remotas. A partir da análise de estudos já publicados, busca-se compreender como tecnologias emergentes têm sido aplicadas no contexto da construção civil, bem como identificar lacunas que justifiquem a adoção de abordagens alternativas, especialmente em cenários de conectividade limitada e elevada complexidade operacional.

2.1 INTERNET DAS COISAS E A CONSTRUÇÃO 4.0

A Internet das Coisas (IoT) refere-se à capacidade de objetos físicos coletarem, processarem e transmitirem dados por meio de redes de comunicação, possibilitando a integração entre o mundo físico e o digital (Oliveira, 2017). Atzori, Iera & Morabito (2010) definem a IoT como um paradigma que conecta sensores, dispositivos e sistemas computacionais, estruturando-se, de forma geral, em três camadas: percepção, rede e aplicação. Essa arquitetura permite o monitoramento contínuo de eventos e a automação de processos em diferentes setores produtivos.

No contexto da construção civil, a IoT está diretamente associada ao conceito de Construção 4.0, que representa a incorporação de tecnologias digitais para aumentar a eficiência, a segurança e a rastreabilidade das operações. Evans (2011) destaca que a evolução da conectividade possibilitou que mais objetos do que pessoas estivessem conectados à internet, ampliando o potencial de coleta de dados em ambientes industriais. Estudos recentes indicam que a aplicação da IoT em canteiros de obras contribui para o monitoramento de ativos, controle de processos e gestão de equipes, especialmente em empreendimentos de grande porte e localização remota (Kingston *et al.*, 2010).

Apesar dos avanços, a adoção dessas tecnologias em obras remotas ainda enfrenta desafios relacionados à infraestrutura de comunicação, confiabilidade dos dados e adaptação às condições ambientais adversas, o que evidencia a necessidade de arquiteturas resilientes e adaptadas ao contexto operacional.

2.2 TECNOLOGIAS DE IDENTIFICAÇÃO POR RADIOFREQUÊNCIA (RFID)

A identificação por radiofrequência (*RFID - Radio Frequency Identification*) é uma tecnologia amplamente utilizada para identificação automática de objetos e pessoas, baseada na comunicação entre etiquetas (tags) e leitores por meio de ondas eletromagnéticas (Bauermeister, 2017). Segundo Finkenzeller (2010), sistemas RFID não exigem contato físico nem visada direta entre leitor e etiqueta, característica que os torna especialmente adequados para ambientes industriais hostis, como canteiros de obras.

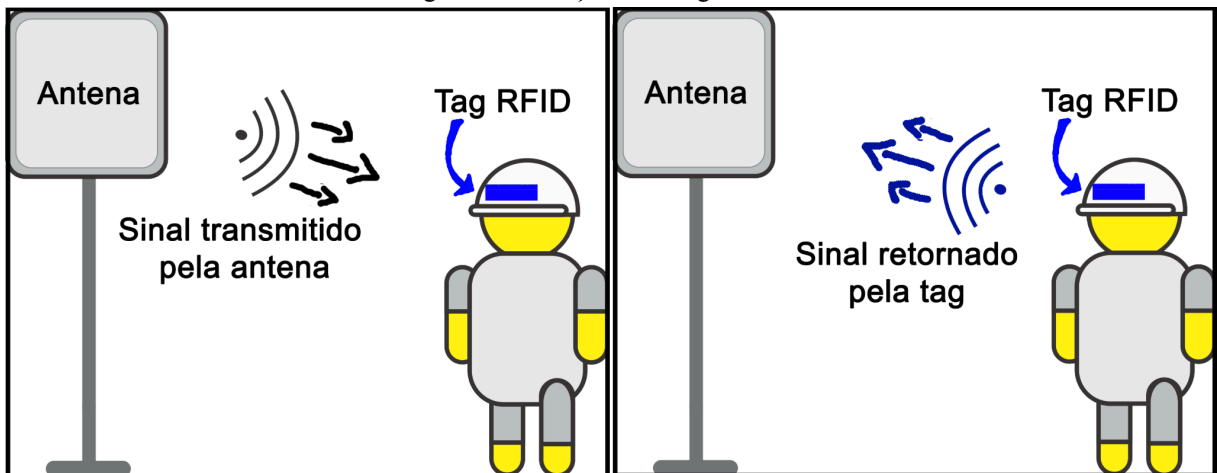
A tecnologia que inaugura o conceito de Internet das Coisas (IoT) é a RFID (*Radio Frequency Identification*), cujo princípio remonta à década de 1940, quando transponders foram empregados em aeronaves durante a Segunda Guerra Mundial. Seu funcionamento, baseado na emissão de uma identificação única por radiofrequência, permanece essencialmente o mesmo. Inicialmente utilizada para reconhecer aeronaves e aprimorar a segurança e a precisão das operações aéreas, a RFID evoluiu para aplicações amplas no cotidiano, como sistemas de controle de acesso, identificação veicular e rastreamento de mercadorias, substituindo métodos tradicionais como códigos de barras (Oliveira, 2017).

De acordo com Borges (2023), as etiquetas RFID podem ser classificadas em ativas, semi-ativas e passivas, sendo estas últimas energizadas pelo campo eletromagnético emitido pelo leitor. A utilização de tags passivas apresenta vantagens como baixo custo, maior durabilidade e menor necessidade de manutenção, fatores relevantes para aplicações em larga escala. Bauermeister (2017) destaca que a RFID tem sido aplicada em sistemas de controle de acesso, rastreamento de ativos e automação de processos, substituindo métodos tradicionais baseados em códigos de barras ou registros manuais.

No âmbito da construção civil, a RFID tem sido explorada para monitoramento de trabalhadores e equipamentos, contribuindo para o aumento da segurança e da rastreabilidade (COSTIN; TEIZER; SCHONER, 2012). Entretanto, o desempenho do sistema depende fortemente da qualidade das etiquetas, da antena utilizada e do ambiente de instalação, aspectos que ainda demandam estudos mais aprofundados, especialmente em obras de infraestrutura abertas e com grande presença de estruturas metálicas (VALERO; ADAN; CERRADA, 2015).

Sendo assim, com base em Finkenzeller (2010), a estrutura do projeto baseia-se em um sistema RFID convencional composto por tags presentes nos capacetes dos colaboradores que contém os dados de identificação, e um módulo leitor RFID integrado à uma antena, a qual amplifica o sinal RFID emitido, detectando tags à longa distância, recebendo o sinal retornado, tal como ilustra a Figura 1 a seguir.

Figura 1 - Interação entre tag e antena.



Fonte: Autoria da equipe (2026).

2.3 GEOLOCALIZAÇÃO E SINCRONIZAÇÃO TEMPORAL POR GPS

O Sistema de Posicionamento Global (GPS) é uma tecnologia baseada em uma constelação de satélites capaz de fornecer informações precisas de localização e tempo. Kaplan & Hegarty (2006) destacam que, além das coordenadas geográficas, os receptores GPS disponibilizam uma referência temporal altamente precisa, baseada em relógios atômicos, sendo amplamente utilizada em aplicações que exigem sincronização confiável.

Em sistemas embarcados, o uso do GPS como fonte de tempo elimina problemas relacionados à deriva de relógios internos e à dependência de sincronização via rede, que pode ser instável em ambientes remotos (KAPLAN; HEGARTY, 2006). Dessa forma, a associação entre dados de identificação e informações de tempo e localização contribui para a auditabilidade e a confiabilidade dos registros, aspectos essenciais para aplicações de monitoramento de equipes e controle de presença.

2.4 ARMAZENAMENTO LOCAL E COMUNICAÇÃO DE DADOS EM AMBIENTES REMOTOS

Em obras localizadas em regiões afastadas dos centros urbanos, a conectividade com a internet é frequentemente intermitente ou inexistente. Tanenbaum e Wetherall (2011) ressaltam que sistemas distribuídos que dependem exclusivamente de comunicação em tempo real tornam-se vulneráveis à perda de dados em cenários de instabilidade de rede. Nesse contexto, estratégias de armazenamento local, como o uso de cartões de memória, são fundamentais para garantir a persistência das informações.

A abordagem conhecida como *store-and-forward*, ou armazenamento seguido de transmissão, permite que os dados sejam registrados localmente e enviados posteriormente quando a conectividade é restabelecida. Para a transmissão segura dessas informações, o protocolo HTTPS tem sido amplamente adotado, pois utiliza mecanismos de criptografia SSL/TLS para proteger os dados trafegados em redes potencialmente inseguras (Kurose e Ross, 2013).

2.5 COMPUTAÇÃO EM NUVEM E BANCO DE DADOS

A integração de sistemas IoT com plataformas em nuvem possibilita o armazenamento, o processamento e a análise centralizada dos dados coletados em campo. O uso de APIs desenvolvidas em ambientes como o Node.js favorece a escalabilidade e o tratamento eficiente de múltiplas requisições, característica importante em aplicações que envolvem grande volume de dispositivos conectados (Flanagan, 2013).

Para a persistência dos dados, bancos de dados relacionais como o PostgreSQL são amplamente utilizados devido à sua robustez, conformidade com padrões SQL e garantia de integridade transacional. Elmasri & Navathe (2011) destacam que modelos relacionais facilitam a organização, consulta e auditoria das informações, aspectos relevantes para sistemas de monitoramento e controle.

2.6 SÍNTESE DO REFERENCIAL TEÓRICO

A análise da literatura evidencia que a aplicação de tecnologias como IoT, RFID, GPS e computação em nuvem apresenta elevado potencial para a modernização da gestão de equipes na construção civil. Contudo, tal como se observa em Valero, Adan e Cerrada (2015) e em Costin, Teizer e Schöner (2012), ainda se concentram em ambientes controlados ou com conectividade estável, havendo uma lacuna quanto ao desenvolvimento de soluções resilientes para obras remotas. Assim, o presente trabalho fundamenta-se nesse referencial teórico para propor e validar uma arquitetura integrada, capaz de operar de forma confiável mesmo em condições adversas, contribuindo para o avanço do estado da arte no contexto da Construção 4.0.

3 METODOLOGIA

3.1 ARQUITETURA DO SISTEMA

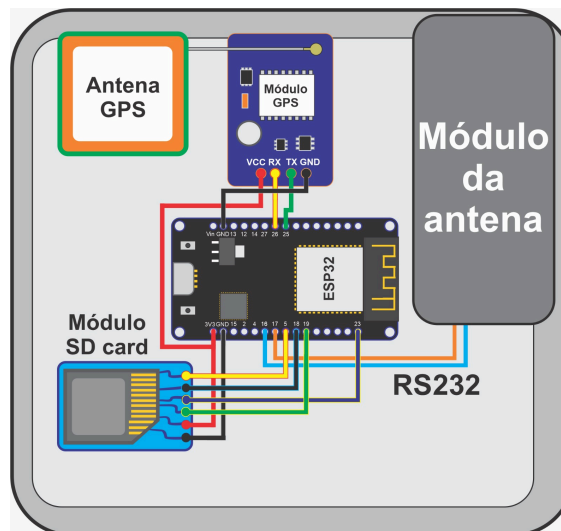
A arquitetura proposta foi projetada para operar de forma autônoma e resiliente em campo. O fluxo de funcionamento inicia-se com a detecção da etiqueta RFID presente no

capacete do colaborador por meio de uma antena UHF integrada. Os dados de identificação são processados pelo microcontrolador ESP 32, enriquecidos com informações de geolocalização e tempo fornecidos pelo módulo GPS e armazenados localmente em cartão Micro SD. Periodicamente, o sistema verifica a disponibilidade de conexão Wi-Fi, quando a conectividade é detectada, os registros armazenados são enviados em lote para uma API desenvolvida em Node.js, utilizando HTTPS. Após confirmação de recebimento, os arquivos locais são preservados como backup, evitando duplicidade e perda de dados.

3.2 HARDWARE UTILIZADO

Os principais componentes do sistema incluem: microcontrolador ESP 32 WROOM-32, leitor RFID UHF com antena integrada de 12 dBi, módulo GPS e interface para cartão Micro SD. A seleção priorizou robustez, disponibilidade no mercado e compatibilidade técnica com aplicações industriais. A Figura 2 apresenta o ESP 32 e os módulos de GPS e leitor de MicroSD integrados em uma única placa, responsável por receber as informações provenientes da antena via RS-232.

Figura 2 - Hardware utilizado.



Fonte: Autoria da equipe (2026).

3.3 SOFTWARE E TECNOLOGIAS

O firmware embarcado foi desenvolvido em C/C++ utilizando o ecossistema Arduino/ESP-IDF. No backend, a API foi implementada em Node.js, responsável pelo recebimento, validação e inserção dos dados no banco de dados PostgreSQL, garantindo integridade e consistência das informações.

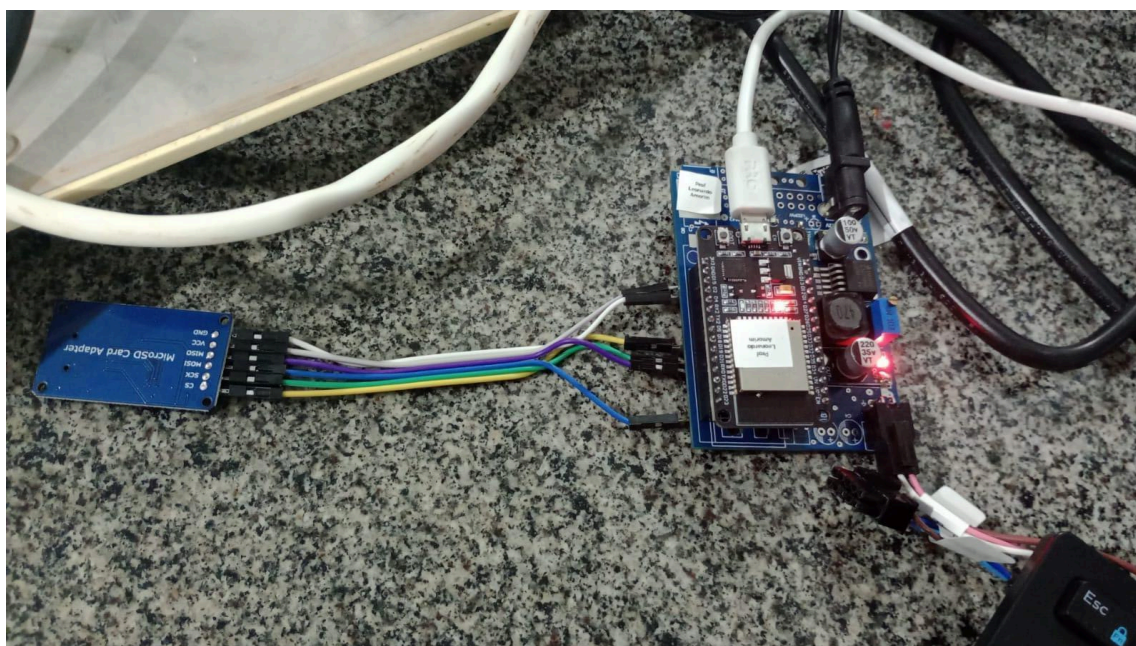
3.4 ESTRATÉGIAS DE TESTE E VALIDAÇÃO

Visando assegurar a conformidade funcional e a confiabilidade da arquitetura proposta diante das adversidades operacionais, estabeleceu-se um protocolo de validação experimental. As etapas de verificação foram desenhadas para avaliar o comportamento do sistema em situações críticas, com foco na integridade dos dados sob condições de conectividade intermitente e na consistência do fluxo informacional. Nesse contexto, foram realizados os seguintes testes:

3.4.1. Teste de resiliência à falha de rede

O teste de resiliência buscou validar a eficácia da estratégia *SD-First* em cenários de instabilidade ou ausência total de conectividade, condição inerente a obras de infraestrutura remotas. Para tanto, o sistema foi submetido a ciclos de operação em que o módulo Wi-Fi do microcontrolador ESP32 era deliberadamente desabilitado por intervalos variados de 1 a 4 horas. Durante esses períodos, simularam-se leituras contínuas de etiquetas RFID para verificar a capacidade de persistência de dados no cartão Micro SD e o funcionamento dos mecanismos de retentativa de conexão. Avaliou-se a integridade dos arquivos de log gerados localmente e a capacidade do firmware em realizar o gerenciamento de ponteiros de leitura, garantindo que, ao restabelecer o sinal de rede, o sistema realizasse o upload apenas dos dados ainda não sincronizados, evitando a redundância e o consumo desnecessário de banda, a Figura 3 representa o teste realizado.

Figura 3 - Teste de resiliência à falha de rede



Fonte: Aatoria da equipe (2026).

3.4.2. Teste de integração ponta a ponta

O teste de integração ponta a ponta visou validar a consistência do fluxo informacional nas camadas da arquitetura proposta, desde a captura física do sinal até a persistência definitiva na base de dados. O procedimento consistiu na excitação controlada do leitor RFID mediante o uso de etiquetas passivas, seguida pelo processamento local no microcontrolador ESP32 para a associação dos dados de identificação às coordenadas geográficas e ao carimbo de tempo (*timestamp*) fornecidos pelo GPS. Monitorou-se a transmissão segura dos pacotes via protocolo HTTPS para a API em Node.js e a subsequente inserção no banco de dados PostgreSQL. A validação foi confirmada pela auditoria dos registros no servidor, assegurando que os eventos físicos de leitura correspondem fielmente aos dados armazenados, comprovando a interoperabilidade entre o hardware embarcado e a infraestrutura em nuvem, a Figura 4 mostra como foi realizada esta validação.

Figura 4 - Teste de integração ponta a ponta.



Fonte: Aatoria da equipe (2026).

A execução conjunta destes procedimentos experimentais forneceu uma validação confiável do sistema, abrangendo desde a tolerância a falhas de comunicação até a integridade

transacional dos dados. Essa abordagem metodológica permitiu observar as variáveis necessárias para que o protótipo atingisse os requisitos de segurança para a operação em ambiente real, fundamentando a viabilidade técnica da solução e fornecendo a base para a análise de desempenho detalhada na seção subsequente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os testes de campo demonstraram a eficácia da estratégia SD-First, evidenciando nenhuma perda de dados mesmo em cenários de desconexão prolongada. A precisão de geolocalização apresentou erro médio da ordem de metros, adequado ao contexto de obras abertas. Um resultado relevante foi o impacto da escolha das etiquetas RFID: a substituição por modelos de maior desempenho ampliou o alcance de leitura de aproximadamente 2 metros para até 12 metros, viabilizando o monitoramento não intrusivo em áreas amplas.

Durante o funcionamento do sistema, o ESP 32 recebe, por meio da conexão RS232, os dados das tags RFID obtidos por meio da antena com leitor integrado. Os dados são tratados no microcontrolador e direcionados para o SD card. Ademais, o ESP 32 obtém dados geográficos e cronológicos por meio do módulo GPS. Ao obter uma conexão com a internet, os dados armazenados no SD card são transmitidos para um servidor por meio de uma API. A Figura 5 ilustra a visão geral da arquitetura do sistema. Ademais, o funcionamento pode ser melhor compreendido por meio da mídia presente no link a seguir: <https://youtu.be/rElmlu9yJII>.

Figura 5 - BPMN ilustrativo do funcionamento do sistema.

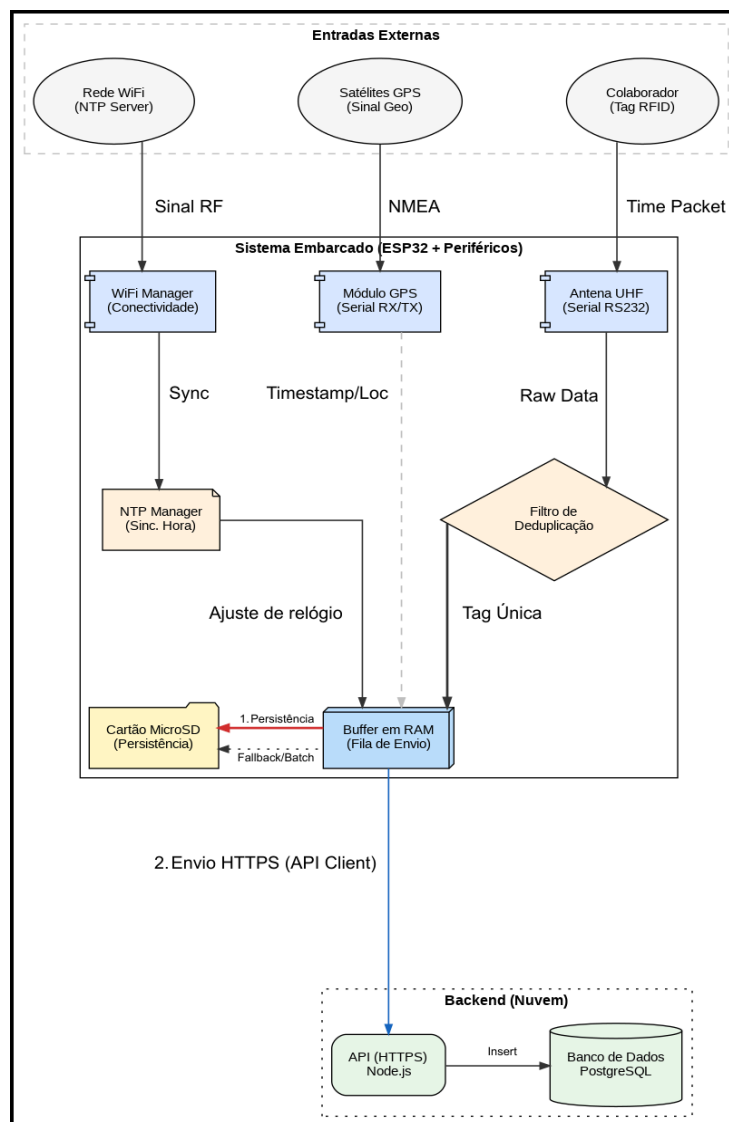


Fonte: Autoria da equipe (2026).

A arquitetura foi projetada para ser modular e escalável, possibilitando que os dados fluam de forma eficiente desde a leitura em campo até o armazenamento centralizado. Nesse

arranjo, a estratégia de desacoplamento entre as rotinas de aquisição (leitura RFID e GPS) e as rotinas de comunicação (Wi-Fi) mostrou-se determinante para os resultados de disponibilidade obtidos. Ao processar e validar os registros na borda (edge computing), o sistema eliminou a dependência de latência de rede para a confirmação da presença, garantindo que o fluxo operacional no canteiro de obras não fosse interrompido por instabilidades de conexão. Além disso, a padronização da troca de mensagens via objetos JSON sobre o protocolo HTTPS assegurou a interoperabilidade com sistemas de gestão preexistentes, validando a capacidade de integração da solução. A lógica interna de funcionamento do firmware, detalhando o gerenciamento de threads para sincronização de tempo, tratamento de buffer e persistência em cartão SD, é apresentada no fluxograma da Figura 6.

Figura 6 - Fluxograma detalhado do sistema integrado inteiramente.

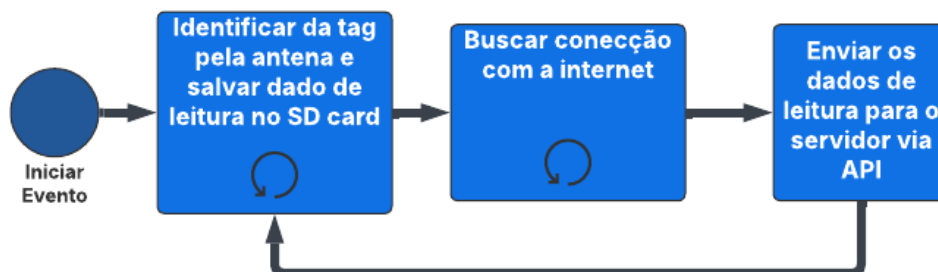


Fonte: Aatoria da equipe (2026).

O fluxograma, conforme a Figura 6, evidencia a lógica de orquestração interna do firmware, com destaque para a atuação do filtro de deduplicação na triagem dos dados brutos, o que mitiga o armazenamento de leituras repetidas da mesma etiqueta. Observa-se também a função central do buffer em memória RAM, que atua como o ponto de decisão para o roteamento das informações, direcionando-as para a persistência no cartão MicroSD ou para a transmissão imediata via HTTPS, conforme a disponibilidade momentânea da infraestrutura de rede.

A representação esquemática do ciclo de processamento na Figura 7 ilustra a precedência da gravação local sobre a tentativa de transmissão. Nota-se que a persistência no suporte físico ocorre de maneira incondicional logo após a identificação da etiqueta, estabelecendo uma hierarquia de execução em que a retenção do registro independe da disponibilidade imediata da rede, mitigando riscos associados à volatilidade da conexão em campo.

Figura 7 - Fluxograma simplificado da integração do sistema



Fonte: Aatoria da equipe (2026).

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento e a validação do protótipo confirmaram a viabilidade técnica da aplicação de sistemas IoT embarcados para a mitigação de desafios de gestão em canteiros de obras remotos. Os resultados experimentais evidenciaram que a arquitetura proposta, fundamentada na estratégia SD-First, superou a barreira da instabilidade de conexão característica de parques eólicos, assegurando a integridade integral dos registros - um requisito crítico para a confiabilidade administrativa e fiscal.

Adicionalmente, a otimização do sistema de radiofrequência, ao atingir um alcance de leitura de 12 metros, validou a premissa de monitoramento não intrusivo. Isso demonstra que

é possível automatizar o controle de efetivo e a verificação de uso de EPIs sem impor barreiras físicas ou interrupções à rotina produtiva dos colaboradores. A integração eficiente entre o hardware de baixo custo (ESP32 e RFID) e a infraestrutura em nuvem provou ser uma alternativa economicamente acessível frente às soluções proprietárias tradicionais.

Em suma, esta pesquisa contribui para o acervo tecnológico da Construção 4.0, entregando uma solução escalável que transcende o simples controle de ponto. O sistema posiciona-se como uma ferramenta estratégica para a gestão de segurança e eficiência em infraestruturas críticas, abrindo caminho para trabalhos futuros que explorem a análise preditiva de dados comportamentais e a integração com outras vertentes da segurança do trabalho digital.

REFERÊNCIAS

ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. **The Internet of Things: A survey**. *Computer Networks*, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010.

BAUERMEISTER, Giovanni. **Acionando uma trava elétrica com RFID**. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/blog/acionando-trava-eletrica-com-rfid/>>. Acesso em: 01 de Dez. 2025.

BORGES, Vinicius. **RFID: O que é e como funciona essa tecnologia**. Disponível em: <<https://www.grupocpcon.com/rfid-o-que-e-e-como-funciona/#Como-funcionam-as-tags-RFID>> . Acesso em: 01 de Dez. 2025.

COSTIN, A.; TEIZER, J.; SCHONER, B. RFID-based real-time asset tracking for safety management in construction. In: CONSTRUCTION RESEARCH CONGRESS, 2012. **Proceedings...** West Lafayette: ASCE, 2012. p. 1-10.

ELMASRI, R.; NAVATHE, S. B. **Sistemas de banco de dados**. 6. ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2011.

EVANS, D. **The Internet of Things: How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything**. Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG), 2011.

FINKENZELLER, K. **RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication**. 3. ed. Wiley, 2010.

FLANAGAN, David. **JavaScript: o guia definitivo**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1062 p. ISBN 978-85-65837-19-4.

KAPLAN, Elliott D.; HEGARTY, Christopher J. (eds.). **Understanding GPS: principles and applications**. 2. ed. Norwood, MA: Artech House, 2006. ISBN 1-58053-894-0.

KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. *Redes de computadores e a internet: uma abordagem top-down*. 6. ed. São Paulo: Pearson, 2013.

MAIER, A.; SHARP, A.; VAGAPOV, Y. Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the internet of things. In: INTERNET TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS (ITA), 2017. **Proceedings...** Wrexham: IEEE, 2017. p. 143-148.

OLIVEIRA, S. *Internet das Coisas com ESP8266, Arduino e Raspberry Pi*. São Paulo: Novatec, 2017.

TANENBAUM, A. S. WETHERALL, D. J. *Redes de computadores*. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2011.

VALERO, E.; ADAN, A.; CERRADA, C. Evolution of RFID applications in construction: A literature review. *Sensors*, v. 15, n. 9, p. 22114-22142, 2015.