

## **Automação da expedição logística com RFID de baixo custo: estudo de caso com integração web**

### **Logistics dispatch automation with low-cost RFID: a case study with web integration**

Guilherme Aurélio Ribeiro Rocha<sup>1</sup>; José Higo de Pontes Simplicio<sup>2</sup>; Fellipe Patrick Lima de Brito<sup>3</sup>; Wesley Iuri Dantas dos Santos<sup>4</sup>; Leonardo Gomes de Paiva Amorim<sup>5</sup>; Jefferson Igor Duarte Silva<sup>6</sup>; Wagner de Oliveira<sup>7</sup>

#### **Resumo**

Este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema automatizado para a conferência de mercadorias nos setores de produção e expedição, visando aprimorar a rastreabilidade e mitigar erros operacionais manuais. Para isso, propôs-se uma arquitetura baseada na tecnologia de Identificação por Radiofrequência (RFID) aplicada a paletes, integrada a uma infraestrutura IoT de baixo custo e um dashboard web para gestão em tempo real. A pesquisa classifica-se como aplicada, com abordagem quantitativa e qualitativa, validada através de testes funcionais em ambiente controlado que simula o fluxo de expedição. Os resultados obtidos com o protótipo demonstraram uma taxa média de leitura de 95% e um tempo de processamento de 30 ms por evento, validando a eficácia técnica da automação e garantindo a integridade dos dados transmitidos. Conclui-se que a integração entre firmware e plataforma web torna a tecnologia RFID uma alternativa tecnicamente viável, oferecendo uma arquitetura escalável capaz de modernizar procedimentos logísticos e reduzir a suscetibilidade a falhas humanas.

**Palavras-chave:** RFID; Automação; Sistemas Embarcados; Rastreabilidade; Gestão de estoque.

---

<sup>1</sup>Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: guilhermeaurelio68@gmail.com

<sup>2</sup> Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: ponteshigo707@gmail.com

<sup>3</sup> Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: fellipe.patrick678@gmail.com

<sup>4</sup> Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: iuri.engineer@gmail.com

<sup>5</sup> Docente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: leonardo.amorim@ifrn.edu.br

<sup>6</sup> Docente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: jefferson.duarte@ifrn.edu.br

<sup>7</sup> 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

## ABSTRACT

This article presents the development of an automated system for goods verification in the production and shipping sectors, aiming to improve traceability and mitigate manual operational errors. To achieve this, an architecture based on Radio Frequency Identification (RFID) technology applied to pallets was proposed, integrated with a low-cost IoT infrastructure and a web dashboard for real-time management. The research is classified as applied, with both quantitative and qualitative approaches, validated through functional tests in a controlled environment simulating the shipping workflow. The results obtained with the prototype demonstrated an average reading rate of 95% and a processing time of 30 ms per event, validating the technical effectiveness of the automation and ensuring the integrity of the transmitted data. It is concluded that the integration between firmware and the web platform makes RFID technology a technically viable alternative, offering a scalable architecture capable of modernizing logistics procedures and reducing susceptibility to human errors.

**Keywords:** RFID; Automation; Embedded Systems; Traceability; Inventory Management.

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização

No contexto da Indústria 4.0, a gestão logística evoluiu de uma simples atividade operacional de transporte para um elemento estratégico de competitividade. Conforme destacam Rejeb *et al.* (2020), a modernização dos Centros de Distribuição (CDs) tornou-se mandatória, uma vez que a pressão por entregas mais rápidas e a complexidade das cadeias de suprimentos exigem níveis de rastreabilidade que superam a capacidade dos métodos tradicionais. Nesse cenário, o controle de estoque deixa de ser apenas físico e passa a demandar visibilidade digital em tempo real. Conforme Leão *et al.* (2023), a logística bem aplicada como ferramenta de gestão reduz custos operacionais, afetando diretamente a competitividade do preço final e, conseqüentemente, a margem de lucro da empresa.

Apesar dos avanços tecnológicos disponíveis, processos manuais de conferência de mercadorias ainda predominam em diversos setores industriais, especialmente em operações de expedição e carregamento. Esses procedimentos são suscetíveis a falhas humanas que resultam em trocas de pedidos, divergências de quantidades e envio incorreto de produtos, conforme documentado por Chen *et al.* (2022) ao compararem sistemas manuais com

soluções automatizadas. Tais erros operacionais geram retrabalho logístico, custos adicionais com devoluções e transporte, além de impactar negativamente a reputação da empresa perante seus clientes. A ausência de rastreabilidade em tempo real agrava o problema, dificultando a identificação e correção de inconsistências antes que a carga seja despachada.

Diante desse cenário, a tecnologia de Identificação por Radiofrequência (RFID) emerge como alternativa técnica superior aos métodos tradicionais baseados em códigos de barras. Diferentemente dos sistemas ópticos, que exigem linha de visada direta e leitura individual de cada item, o RFID permite a captura simultânea de múltiplas etiquetas sem contato físico, agilizando o inventário e a verificação de estoques (Budiyanto; Muslim, 2024). A automação proporcionada pelo RFID elimina a intervenção manual na coleta de dados, reduzindo significativamente a probabilidade de erro humano e garantindo maior confiabilidade nos registros logísticos. Rejeb *et al.* (2020) consolidam essa percepção ao identificarem, em revisão bibliométrica de 807 artigos, o RFID como tecnologia mais citada na literatura e pilar fundamental para a rastreabilidade na era da Indústria 4.0.

Contudo, apesar da extensa literatura consolidando os benefícios do RFID, Rejeb *et al.* (2020) apontam uma escassez crítica de casos de negócios práticos que demonstrem o retorno sobre investimento e documentem a implementação em ambientes industriais reais. Essa lacuna entre teoria e prática é agravada pelas barreiras econômicas identificadas por Soesanto *et al.* (2024): o alto custo inicial (CAPEX) de infraestruturas UHF proprietárias e a complexidade de integração dificultam a adoção por empresas de menor porte. Nesse contexto, torna-se relevante desenvolver e documentar arquiteturas de baixo custo baseadas em tecnologias abertas, validando sua aplicabilidade técnica em cenários industriais reais e oferecendo alternativas viáveis para organizações que buscam modernizar processos logísticos sem investimentos proibitivos.

## **1.2 Problemática**

Este estudo foi desenvolvido em parceria com uma empresa do setor de distribuição de fardos localizada no Rio Grande do Norte, cuja operação processa aproximadamente 800 fardos diários. O diagnóstico operacional identificou que o setor de expedição realiza a conferência de carga de forma inteiramente manual, exigindo que operadores verifiquem individualmente cada item antes do carregamento. Esse procedimento gera três categorias recorrentes de falhas operacionais:

- a) demora na verificação dos produtos, especialmente em períodos de alta demanda;

- b) divergências de quantidades, como falta ou excesso de mercadorias embarcadas;
- c) trocas indevidas de produtos entre pedidos distintos.

As consequências dessas falhas impactam diretamente a competitividade da empresa. Do ponto de vista logístico, a correção de erros após o embarque demanda retrabalho de retorno, reembarque e ajuste de documentação fiscal, elevando os custos operacionais. Do ponto de vista comercial, entregas incorretas comprometem a confiança dos clientes. A ausência de um sistema de rastreabilidade automatizado impede a identificação do ponto exato de falha no fluxo operacional, dificultando a implementação de ações corretivas efetivas.

Diante desse cenário, a empresa identificou a necessidade de automatizar o processo de conferência por meio da tecnologia RFID, visando eliminar a dependência de verificação manual e garantir a integridade dos registros de expedição. Nesse contexto, define-se a seguinte questão de pesquisa: como o desenvolvimento de um sistema baseado em tecnologia RFID de baixo custo pode mitigar os erros humanos e aumentar a eficiência dos processos de conferência e carregamento na empresa parceira?

### **1.3 Justificativa**

A relevância deste trabalho fundamenta-se em três dimensões: prática, técnica e acadêmica, que justificam a necessidade de documentar o desenvolvimento de arquiteturas RFID de baixo custo para ambientes logísticos.

Do ponto de vista prático, a automação da conferência de carga responde a uma demanda concreta da empresa parceira, cujo setor de expedição processa 800 fardos diários sob procedimentos manuais que geram divergências operacionais recorrentes. A implementação de uma solução baseada em RFID oferece à organização a oportunidade de modernizar processos críticos, reduzir custos com retrabalho logístico e fortalecer a confiabilidade perante seus clientes. Além disso, a validação técnica em ambiente controlado que simula o fluxo operacional real permite à empresa avaliar a viabilidade da tecnologia antes de comprometer investimentos em infraestrutura de produção.

Do ponto de vista técnico, este estudo endereça a lacuna identificada por Rejeb *et al.* (2020) sobre a escassez de documentação prática que demonstra o retorno sobre investimento em sistemas RFID. Diferentemente de soluções proprietárias baseadas em hardware industrial de alto custo (CAPEX), conforme apontado por Soesanto *et al.* (2024), este projeto propõe uma arquitetura modular que utiliza tecnologias abertas — Django como backend, Next.js no

frontend e leitor RFID nacional — viabilizando a adoção por empresas de médio porte que não dispõem de recursos para sistemas legados complexos. A estratégia de vinculação hierárquica de itens reduz a complexidade operacional e mitiga problemas de leitura simultânea de alta densidade, conforme documentados por Yusoff *et al.* (2021).

Do ponto de vista acadêmico, a pesquisa oferece três contribuições:

- 1 **Documentação replicável:** apresenta uma metodologia completa de especificação, desenvolvimento e validação de sistemas RFID integrados a dashboards web, servindo como referência técnica para projetos futuros em operações logísticas similares;
- 2 **Integração tecnológica:** demonstra a viabilidade de combinar firmware embarcado (ESP32/leitor RFID), API RESTful (Django) e interface responsiva (Next.js/TypeScript) em uma arquitetura coesa, consolidando a convergência entre engenharia de software e sistemas embarcados;
- 3 **Validação em ambiente controlado:** fornece dados quantitativos sobre desempenho (taxa de leitura de 95%, tempo de processamento de 30 ms) que estabelecem parâmetros de referência para a avaliação de protótipos similares antes da implementação em chão de fábrica.

Adicionalmente, este trabalho alinha-se ao esforço nacional de disseminação de conhecimento sobre Internet das Coisas (IoT) aplicada à indústria, complementando estudos recentes que também exploraram a integração de RFID com plataformas web, como Oliveira (2025), que utilizou ESP32 e Django em contexto acadêmico, mas sem abordar a validação em fluxos operacionais com nota fiscal eletrônica (NF-e).

## 1.4 Objetivos

Esta seção apresenta os objetivos do projeto, definidos para solucionar os problemas de conferência manual identificados na empresa. As metas foram organizadas em objetivo geral e objetivos específicos, detalhando os passos necessários para a implementação e validação da tecnologia RFID.

### 1.4.1 Objetivo geral

Desenvolver e documentar o processo de implementação da infraestrutura necessária para a utilização de tecnologia RFID no setor de expedição da empresa parceira, com o intuito de modernizar e digitalizar a gestão do estoque, e reduzir falhas humanas referentes às inspeções dos produtos.

#### 1.4.2 Objetivos específicos

- Avaliar métricas de desempenho do sistema RFID, incluindo taxa de leitura e tempo de processamento, para validar a viabilidade operacional da solução.
- Analisar a viabilidade técnica da solução e seu impacto potencial na eficiência das operações de logística.
- Desenvolver e validar um protótipo funcional da solução em ambiente controlado que simule o fluxo de operação.
- Desenvolver uma interface para visualização do inventário e acompanhamento dos processos de carregamento.

Para atingir as metas propostas, o restante deste artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a fundamentação teórica e a análise de trabalhos correlatos que embasam o projeto. A Seção 3 detalha a metodologia, descrevendo a arquitetura de hardware e software desenvolvida. Por fim, a Seção 4 discute os resultados obtidos nos testes funcionais do protótipo, seguidos pelas considerações finais.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

A gestão eficiente de estoques e a rastreabilidade de produtos são desafios centrais na logística moderna. Enquanto métodos tradicionais baseados em códigos de barras exigem contato visual direto e processos manuais propensos a erros, a transição para sistemas automatizados tem sido impulsionada pela adoção da Internet das Coisas (IoT) e da Identificação por Radiofrequência (RFID). Esta seção analisa o estado da arte e a técnica relacionada ao desenvolvimento de sistemas de gerenciamento de armazém baseado em arquiteturas de baixo custo e *frameworks* de código aberto, fundamentando as escolhas tecnológicas adotadas neste projeto.

### 2.1 Comparativo Tecnológico e Eficiência

Para compreender a evolução dessas tecnologias, Rejeb *et al.* (2020) realizaram uma análise bibliométrica abrangente processando dados de 807 artigos publicados ao longo de duas décadas. O estudo identifica que o RFID é a tecnologia mais citada na literatura, consolidando-se como a "espinha dorsal" para a rastreabilidade é um pilar fundamental para a

Indústria 4.0. Contudo, a revisão aponta que, apesar do alto volume de publicações, existe uma escassez de casos de negócios práticos que demonstram o retorno sobre o investimento, além de desafios técnicos persistentes relacionados à segurança, privacidade e à integração com práticas organizacionais existentes.

A superioridade do RFID sobre métodos ópticos é amplamente discutida na literatura. Chen *et al.* (2022) desenvolveram um estudo prático comparando sistemas manuais com sistemas baseados em RFID, demonstrando que a tecnologia de radiofrequência permite uma redução significativa nos custos de mão de obra e no tempo de verificação de ativos industriais. Contudo, os autores alertam que a robustez do sistema é sensível a interferências eletromagnéticas (EMI) presentes no chão de fábrica, exigindo o uso de etiquetas com blindagem anti-metal para garantir a confiabilidade da leitura em equipamentos metálicos.

Corroborando essa visão, Soesanto *et al.* (2024) destacam que, especificamente em períodos de pico operacional, a capacidade de leitura em massa (sem visada direta) do RFID é o único meio viável de manter a acuracidade do estoque sem interromper o fluxo logístico. Apesar dos ganhos operacionais, o estudo aponta como limitação o alto custo de investimento inicial (CAPEX) da infraestrutura UHF e a complexidade de redesenhar os processos físicos do armazém para acomodar a tecnologia, o que dificulta a adoção imediata por empresas de menor porte. Diante dessas barreiras financeiras e técnicas, torna-se necessário explorar arquiteturas alternativas que mantenham a eficiência da identificação automática, mas que fujam dos custos proibitivos das soluções industriais tradicionais.

## **2.2 Arquiteturas de Baixo Custo e IoT**

Uma tendência forte na pesquisa recente é a migração de soluções proprietárias caras para arquiteturas modulares de baixo custo. Bandara, Simpson e Sun (2024) validam essa abordagem ao apresentar um sistema de gestão de inventário focado na eficiência de custo, utilizando microcontroladores acessíveis para criar pontos de leitura distribuídos. No entanto, os autores ressaltam como limitação a necessidade de um posicionamento estratégico de múltiplos leitores para cobrir áreas maiores, dado o alcance reduzido dos módulos de baixo custo em comparação aos portais industriais.

Além da simples identificação, a precisão na localização de ativos é analisada por Vaccari *et al.* (2024) em uma revisão sobre sistemas de posicionamento *indoor* para logística. Os autores comparam o RFID com tecnologias de alta precisão (como UWB) e concluem que, embora o RFID passivo seja a solução mais econômica e amplamente adotada, ele sofre

degradação significativa de sinal devido ao efeito *multipath* em ambientes com presença de metais e líquidos. Como limitação, o estudo aponta que a acurácia do RFID (geralmente na casa dos metros) é insuficiente para a navegação autônoma de robôs (AGVs) em corredores estreitos, sugerindo a necessidade de sistemas híbridos para cenários que exigem precisão milimétrica.

Expandindo o escopo para a segurança patrimonial, Ramly, Supirno e Hasibuan (2025) desenvolveram um sistema integrado de monitoramento de almoxarifado que une RFID, sensores de fumaça e câmeras de Circuito Fechado de Televisão (CCTV) em uma plataforma IoT única baseada no ESP32. Embora a solução reduza custos ao unificar sistemas, os autores apontam que a dependência da conectividade Wi-Fi contínua e a latência da comunicação com a nuvem podem comprometer a resposta em tempo real em ambientes com infraestrutura de rede instável.

Na esfera da sustentabilidade, Yusoff, Ishak e Alezabi (2021) exploram o conceito de "*Green IoT*", propondo o uso de etiquetas RFID passivas para minimizar o consumo energético em armazéns inteligentes. O estudo, contudo, identifica o problema de "colisão de tags" (leitura simultânea de múltiplos itens) e a eficiência energética dos leitores ativos como barreiras técnicas que ainda exigem otimização em cenários de alta densidade de produtos.

No contexto de integração e impacto gerencial, Jarašūnienė, Čižiūnienė e Čereška (2023) investigaram como a adoção massiva de IoT transforma a administração de armazéns ao permitir o monitoramento de ativos e a previsão de demandas em tempo real. Embora os autores confirmam que a tecnologia melhora significativamente a produtividade, eles identificam como limitação crítica os altos custos de manutenção da infraestrutura e a escassez de profissionais de TI qualificados para lidar com a governança desses dados complexos.

Essa complexidade reflete-se diretamente na implementação prática. Avaliando a implementação prática, Yakkaluri (2024) realizou uma avaliação operacional da implantação de IoT e RFID em armazéns de *e-commerce*. O autor conclui que, apesar da redução de custos operacionais a longo prazo, a principal limitação reside nas barreiras organizacionais, especificamente a resistência à mudança por parte das equipes e a necessidade de treinamento extensivo para operar os novos sistemas digitais.

Além dos desafios humanos, questões técnicas globais também impactam a precisão. Focando na acuracidade do inventário, Budiyanto e Muslim (2024) investigaram o impacto do RFID na redução de erros em cadeias de suprimentos complexas. O trabalho destaca que, embora a tecnologia melhore a visibilidade, a falta de padronização universal e os problemas



de interoperabilidade entre diferentes fabricantes de *hardware* IoT ainda representam desafios significativos para a integração fluida entre diferentes parceiros logísticos.

Por fim, nesse contexto nacional, Oliveira (2025) apresenta uma implementação prática alinhada a este desafio, utilizando o microcontrolador ESP32 e o *framework* Django. O autor demonstra que a combinação de *hardware* de prototipagem com *software web* robusto é suficiente para garantir a confiabilidade no controle de entrada e saída de mercadorias em pequenas e médias operações. Contudo, por se tratar de um protótipo acadêmico, o trabalho limita-se a testes em ambiente controlado, não abordando a robustez física necessária (como blindagem contra poeira e impacto) para o uso contínuo em chão de fábrica industrial. Uma vez definida a arquitetura de *hardware* acessível e conhecidas suas restrições, o desafio seguinte consiste em estabelecer como esses dispositivos se comunicam e centralizam os dados de forma eficiente.

### **2.3 Integração Web e Frameworks Open Source**

A centralização dos dados em sistemas *web* é outro ponto de convergência nos trabalhos analisados. Tejesh e Neeraja (2018) propõem uma arquitetura onde a leitura física é desacoplada da lógica de negócios, utilizando um servidor central para processar os dados vindos de múltiplos leitores via rede Wi-Fi. Embora essa abordagem simplifique a escalabilidade lógica, os autores ressaltam que o alcance limitado do *hardware* de leitura utilizado no protótipo exige a instalação de antenas externas adicionais para cobrir efetivamente a área física de um armazém real.

Avançando para a validação de arquiteturas modernas, Sunder *et al.* (2025) desenvolveram uma plataforma de gestão de ativos utilizando o *framework* Django (Python) integrado a leitores RFID e microcontroladores Arduino. A solução demonstra a viabilidade de *frameworks open source* para criar *dashboards* de monitoramento em tempo real. Contudo, os autores apontam como limitação o fato de o sistema ser um protótipo de laboratório, sem testes de escalabilidade para múltiplos leitores simultâneos ou mecanismos robustos de autenticação, o que deixa em aberto questões sobre a segurança na produção.

Na mesma linha de integração com a nuvem, Özkurt (2024) descreve um sistema que integra leitores RFID com plataformas de banco de dados em tempo real (Firebase), alcançando uma redução expressiva nas divergências de inventário através da sincronização automática. Apesar da eficiência na gestão de dados, o autor aponta que a arquitetura depende

criticamente de uma conexão estável com a *internet*, em que oscilações na rede podem comprometer a sincronização instantânea e a integridade do monitoramento em tempo real.

Similarmente, Du (2021) detalha uma arquitetura baseada em navegador (*browser-server*) para logística inteligente, reforçando que a interface *web* é a ferramenta ideal para permitir que gestores monitorem o fluxo de paletes remotamente. Contudo, o estudo adverte que a adoção de sistemas puramente *web* introduz vulnerabilidades de segurança cibernética, exigindo a implementação de protocolos de criptografia robustos para proteger os dados corporativos que trafegam em redes abertas. A união dessas camadas de *hardware* e *software* culmina na aplicação prática em sistemas completos de gerenciamento.

Como resposta aos problemas de segurança e confiança na integridade dos dados, Jabbar *et al.* (2021) analisam a integração de IoT e RFID com a tecnologia *Blockchain*. Nessa arquitetura, a rastreabilidade segura e a imutabilidade dos dados eliminam a possibilidade de adulteração de estoques. Contudo, os autores alertam para o desafio crítico da escalabilidade e latência: o tempo de confirmação das transações na *blockchain* é significativamente mais lento que em bancos de dados tradicionais, o que pode criar gargalos em operações logísticas de alto volume, exigindo soluções de *off-chain* (processamento fora da cadeia) para garantir a performance necessária.

## **2.4 Aplicação Prática em Gestão de Armazém (WMS)**

A aplicação dessas tecnologias em cenários reais revela desafios e benefícios que variam conforme a escala. No setor de *e-commerce*, Hehua (2021) aplicou etiquetas RFID passivas em um armazém de *cross-border*, reduzindo o tempo de operação e os custos de mão de obra em 30% através da automação do *picking*. Embora demonstre ganhos significativos, o estudo ressalta que a alta densidade de itens metálicos gerou zonas de sombra na leitura, exigindo o treinamento intensivo dos operadores para a coexistência com o sistema automatizado.

Já em escala industrial complexa, Pan e Liu (2021) implementaram um WMS completo integrando RFID e redes de sensores sem fio (WSN) a um sistema ERP de *supply chain*. O sistema otimizou o recebimento e a distribuição em um armazém real, atingindo alta acurácia. No entanto, os autores identificam como barreira crítica o alto custo de *retrofit* (adaptação) da infraestrutura existente e a dificuldade de integrar os dados dos sensores com ERPs comerciais legados que não foram desenhados para o fluxo de dados da IoT.

No ápice da automação, Hu *et al.* (2023) construíram um sistema de Gêmeo Digital (*Digital Twin*) para um armazém vertical (*stereo warehouse*) de cadeia de frio, integrando dados de etiquetas RFID e sensores ambientais para espelhar a operação física em tempo real. A solução permitiu a visualização dinâmica do estoque e o monitoramento térmico preciso, reduzindo a taxa de perda de produtos. Entretanto, o estudo destaca que a construção desse modelo exige a fusão complexa de dados heterogêneos de múltiplas fontes (sensores, PLC, RFID), o que eleva a dificuldade de implementação e exige uma infraestrutura de comunicação robusta para garantir a sincronização entre o modelo e a realidade sem atrasos críticos.

Por fim, a aplicação dessas tecnologias em um WMS (*Warehouse Management System*) completo é documentada por Ngaboyimbere (2021). Em sua dissertação, o autor implementa um ciclo completo de rastreamento, englobando desde o recebimento até a expedição, e conclui que a automação via RFID elimina o "erro humano" na digitação de dados, garantindo que o sistema ERP reflita a realidade do chão de fábrica. Entretanto, o autor ressalta que a validação do sistema restringiu-se a um estudo de caso específico (ROK Industries), sugerindo que a aplicação em larga escala demanda estudos adicionais sobre a viabilidade econômica da infraestrutura e a integração com sistemas de TI legados mais complexos. Para consolidar o entendimento sobre as diferentes abordagens e tecnologias discutidas até aqui, apresenta-se a seguir uma síntese dos trabalhos selecionados.

## 2.5 Resumo

A tabela 1 apresenta a síntese dos trabalhos relacionados selecionados, destacando suas principais contribuições para a fundamentação deste projeto.

Tabela 1 – Resumo dos Trabalhos Relacionados

Autores / Ano	Contribuição para o Projeto	Limitação
<b>Bandara et al. (2024)</b>	<b>Baixo Custo:</b> Valida o uso de microcontroladores acessíveis para criar pontos de leitura distribuídos.	O alcance reduzido dos módulos exige posicionamento estratégico (muitos leitores).

<b>Budiyanto &amp; Muslim (2024)</b>	<b>Acurácia:</b> Revisão narrativa comprovando redução de erros em cadeias complexas.	Falta de padronização universal e problemas de interoperabilidade entre fabricantes.
<b>Chen et al. (2022)</b>	<b>Eficiência:</b> Comprova redução de custos e tempo comparado a métodos manuais.	Sensibilidade a interferências eletromagnéticas (EMI) em ambientes com metais.
<b>Du (2021)</b>	<b>Interface Web:</b> Valida arquitetura baseada em navegador para monitoramento remoto.	Riscos de cibersegurança e falta de criptografia em sistemas puramente web.
<b>Hehua (2021)</b>	<b>E-commerce:</b> Estudo de caso com redução de 30% nos custos de mão de obra e tempo.	Zonas de sombra em alta densidade de itens; exige treinamento dos operadores.
<b>Hu et al. (2023)</b>	<b>Digital Twin:</b> Gêmeo Digital de armazém vertical com monitoramento físico-digital em tempo real.	Complexidade na fusão de dados heterogêneos e exigência de infraestrutura robusta.
<b>Jabbar et al. (2021)</b>	<b>Blockchain:</b> Integração para segurança e imutabilidade dos dados de rastreabilidade.	Problemas de escalabilidade e latência (lentidão) em transações de alto volume.
<b>Jarašūnienė et al. (2023)</b>	<b>Impacto Gerencial:</b> Monitoramento de ativos e previsão de demanda em tempo real.	Alto custo de manutenção da infraestrutura e escassez de mão de obra de TI qualificada.
<b>Ngaboyimbere (2021)</b>	<b>Ciclo WMS:</b> Implementação completa (recebimento a expedição) automatizada.	Validação restrita a estudo de caso único; não aborda integração com sistemas legados.

<b>Oliveira (2025)</b>	<b>Stack Tecnológico:</b> Precedente direto do uso de ESP32 com Framework Django.	Protótipo acadêmico; falta robustez física (blindagem) para chão de fábrica.
<b>Özkurt (2024)</b>	<b>Nuvem:</b> Sincronização em tempo real com Firebase reduz divergências de estoque.	Dependência crítica de conexão estável com a internet; latência na sincronização.
<b>Pan &amp; Liu (2021)</b>	<b>Indústria:</b> Integração de RFID e WSN com ERP para <i>supply chain</i> .	Custo elevado de <i>retrofit</i> (adaptação) da infraestrutura e dificuldade de integração.
<b>Ramly et al. (2025)</b>	<b>Segurança Patrimonial:</b> Integração de RFID com sensores (fumaça/CCTV) no ESP32.	Latência da comunicação Wi-Fi pode comprometer a resposta em tempo real.
<b>Rejeb et al. (2020)</b>	<b>Bibliometria:</b> Análise de 807 artigos consolidando RFID como espinha dorsal da rastreabilidade.	Escassez de casos de negócios práticos (ROI) e desafios de integração organizacional.
<b>Soesanto et al. (2024)</b>	<b>Leitura em Massa:</b> Valida eficiência do RFID UHF em picos operacionais (sem visada).	Alto CAPEX (custo inicial) e complexidade de redesenho dos processos físicos.
<b>Sunder et al. (2025)</b>	<b>Software Livre:</b> Valida Django + Python como <i>backend</i> robusto para gestão de ativos.	Protótipo em rede local (LAN); falta de testes de carga e autenticação robusta.
<b>Tejesh &amp; Neeraja (2018)</b>	<b>Arquitetura:</b> Propõe desacoplamento entre leitura física (Wi-Fi) e lógica de negócios.	Hardware de prototipagem com alcance limitado exige antenas externas extras.

<b>Vaccari et al. (2024)</b>	<b>Localização Indoor:</b> Compara RFID vs. UWB; valida RFID como melhor custo-benefício.	Precisão métrica insuficiente para robôs autônomos; degradação por efeito <i>multipath</i> .
<b>Yakkaluri (2024)</b>	<b>Implementação:</b> Avaliação operacional em armazéns de e-commerce.	Barreiras organizacionais: resistência das equipes à mudança e necessidade de treino.
<b>Yusoff et al. (2021)</b>	<b>Green IoT:</b> Uso de etiquetas passivas para eficiência energética.	Problema de "colisão de tags" em leitura simultânea de alta densidade.

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3 METODOLOGIA

O procedimento adotado para o desenvolvimento da solução de automação logística na empresa parceira é descrito nesta seção. O trabalho consiste na substituição da conferência manual por um sistema de Identificação por Radiofrequência (RFID), com o objetivo de mitigar erros operacionais e aumentar a eficiência no setor de expedição.

#### 3.1 Natureza da Pesquisa e Abordagem Metodológica

A pesquisa classifica-se como aplicada, com a finalidade de gerar conhecimentos para a solução de problemas da indústria. A abordagem é qualitativa e quantitativa: qualitativa no mapeamento dos fluxos logísticos, detalhados na Figura 2, e quantitativa na definição de métricas do desafio da empresa parceira, como a meta de redução de 50% no tempo de conferência e aumento de 30% na produtividade.

O desenvolvimento seguiu o ciclo de sistemas embarcados, estruturado nas seguintes etapas:

1. Mapeamento de processos e diagnóstico;
2. Justificativa da tecnologia RFID UHF;

3. Especificação e orçamentação de hardware;
4. Desenvolvimento do backend;
5. Desenvolvimento do frontend;
6. Validação lógica.

### **3.2 Mapeamento de Processos e Diagnóstico**

O mapeamento do fluxo logístico da empresa parceira, ilustrado na Figura 2, ocorreu por meio de visitas ao chão de fábrica. Constatou-se uma produção de 800 fardos ao dia, identificados por códigos de barras nos padrões *Global Trade Item Number* (GTIN) 13 e 14.

#### **3.2.1 Modelagem BPMN**

A formalização do fluxo foi realizada pela notação *Business Process Model and Notation* (BPMN), conforme apresentado na Figura 2, com uso da ferramenta *draw.io*.<sup>8</sup> O processo foi dividido em:

1. Setor de Produção: fabricação, aplicação de etiquetas RFID e paletização.
2. Setor de Expedição: emissão da Nota Fiscal Eletrônica (NF-e) e carregamento.

O diagnóstico indicou a conferência manual como o gargalo logístico, o que gerava retrabalho em função do volume de carga.

### **3.3 Justificativa da Tecnologia RFID UHF**

A adoção da tecnologia RFID UHF (*Ultra-High Frequency*) fundamentou-se na leitura sem linha de visada, em substituição aos métodos ópticos. Em cenários de empilhamento de fardos em carrinhos de carga, a sobreposição impede a identificação de itens por câmeras ou *scanners*. O sistema utiliza o protocolo EPC *Gen 2* (GS1, 2015) para estabelecer a arquitetura de dados. A solução utiliza uma relação hierárquica do tipo *parent-child*: cada fardo recebe uma etiqueta na produção. Ao final da montagem do palete, ocorre o vínculo lógico de uma tag mestre aos itens. Essa estratégia permite a conferência na expedição por meio da leitura da

---

<sup>8</sup> Disponível em: <https://app.diagrams.net/>. Maiores detalhes sobre a aplicação da ferramenta no mapeamento de processos encontram-se no tópico 3.2.1.

tag do palete, o que assegura a rastreabilidade e a conformidade com a NF-e, sem a necessidade de descarregamento para conferência.

### **3.4 Especificação e Orçamentação de Hardware**

A definição da arquitetura de hardware fundamentou-se na comparação entre o uso de equipamentos de prateleira (*off-the-shelf*) e o desenvolvimento de soluções por prototipagem. A opção pela aquisição de hardware foi definida com a empresa parceira para garantir a segurança e o suporte técnico dos fabricantes. Essa abordagem reduz a responsabilidade da empresa pela manutenção de hardware, que careceria de respaldo. O cronograma do projeto motivou a escolha, visto que a importação de componentes para prototipagem possui prazos de entrega de 60 dias, o que comprometeria os prazos da residência.

#### ***3.4.1 Pesquisa de Mercado***

A prospecção de soluções compreendeu a consulta aos mercados nacional e internacional, abrangendo fornecedores de componentes eletrônicos, leitores RFID e insumos industriais. Os critérios de seleção fundamentaram-se no custo-benefício, na durabilidade dos equipamentos e na disponibilidade de suporte em português ou inglês, com o objetivo de assegurar a viabilidade da implementação na unidade da empresa parceira.

#### ***3.4.2 Seleção Final***

A seleção dos componentes priorizou o prazo de aquisição e a mitigação de riscos de engenharia de Radiofrequência (RF), com o objetivo de assegurar a estabilidade da operação e o cumprimento do cronograma. Os itens definidos para a implementação são:

1. Leitor RFID Fixo (Via Onda M-ID10W): equipamento selecionado pelo custo e por ser uma solução nacional com garantia de um ano. O hardware atende aos requisitos de alcance (até 2 metros) e padrão de leitura do projeto.
2. Etiquetas RFID UHF (Haco ou Via Onda): definido o modelo Haco HCA-M7307319-BOPP pelo custo unitário para fornecimento em escala, enquanto a alternativa da Via Onda, modelo V-GEN001, é mantida para assegurar a interoperabilidade com o hardware de leitura.



3. Unidade de Processamento (Raspberry Pi 5 - 4GB RAM): a escolha fundamenta-se na estabilidade e na execução dos serviços de interface. Embora o fluxo de dados não demande a capacidade de processamento desta unidade, a opção visa a mitigação de riscos na iteração inicial do projeto. O uso de hardware com overhead computacional assegura que a latência do sistema e os gargalos de processamento não ocorram durante a integração dos protocolos de comunicação RFID. A disponibilidade do suporte e a confiabilidade dos componentes garantem a continuidade dos testes em ambiente fabril sem interrupções por falhas de hardware.
4. Interface de Visualização (Monitores Samsung ou Dell): o uso de monitores, como o Samsung S3 32" (modelo LS32B300NWNXZD) ou o Dell Pro 24 Plus 24" (modelo P2424HT), justifica-se pela necessidade de fornecer à equipe a visualização em tempo real da contagem de fardos e da conferência de dados da nota fiscal. A interface permite a validação da carga e a correção de divergências no setor de expedição, antes do carregamento.

### **3.5 Desenvolvimento do Backend**

A linguagem de programação Python (versão 3.11.18) foi selecionada como base tecnológica para o desenvolvimento do *backend* da solução. O *framework* Django (versão 5.2.7) foi empregado para a estruturação do núcleo do sistema, complementado pelo *Django Rest Framework* (DRF, versão 3.16.1). A escolha dessa *stack* tecnológica fundamentou-se na produtividade para a construção de *APIs RESTful*, na maturidade da comunidade de suporte e na estabilidade para o ambiente industrial, visando o desempenho e a comunicação de dados entre os dispositivos de hardware e o sistema central.

A arquitetura do sistema seguiu um modelo modular, estruturado em componentes para o gerenciamento de cada entidade de negócio. Essa organização visa a manutenção do código, a escalabilidade e o isolamento das responsabilidades de cada funcionalidade. A *API* gerencia os dados do sistema logístico, abrangendo o controle de usuários, o catálogo de produtos, a gestão de paletes, o rastreamento de itens via RFID, o processamento de notas fiscais e o registro de inspeções de qualidade. A persistência de dados ocorre por meio do *Object-Relational Mapping* (ORM) do Django, o que permite a abstração da camada de banco de dados e a segurança nas operações de leitura e escrita.

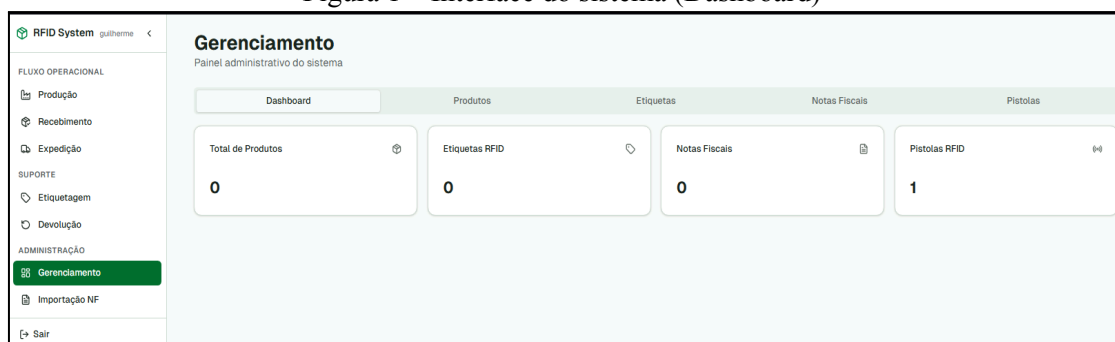
A segurança e a autenticação na *API* foram implementadas pelo padrão *JSON Web Token (JWT)*, com o pacote *django-rest-framework-simplejwt* (versão 5.5.1). Esse mecanismo estabelece um protocolo para a autorização de acesso aos *endpoints*, para que usuários autenticados executem ações como a associação de um produto a um código RFID ou a baixa de uma nota fiscal. O sistema utiliza o banco de dados *PostgreSQL* (versão 18.0) para a persistência dos dados, enquanto o *SQLite* (versão 3.50.0) foi utilizado durante a prototipagem e o desenvolvimento.

### 3.6 Desenvolvimento do Frontend

A interface de usuário (*frontend*) da solução foi desenvolvida com o *framework Next.js* (versão 15.5.4), em uma arquitetura baseada em *React* que utiliza recursos de renderização como *React Server Components (RSC)*. O uso do *Next.js* fundamenta-se na capacidade de carregamento da interface para o ambiente fabril com requisitos de baixa latência na visualização de dados. A linguagem *TypeScript* (versão 5.x) foi empregada no desenvolvimento para a aplicação de tipagem estática.

O design visual e a estilização do sistema foram implementados com o *framework Tailwind CSS* (versão 4.1.9) para a criação de uma interface de usuário responsiva, alinhada aos requisitos do sistema industrial. Para a base dos componentes de interface, utilizou-se a biblioteca *shadcn/ui* (estilo New York, versão 3.7.0), que fornece componentes acessíveis e semânticos para a fase de prototipagem. O tema de cores (variáveis *OKLCH*) foi definido em um esquema verde e branco em conformidade estética com a empresa parceira, conforme o layout apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Interface do sistema (Dashboard)



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 1 apresenta o *Dashboard* administrativo do sistema, que serve como a central de controle para a gestão logística. No menu lateral esquerdo, encontram-se os módulos operacionais (Produção, Recebimento e Expedição) e as ferramentas de suporte (Etiquetagem e Devolução). A área central exibe cards informativos que consolidam indicadores operacionais em tempo real, como o total de produtos, etiquetas RFID, notas fiscais e pistolas RFID. Essa interface possibilita ao gestor a visão da operação e o acesso às funcionalidades de importação de arquivos de Notas Fiscais Eletrônicas.

A arquitetura do *frontend* foi organizada em módulos, incluindo um sistema de contexto para gerenciamento de estado global. O fluxo de autenticação consome a *API RESTful* do *backend* para gerenciar *tokens* de acesso (JWT). A arquitetura de navegação foi segmentada para perfis de usuário operacional e administrativo, com acesso a módulos como "Produção", "Expedição" e "Gerenciamento". Ferramentas de validação, como *Zod* (versão 3.25.76) e *React Hook Form* (versão 7.60.0), garantem a integridade dos dados inseridos antes do envio ao *backend*. Para a visualização em tempo real dos indicadores operacionais no chão de fábrica, a biblioteca *Recharts* (versão 2.15.4) foi incorporada para a renderização de gráficos e *dashboards*.

### 3.7 Validação Lógica

A validação lógica do sistema foi realizada por meio de um protótipo de bancada, utilizado em função da indisponibilidade do hardware industrial UHF no período de testes. O procedimento consistiu na montagem de um sistema para a simulação do comportamento operacional e a verificação das regras de negócio implementadas no *backend*. Os recursos selecionados para esta etapa compreenderam o microcontrolador ESP32 e o módulo leitor RFID HF MFRC522, com operação na frequência de 13,56 MHz. A configuração fundamentou-se na similaridade do tratamento de dados de identificação para a execução dos testes de fluxo.

Tabela 2 – Pinagem da interface SPI

Sinal (MFRC522)	Pino (ESP32 GPIO)
SDA/SS	5
SCK	18
MOSI	23

MISO	19
RST	17

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 2 apresenta o mapeamento da interface *Serial Peripheral Interface* (SPI) para a integração entre o microcontrolador ESP32 e o leitor RFID MFRC522. A pinagem estabelece a conexão dos canais de comunicação: *Clock* (SCK), *Master Out Slave In* (MOSI), *Master In Slave Out* (MISO), *Slave Select* (SDA/SS) e *Reset* (RST). As definições de *General-Purpose Input/Output* (GPIO) são configuradas no projeto para a inicialização do leitor pelo *firmware* e a execução dos testes, validando a lógica do software antes da integração com o hardware industrial.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção de Resultados e Discussões concentra-se na avaliação funcional do sistema baseado em Identificação por Radiofrequência (RFID), na integração entre firmware, backend e frontend, e nos impactos observados na automação do processo de expedição, com ênfase na redução de erros operacionais e no aumento da confiabilidade dos registros logísticos.

### 4.1 Validação Funcional do Sistema RFID

O *firmware* demonstrou comportamento estável durante o ciclo de operação, utilizando cinco etiquetas rotuladas no sistema, sendo quatro associadas a produtos da empresa e uma a um pallet. O sistema manteve a captura contínua das leituras RFID e a transmissão dos dados ao backend conforme a disponibilidade da conexão de rede, vinculando os eventos ao final do processo a uma nota fiscal previamente cadastrada no sistema.

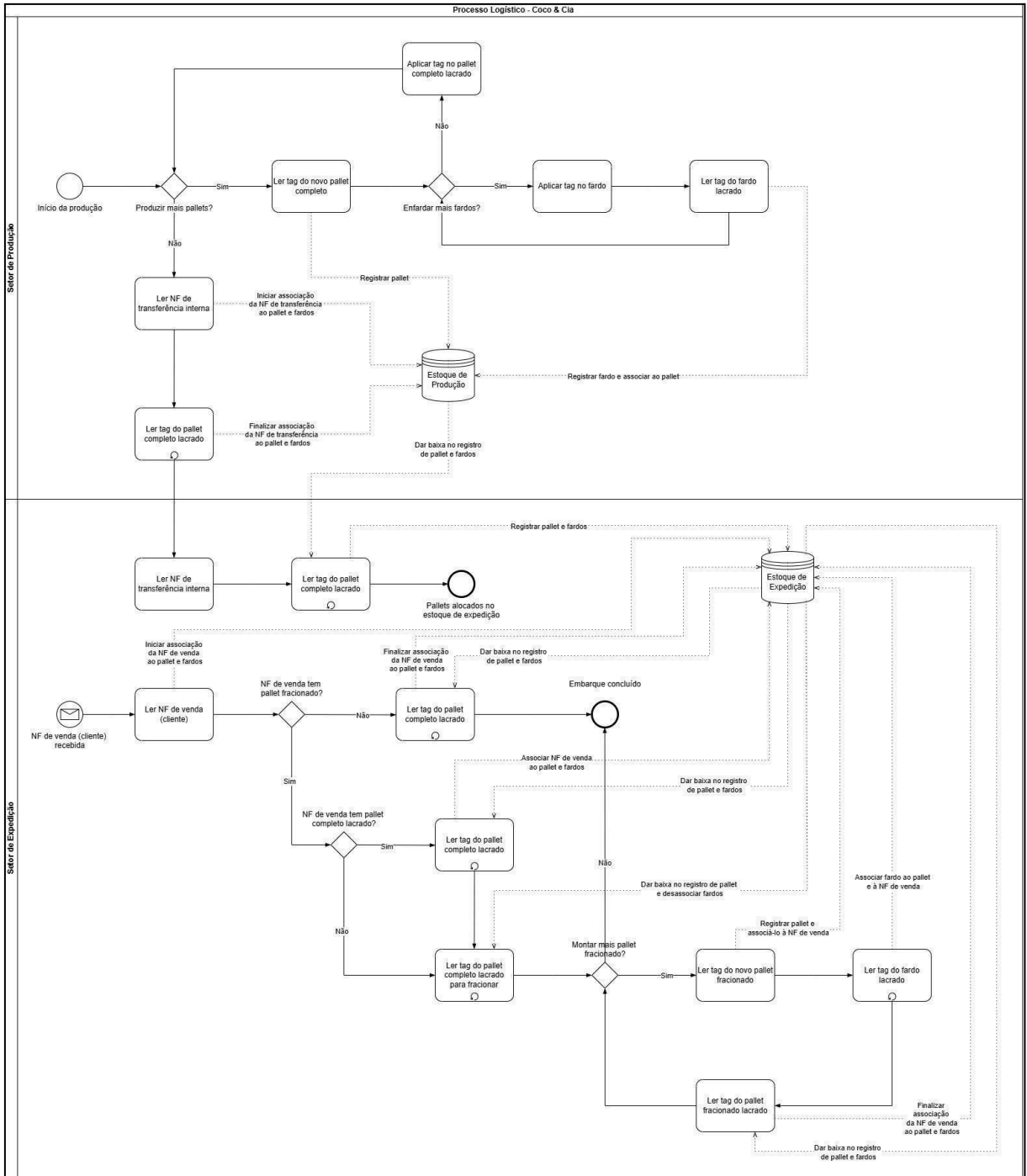
Durante os testes iniciais em ambiente de laboratório, realizados com o módulo RFID MFRC522, foi observada uma taxa média de sucesso de leitura de 95%, com tempo médio de processamento por evento de aproximadamente 30 ms, e o desvio padrão de 1.24 ms. Em cenários de falha temporária de conectividade, os eventos permaneceram armazenados no buffer até a restauração da comunicação, garantindo a consistência do fluxo de dados. O

sistema operou por um total de 12 horas ao longo do período de testes, divididas ao longo dos dias, caracterizando uma fase inicial de validação do firmware e do módulo utilizado.

#### **4.2 Automação do Processo Logístico e Confiabilidade Operacional**

A integração entre o sistema RFID e a aplicação de gestão logística permitiu a automação do processo de baixa de produtos, eliminando a necessidade de intervenção manual durante a operação de carregamento de pedidos. A modelagem BPMN na Figura 2 detalha o fluxo logístico nos setores de produção e expedição.

Figura 2: Fluxo logístico automatizado nos setores de produção e expedição



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

No setor de produção, o procedimento compreende a identificação da tag do novo paleta para alocação no estoque, seguida pelo registro dos fardos e sua associação ao identificador do paleta mestre. O encerramento desta etapa ocorre por meio da leitura da Nota Fiscal de transferência interna, que executa a baixa no estoque de produção e o redirecionamento dos registros para o estoque de expedição.

No setor de expedição, a captura da Nota Fiscal de venda inicia a separação, abrangendo o envio de paletes completos ou o fracionamento de volumes. No processo de

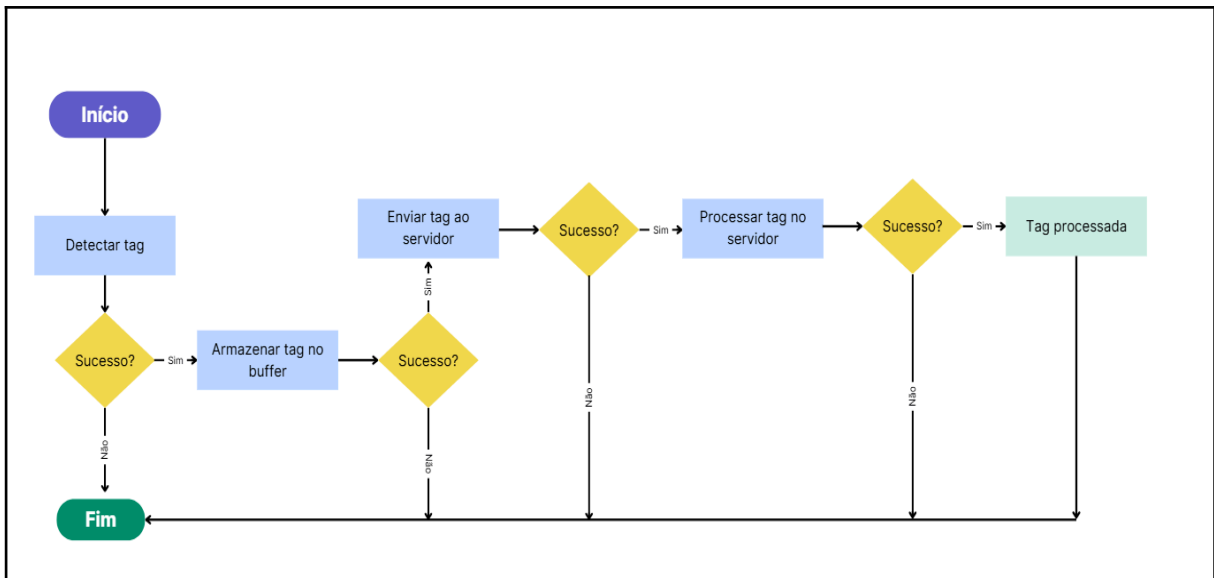
fracionamento, o sistema realiza a desvinculação dos fardos do palete original, associa-os a um novo identificador e conclui o embarque com a baixa no estoque de expedição. A leitura das tags RFID atua como gatilho direto para a atualização do estado dos itens no sistema.

A automação do fluxo apresenta potencial para mitigar inconsistências operacionais previamente associadas a lançamentos manuais, como divergências na quantidade de produtos processados. De forma esperada, a redução de erros humanos pode contribuir para maior confiabilidade dos registros e para a padronização dos procedimentos operacionais.

### 4.3 Feedback Visual e Interatividade do Sistema

Os testes evidenciaram a correta interoperabilidade entre as camadas do sistema, observada por meio do fluxo contínuo e consistente de dados desde a leitura das tags RFID até o registro no backend, mesmo em cenários de falha temporária de conectividade, validando a arquitetura modular proposta. O fluxo de dados iniciou-se na captura e envio dos eventos RFID (simulados via firmware), seguido pelo processamento das regras de negócio no backend e finalizando no processamento da tag RFID. É possível enxergar todo o processo no Fluxograma da Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma de testes.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A entrada de dados no sistema foi validada através do módulo de importação de Notas Fiscais Eletrônicas (NF-e). Conforme apresentado na Figura 4, o sistema é capaz de realizar o *parsing* (análise sintática) de arquivos XML complexos, extraindo automaticamente dados críticos como número da nota, cliente destinatário e itens comerciais. O frontend apresenta um

feedback imediato do conteúdo processado pelo backend antes da persistência no banco de dados, mitigando erros de entrada.

Figura 4 – Interface de processamento de XML.



Fonte: Elaborada pelo autor.

No que tange à gestão dos identificadores RFID, a interface de etiquetagem (Figura 5) demonstrou a capacidade de atualização em tempo real. O sistema exibe o status das etiquetas (Ativo/Inativo) e o histórico recente de cadastros, confirmando que as requisições assíncronas entre frontend e backend estão operando com baixa latência, permitindo que o operador visualize o registro da tag instantes após a leitura física.

Figura 5 – Painel de cadastro de etiquetas RFID



Fonte: Elaborada pelo autor.

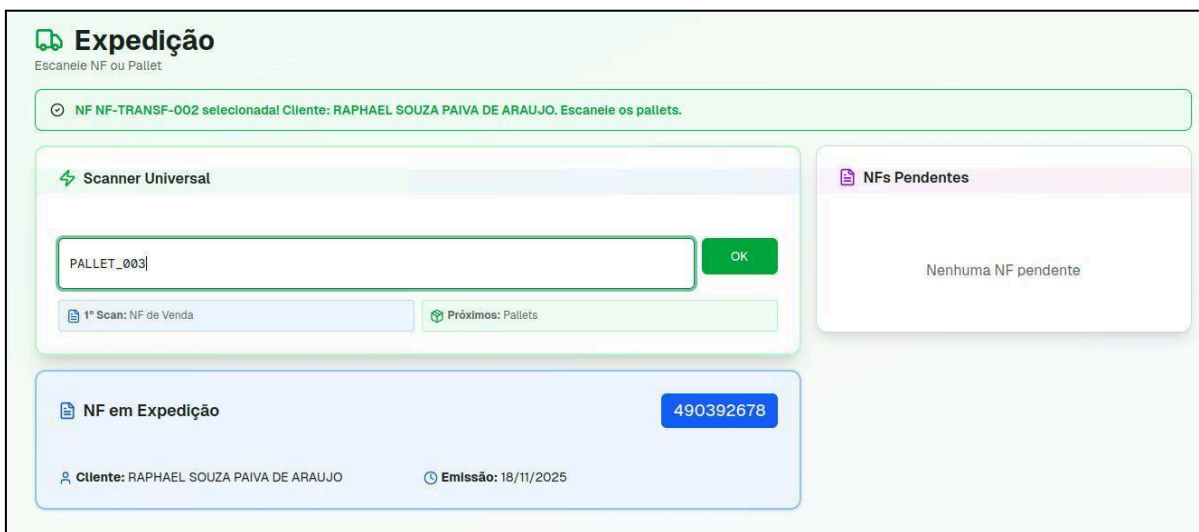
A validação das regras de negócio complexas foi observada nos fluxos operacionais de Produção e Expedição. A Figura 6 ilustra a segunda fase do processo de paletização, onde o frontend guia o operador através de etapas sequenciais. A interface bloqueia ações inválidas e confirma visualmente (por meio de mensagens de sucesso em verde) quando um Fardo (TAG RFID) é corretamente vinculado a um Pallet pai, comprovando a integridade relacional dos dados geridos pelo backend.

Figura 6 – Interface de operação de paletização

Fonte: Elaborada pelo autor.

Por fim, a segurança operacional foi validada no módulo de expedição (Figura 7). O sistema cruzou as informações da Nota Fiscal de saída com a leitura do Pallet no momento do embarque. A interface demonstra a capacidade do sistema de associar corretamente o cliente destinatário ao volume físico lido, garantindo que apenas itens pertencentes ao pedido selecionado sejam despachados, eliminando erros de inversão de carga.

Figura 7 – Módulo de expedição com validação cruzada entre Nota Fiscal e leitura RFID



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.4 Considerações sobre Replicabilidade e Próximos Passos

A metodologia descrita juntamente com os resultados alcançados em laboratórios permite que a solução seja replicada em outras unidades industriais que utilizem sistemas de gestão baseados em NF-e. Embora os testes físicos de radiofrequência (interferência de líquidos e metais) ainda não tenham ocorrido devido à fase de aquisição de equipamentos, toda a infraestrutura lógica de software e comunicação está validada em ambiente de laboratório.

Como passo futuro imediato, recomenda-se a elaboração e a execução do plano de testes de campo utilizando o leitor Via Onda M-ID10W e o Raspberry Pi 5, para ajustar as potências de transmissão das antenas e validar a acurácia em ambiente industrial real.

## 5 CONCLUSÃO

Em conclusão, este estudo demonstra a viabilidade técnica de uma infraestrutura baseada em tecnologia RFID UHF para a automação do setor de expedição. A pesquisa responde à problemática ao demonstrar que a solução estabelece os requisitos para a rastreabilidade de itens e para a automação de processos. O sistema possibilita a transição do método manual para o gerenciamento digital do estoque, com o intuito de mitigar as falhas operacionais.

A metodologia fundamenta-se na pesquisa aplicada com o desenvolvimento de *backend* e *frontend* integrados a um protótipo de bancada para a validação das regras de negócio. O percurso metodológico permite a simulação do comportamento do sistema e a verificação do *firmware* em ambiente controlado. Esta abordagem assegura a integridade lógica do fluxo de dados antes da implementação definitiva no chão de fábrica.

Os resultados obtidos em laboratório indicam o desempenho técnico para o processamento de informações. O tempo médio de 30 ms por evento apresenta uma capacidade de resposta que se alinha à celeridade operacional descrita por Chen *et al.* (2022), embora a ausência de um marco temporal do processo manual impeça a mensuração exata da redução de tempo neste estágio. Enquanto Soesanto *et al.* (2024) destacam a leitura em massa como recurso para a acurácia, este projeto aprimora a necessidade por meio do vínculo hierárquico entre fardos e paletes. Esta estratégia assegura a integridade do estoque com a leitura da tag mestre e reduz a dependência da captura física de todos os fardos simultaneamente. Adicionalmente, o projeto contempla o ciclo desde a produção até a expedição, o que expande a cobertura tecnológica documentada por Ngaboyimbere (2021).

Esta pesquisa demonstra a viabilidade da arquitetura proposta para a automação logística. Como o projeto permanece em fase de testes laboratoriais, a falta de dados sobre o impacto de interferências eletromagnéticas (EMI) e metais na precisão das leituras constitui uma limitação. Recomenda-se, como etapa seguinte, a avaliação desses fatores ambientais em ambiente fabril real. O trabalho estabelece a base tecnológica para a inovação em sistemas de gestão de expedição.

## REFERÊNCIAS

- BANDARA, Imasha; SIMPSON, Oluyomi; SUN, Yichuang. Optimizing Efficiency Using a Low-Cost RFID-Based Inventory Management System. *In: 2024 INTERNATIONAL WIRELESS COMMUNICATIONS AND MOBILE COMPUTING (IWCMC). Proceedings...* IEEE, 2024. p. 1729-1733. Disponível em: [https://uhra.herts.ac.uk/id/eprint/14519/1/RFID\\_Lab\\_Inventory\\_Management\\_system\\_publication\\_Accepted.pdf](https://uhra.herts.ac.uk/id/eprint/14519/1/RFID_Lab_Inventory_Management_system_publication_Accepted.pdf). Acesso em: 15 jan. 2026.
- BUDIYANTO, Arief; MUSLIM, Moh. Optimizing Inventory Systems with RFID: A Narrative Review of Integration, Efficiency, and Barriers. **Sinergi International Journal of Logistics**, v. 1, n. 2, p. 129-140, 2024. Disponível em: <https://journal.sinergi.or.id/index.php/ijl/article/download/621/466>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- CHEN, Ming-Chih *et al.* Development of Inventory Management System Based on Radio Frequency Identification Technology. **Sensors and Materials**, v. 34, n. 3, p. 1163-1177, 2022. Disponível em: [https://sensors.myu-group.co.jp/sm\\_pdf/SM2880.pdf](https://sensors.myu-group.co.jp/sm_pdf/SM2880.pdf). Acesso em: 18 jan. 2026.
- DU, Chenglong. Logistics and Warehousing Intelligent Management and Optimization Based on Radio Frequency Identification Technology. **Journal of Sensors**, v. 2021, art. 2225465, 2021. DOI: 10.1155/2021/2225465. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1155/2021/2225465>. Acesso em: 18 jan. 2026.
- GS1. **EPC™ Radio-Frequency Identity Protocols Generation-2 UHF RFID Standard**, Version 2.0.1. [S.l.]: GS1, 2015. Disponível em: <https://www.gs1.org/standards/rfid/uhf-air-interface-protocol>. Acesso em: 21 jan. 2026.
- HEHUA, Min. Application of Passive Wireless RFID Asset Management in Warehousing of Cross-Border E-Commerce Enterprises. **Journal of Sensors**, v. 2021, art. 6438057, 2021. DOI: 10.1155/2021/6438057. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1155/2021/6438057>. Acesso em: 22 jan. 2026.
- HU, Bin *et al.* Construction of Digital Twin System for Cold Chain Logistics Stereo Warehouse. **IEEE Access**, v. 11, p. 73850-73862, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3295819. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=10184421>. Acesso em: 25 jan. 2026.
- JABBAR, Sohail *et al.* Blockchain-enabled supply chain: analysis, challenges, and future directions. **Multimedia Systems**, v. 27, n. 4, p. 787-806, 2021. DOI: 10.1007/s00530-020-00687-0. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00530-020-00687-0.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2026.
- JARAŠŪNIENĖ, Aldona; ČIŽIŪNIENĖ, Kristina; ČEREŠKA, Audrius. Research on Impact of IoT on Warehouse Management. **Sensors**, v. 23, n. 4, art. 2213, fev. 2023. DOI: 10.3390/s23042213. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/4/2213/pdf>. Acesso em: 21 jan. 2026.

LEÃO, Airton Pereira da Silva *et al.* **Logística nas organizações: um diferencial competitivo na gestão empresarial.** 2023. Disponível em: <https://revista.scientificsociety.net/wp-content/uploads/2023/07/Art00104-2023html.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2026..

NGABOYIMBERE, Fabien. **RFID Based Warehouse Management System: A Case Study of ROK Industries.** 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Embarcados e Móveis) – Nelson Mandela African Institution of Science and Technology, Arusha, 2021. Disponível em: <https://dspace.nm-aist.ac.tz/server/api/core/bitstreams/48ce20bc-d1a1-4cf2-9984-d1cad14002ac/content>. Acesso em: 15 jan. 2026.

OLIVEIRA, Gustavo Barbaro de. **Desenvolvimento de um sistema de controle para estoque empregando a tecnologia RFID.** 2025. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Computação) – Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de São Paulo, São José dos Campos, 2025. Disponível em: <https://repositorio.unifesp.br/server/api/core/bitstreams/0e9b16c9-ce64-4a20-afdc-484ca6a268f6/content>. Acesso em: 14 jan. 2026.

ÖZKURT, Cem. Optimizing Warehouse Management: An RFID-Based Tracking Application with Raspberry Pi 4 and Firebase Integration. **International Journal of Data Science and Applications**, v. 7, n. 1, p. 24-38, 2024. Disponível em: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/3713751>. Acesso em: 22 jan. 2026.

PAN, Chunxia; LIU, Meng. Optimization of Intelligent Logistics Supply Chain Management System Based on Wireless Sensor Network and RFID Technology. **Journal of Sensors**, v. 2021, art. 8111909, 2021. DOI: 10.1155/2021/8111909. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1155/2021/8111909>. Acesso em: 22 jan. 2026.

RAMLY, Marliza; SUPIRNO, Muhammad A. H.; HASIBUAN, M. Integration of RFID and Low-Cost IoT for Storeroom Monitoring: A Prototype Development Approach. **International Journal of Research and Innovation in Social Science (IJRISS)**, v. 9, n. 9, p. 8817-8829, 2025. Disponível em: <https://rsisinternational.org/journals/ijriss/articles/integration-of-rfid-and-low-cost-iot-for-storeroom-monitoring-a-prototype-development-approach/>. Acesso em: 21 jan. 2026.

REJEB, Abderahman *et al.* Internet of Things research in supply chain management and logistics: A bibliometric analysis. **Internet of Things**, v. 12, art. 100318, 2020. DOI: 10.1016/j.iot.2020.100318. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542660520301499>. Acesso em: 25 jan. 2026.

SOESANTO, Rayinda Pramuditya *et al.* Streamlining Warehouse Process: A UHF RFID-Enabled Smart Warehouse System Design. **International Journal of Applied Technology Research**, v. 5, n. 2, p. 107-119, 2024. Disponível em: <https://ijatr.polban.ac.id/ijatr/article/download/143/78>. Acesso em: 18 jan. 2026.

SUNDER, Sham; SUBASH, D.; ABISHEKGURU, A. M. Software Development for Asset Management Using RFID. **Advances in Robotics & Automation**, v. 14, n. 1, art. 309, 2025. Disponível em:

<https://www.hilarispublisher.com/open-access/software-development-for-asset-management-using-rfid.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2026.

TEJESH, B. Sai Subrahmanya; NEERAJA, S. Warehouse inventory management system using IoT and open source framework. **Alexandria Engineering Journal**, v. 57, n. 4, p. 3817-3823, 2018. DOI: 10.1016/j.aej.2018.02.003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016818301765>. Acesso em: 18 jan. 2026.

VACCARI, Laura *et al.* Indoor Positioning Systems in Logistics: A Review. **Logistics**, v. 8, n. 4, art. 126, 2024. DOI: 10.3390/logistics8040126. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2305-6290/8/4/126>. Acesso em: 25 jan. 2026.

YAKKALURI, Hari Krishna. Assessment of IoT and RFID Deployment in Warehouse Management Emphasizing Operational Efficiency and Cost Minimization. **Educational Administration: Theory and Practice**, v. 30, n. 11, p. 2628-2634, 2024. Disponível em: <https://kuey.net/index.php/kuey/article/view/10740>. Acesso em: 21 jan. 2026.

YUSOFF, Zainatul Y. M.; ISHAK, Mohamad K.; ALEZABI, Kamal A. The Role of RFID in Green IoT: A Survey on Technologies, Challenges and a Way Forward. **Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal**, v. 6, n. 1, p. 17-35, 2021. Disponível em: [https://www.astesj.com/publications/ASTESJ\\_060103.pdf](https://www.astesj.com/publications/ASTESJ_060103.pdf). Acesso em: 21 jan. 2026.