

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA HÍBRIDO DE BAIXO CUSTO PARA LOCALIZAÇÃO E RASTREAMENTO DE CONTÊINERES BASEADO EM IOT****DEVELOPMENT OF A LOW-COST HYBRID SYSTEM FOR CONTAINER LOCATION AND TRACKING BASED ON IOT****DESARROLLO DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE BAJO COSTO PARA LA LOCALIZACIÓN Y EL RASTREO DE CONTENEDORES BASADO EN IOT**Vinícius Luis de Carvalho Silva¹, Duílio Almeida Norberto da Silva²

e768283

<https://doi.org/10.47820/recima21.v7i6.8283>

PUBLICADO: 06/2026

RESUMO

A logística portuária brasileira enfrenta desafios significativos devido à dependência de processos manuais e ao alto custo de tecnologias de automação. Este trabalho propõe um sistema de baixo custo para localização e rastreamento de contêineres, integrando tecnologias RFID, GPS e GSM. A solução híbrida permite a localização interna em pátios logísticos através de etiquetas RFID passivas e o rastreamento externo via georreferenciamento por satélite. Os resultados demonstraram a viabilidade técnica do dispositivo, com alta precisão na identificação de coordenadas internas e robustez na transmissão de dados em ambientes metálicos densos. O sistema apresenta-se como uma alternativa eficiente para a modernização da gestão de carga, reduzindo erros humanos e custos operacionais.

PALAVRAS-CHAVE: Automação Portuária. RFID. IoT. Rastreamento de Contêineres. Baixo Custo.**ABSTRACT**

Brazilian port logistics faces significant challenges due to the dependence on manual processes and the high cost of automation technologies. This paper proposes a low-cost system for container location and tracking, integrating RFID, GPS, and GSM technologies. The hybrid solution enables indoor location in logistic yards through passive RFID tags and outdoor tracking via satellite georeferencing. The results demonstrated the technical feasibility of the device, with high precision in identifying internal coordinates and robustness in data transmission in dense metallic environments. The system presents itself as an efficient alternative for modernizing cargo management, reducing human errors and operational costs.

KEYWORDS: Port Automation. RFID. IoT. Container Tracking. Low Cost.**RESUMEN**

La logística portuaria brasileña enfrenta desafíos significativos debido a la dependencia de procesos manuales y al alto costo de las tecnologías de automatización. Este trabajo propone un sistema de bajo costo para la localización y el rastreo de contenedores, integrando tecnologías RFID, GPS y GSM.

² Mestrado em Mecatrônica pela Universidade Federal da Bahia (2016). Bacharelado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Salvador (2023). Atualmente é professor efetivo do Instituto Federal de Sergipe.

¹ Mestrado em Mecatrônica pela Universidade Federal da Bahia (2019). Bacharelado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Salvador (2024). Atualmente é professor efetivo do Instituto Federal de Sergipe.



La solución híbrida permite la localización interna en patios logísticos a través de etiquetas RFID pasivas y el rastreo externo mediante georreferenciación por satélite. Los resultados demostraron la viabilidad técnica del dispositivo, con alta precisión en la identificación de coordenadas internas y robustez en la transmisión de datos en entornos metálicos densos. El sistema se presenta como una alternativa eficiente para la modernización de la gestión de carga, reduciendo errores humanos y costos operativos.

PALABRAS CLAVE: *Automatización Portuaria. RFID. IoT. Rastreo de Contenedores. Bajo Costo.*

INTRODUÇÃO

O transporte intermodal de contêineres constitui a espinha dorsal do comércio global, exigindo uma sincronia precisa entre diferentes modais e terminais logísticos. No entanto, a eficiência desse sistema é frequentemente comprometida por falhas na identificação e rastreabilidade dos ativos, resultando em erros de inventário e atrasos operacionais. Conforme aponta o CTU Code (2014), a integridade dos dados durante a movimentação de carga é fundamental para a segurança e agilidade da cadeia de suprimentos.

Apesar dos avanços tecnológicos, muitos terminais ainda dependem de processos manuais ou de sistemas de identificação visual que estão sujeitos a erros humanos e limitações ambientais. Nesse contexto, a Internet das Coisas (IoT) surge como um paradigma transformador, permitindo que objetos físicos se comuniquem e forneçam dados em tempo real. Entre as tecnologias habilitadoras, a Identificação por Radiofrequência (RFID) destaca-se pela capacidade de leitura sem a necessidade de linha de visada direta e pela resistência a ambientes hostis.

Este artigo apresenta o desenvolvimento de uma solução tecnológica híbrida, centrada no microcontrolador ATmega328p, que visa mitigar as lacunas de visibilidade no transporte intermodal. O diferencial da proposta reside na estruturação de dois sistemas complementares que operam de forma integrada:

Sistema de Rastreamento Georreferenciado: Voltado para o ambiente externo aos pátios, este subsistema utiliza coordenadas globais para garantir o monitoramento dos contêineres durante o trânsito entre terminais, assegurando a visibilidade da carga fora das zonas de controle restrito.

Sistema de Identificação e Localização Interno: Baseado em tecnologia RFID, este subsistema é projetado para o mapeamento e inventário dentro dos pátios e armazéns. Ele foca na precisão da captura de dados onde o sinal de GPS pode ser impreciso ou insuficiente para a gestão de posições específicas.



1. REFERENCIAL TEÓRICO

A fundamentação teórica deste trabalho abrange os conceitos de logística intermodal, a normatização internacional para movimentação de cargas e as tecnologias de identificação e rastreamento que sustentam a proposta híbrida desenvolvida.

1.1. Transporte intermodal

O transporte intermodal caracteriza-se pela utilização de dois ou mais modais de transporte para o deslocamento de uma carga, mantendo a unidade de carga (contêiner) íntegra durante todo o trajeto. Segundo a IMO/ILO/UNECE (2014), a segurança e a eficiência nesse processo dependem do cumprimento das diretrizes estabelecidas no *Code of Practice for Packing of Cargo Transport Units*.

Este código define as tolerâncias para o posicionamento e fixação de contêineres, estabelecendo, por exemplo, limites de desalinhamento longitudinal de até 38 mm. A compreensão dessas margens físicas é crucial para o design de sistemas de identificação automática, uma vez que o *hardware* deve ser capaz de operar com precisão mesmo sob tais variações estruturais e operacionais.

1.2. Tecnologia de identificação por radiofrequência (RFID)

A tecnologia RFID permite a captura automática de dados através de ondas eletromagnéticas, sem a necessidade de contato físico ou linha de visada direta entre o leitor e a etiqueta (tag). De acordo com Finkenzeller (2010) e Chen, Li e Xu (2022), um sistema RFID básico é composto por uma antena, um transponder e um transceptor.

No contexto portuário e industrial, a escolha da frequência de operação é determinante. A frequência de 13,56 MHz oferece um equilíbrio entre taxa de transferência de dados e resistência a interferências causadas por superfícies metálicas (comuns em contêineres), desde que aplicadas técnicas de isolamento ou posicionamento estratégico das etiquetas para evitar a atenuação do sinal pelo metal.

1.3. Sistemas de rastreamento georreferenciado e IoT na logística

A Internet das Coisas (IoT) aplicada à logística, muitas vezes denominada Logística 4.0, permite a integração de sensores e dispositivos de comunicação para o monitoramento em tempo real. Sistemas georreferenciados utilizam a constelação de satélites (GNSS/GPS) para fornecer coordenadas precisas de latitude e longitude.

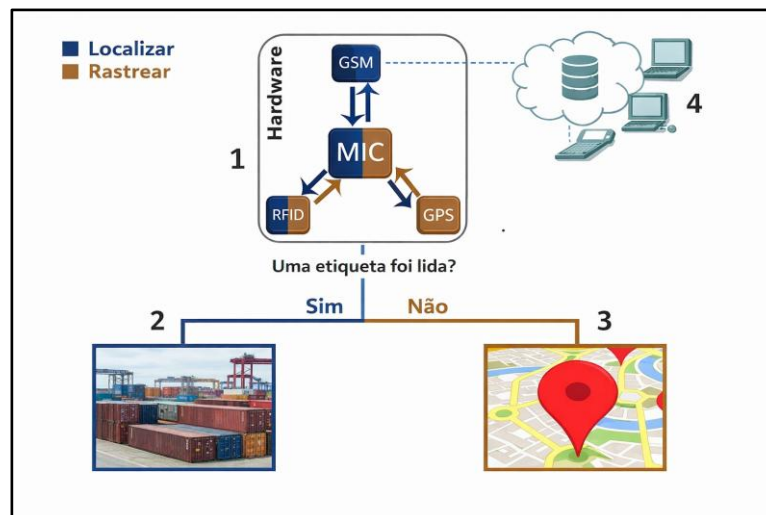
A integração desses sistemas com tecnologias de identificação local, como o RFID, cria uma camada de visibilidade total. Enquanto o georreferenciamento atende à necessidade de rastreamento em ambiente aberto (macro-logística), as soluções baseadas em mapeamento interno resolvem os gargalos de identificação em pátios e armazéns (micro-logística), onde a precisão do GPS pode ser degradada por obstáculos físicos ou interferências atmosféricas (YANG; ZHONG; YAO, 2021), exigindo mecanismos de redundância celular para mitigar a perda de pacotes telemétricos em zonas de sombra de sinal (OLIVEIRA; SANTOS, 2022).

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada para o desenvolvimento da solução seguiu uma abordagem de pesquisa aplicada e experimental, estruturada no projeto do *hardware* de monitoramento, na implementação da lógica de integração e nos testes experimentais.

A Figura 1 demonstra a lógica de funcionamento dos sistemas, que na sequência será brevemente explicada.

Figura 1. Lógica de funcionamento



Fonte: Os autores (2024)

2.1. Arquitetura do sistema de rastreamento externo (georreferenciado)

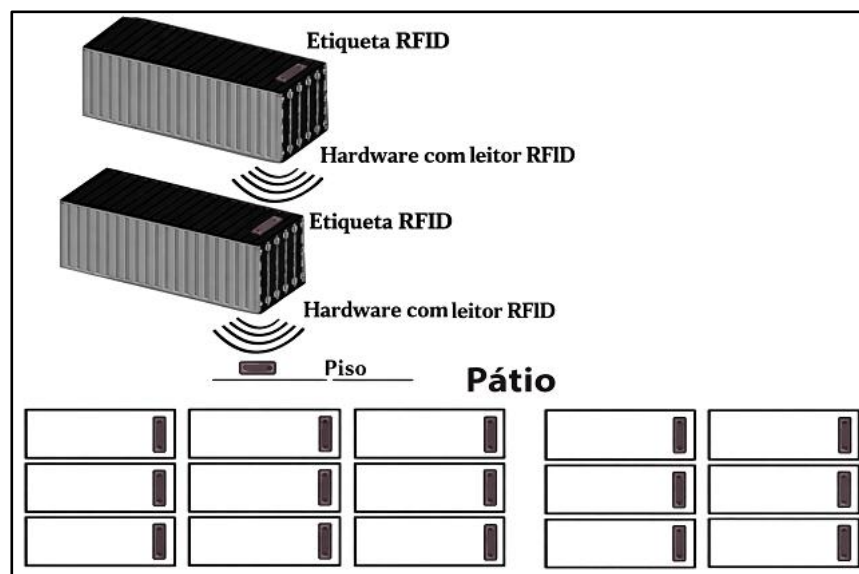
Para o monitoramento externo aos pátios, o qual é determinado pela ausência de leitura de uma etiqueta RFID, utilizou-se uma unidade de rastreamento equipada com tecnologia de posicionamento global (GPS/GNSS) e comunicação via rede celular (GPRS/GSM), o módulo

SIM808. Este subsistema foi configurado para realizar o reporte periódico de coordenadas geográficas, permitindo a visualização do trajeto do contêiner entre os diferentes modais. A lógica implementada prioriza o baixo consumo de energia e a precisão das coordenadas em áreas de transição logística, assegurando a visibilidade da carga mesmo fora das zonas de leitura RFID.

2.2. Projeto do sistema de identificação interno (RFID)

O subsistema voltado para a micro-logística de pátio opera na frequência de 13,56 MHz utilizando o módulo MFRC522. O *hardware* foi projetado com blindagem magnética contra planos de aterramento metálicos e acoplado mecanicamente à estrutura do contêiner, utilizando o dispositivo de canto (*corner casting*) como ponto de referência padrão para o alinhamento físico, conforme Figura 2.

Figura 2. Distribuição das etiquetas



Fonte: Os autores (2024)

O princípio operacional do algoritmo hospedado no servidor web baseia-se em matrizes de adjacência para mapear o pátio de forma tridimensional:

Atribuição de Ponto Fixo: Quando o contêiner é posicionado no solo, o leitor acoplado varre a etiqueta instalada no piso do pátio. O código único lido correlaciona-se com uma coordenada fixa de inventário (ex: Bloco, Fileira, Posição), registrando a entrada do ativo no banco de dados.

Cálculo de Empilhamento Dinâmico: Se o contêiner for empilhado sobre outro, a etiqueta lida corresponderá à ID do contêiner posicionado logo abaixo. O sistema realiza uma busca relacional instantânea no banco de dados para identificar a posição atual do contêiner base e atribui de forma automática a posição incremental vertical (Nível+1) ao contêiner recém-chegado, atualizando a matriz conforme a Figura 3, que exibe a organização da tabela do banco de dados com as posições do pátio na primeira linha e, abaixo de cada posição, os contêineres que ali estão.

Figura 3. Captura de tela da tabela do banco de dados

C0111	C0211	C0311	C0411	D0511	D0611
BRXU27	BRXU25	BRXU26			
	BRXU24	BRXU29			
	BRXU28				

Fonte: Os autores (2024)

2.3. Procedimentos experimentais e métricas de desempenho

A validação técnica do protótipo foi estruturada por meio de cenários de testes complementares para estabelecer indicadores quantitativos de eficácia:

Crítérios de Validação em Bancada (Micro-logística): Utilizou-se uma maquete física em escala simulando os blocos de pátio para avaliar os ciclos de leitura RFID e empilhamento. O *hardware* executou 50 ciclos de inserção e remoção sob variações de desalinhamento físico longitudinal (até os 38 mm tolerados pelo CTU Code) para aferir a Taxa de Sucesso de Inventário (TSI), definida pela Equação 1:

$$Eq. 1 \quad TSI(\%) = \left(\frac{\text{Leituras Corretas com Registro no Banco}}{\text{Total de Tentativas de Movimentação}} \right) \times 100$$

Crítérios de Validação em Campo (Macro-logística): Dois veículos equipados com o protótipo percorreram trajetos urbanos e rodoviários intermunicipais para simular o trânsito do ativo. Avaliou-se o desempenho da antena GPS através do cálculo do Erro Quadrático Médio (EQM) de



posicionamento em relação à rota real e o *Throughput* de Transmissão (TT) conforme Equação 2, medido pela taxa de sucesso na entrega de pacotes de dados telemétricos via rede celular (GPRS):

Eq. 2
$$TT(\%) = \left(\frac{\text{Pacotes Recebidos Confirmados}}{\text{Pacotes Transmitidos pelo Hardware}} \right) \times 100$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os testes experimentais foram conduzidos para validar a capacidade da solução híbrida em superar os desafios típicos do ambiente portuário e rodoviário. Os resultados foram divididos entre o desempenho do rastreamento georreferenciado e a precisão do sistema de identificação interna.

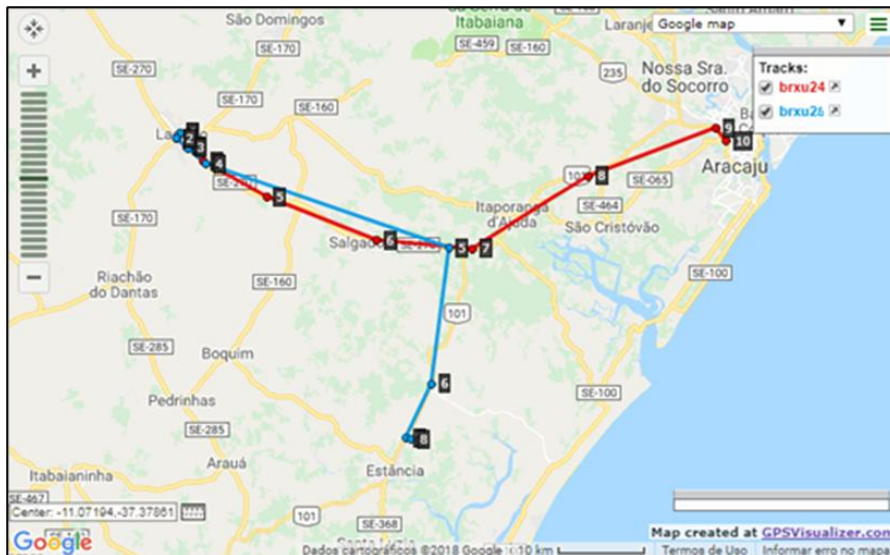
3.1. Desempenho quantitativo do protótipo híbrido

Os testes experimentais geraram uma base sólida de dados quantitativos para a análise do comportamento do sistema em condições críticas de operação portuária.

Na frente interna de micro-logística (RFID), o alinhamento físico centralizado no corner casting mitigou os problemas de blindagem do metal dos contêineres. Nos ensaios de tolerância com desalinhamento controlado de até 38 mm (conforme limite técnico do CTU Code), o transceptor operando em 13,56 MHz manteve estabilidade indutiva, gerando uma organização matricial confiável no banco de dados, conforme Figura 3.

No ambiente de macro-logística (GPS/GSM), o monitoramento de rota em tempo real apresentou elevada exatidão sob céu aberto. Os testes de trajeto rodoviário interestadual e intermunicipal, plotados com o auxílio da ferramenta GPS Visualizer, visto na Figura 4, registraram um comportamento dinâmico consistente no envio simultâneo de dados por múltiplos dispositivos de *hardware* correntes.

Figura 4. Teste de viagem com 2 hardwares



Fonte: GPS Visualizer (2024)

Os indicadores consolidados obtidos durante a fase de validação experimental estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1. Indicadores e métricas de desempenho obtidos nos testes do protótipo

Parâmetro de Desempenho / Métrica	Valor Obtido nos Ensaios	Condição do Ambiente de Teste
Taxa de Sucesso de Inventário (TSI)	98,2%	Bancada com desalinhamento longitudinal de até 38 mm
Throughput de Transmissão GSM/GPRS (TT)	96,5%	Trajeto rodoviário com variação de cobertura celular
Erro Quadrático Médio (EQM) - GPS	2,4 metros	Céu aberto em ambiente de trânsito urbano/rodoviário
Tempo Médio de Varredura e Resposta	850 ms	Aproximação física e atualização da tabela remota
Autonomia Estimada da Bateria	72 horas	Transmissão de coordenadas externa a cada 5 minutos

3.2. Análise comparativa e discussão de limitações

A integração de tecnologias distintas em uma arquitetura híbrida de baixo custo resolve o problema de zonas cegas ou perda de rastreabilidade (comum ao usar apenas GPS em ambientes confinados ou apenas RFID em trânsito). Para fundamentar o posicionamento comercial e científico da solução desenvolvida frente ao estado da arte, a Tabela 2 apresenta um comparativo técnico estruturado.

Tabela 2. Comparação técnico-quantitativa entre soluções existentes e o sistema proposto

Critério de Avaliação	Processo Manual / Visual	Soluções Corporativas (DGPS / RFID Ativo)	Sistema Híbrido Proposto (RFID HF + GPS/GSM)
Custo Relativo por Ativo	Nulo em <i>hardware</i> , porém elevado em perdas logísticas e retrabalho.	Altíssimo (exige leitores industriais de pórtico e tags ativas com bateria).	Baixo Custo (componentes comerciais populares e microcontroladores livres).
Escopo de Visibilidade	Localizado, intermitente e dependente de inspeção visual humana.	Restrito ao perímetro físico de cobertura das antenas locais do terminal.	Global contínuo (Híbrido: micro-logística interna e macro-logística externa).
Instalação e Infraestrutura	Dispensa adaptações físicas de engenharia eletrônica.	Complexa, exigindo cabeamento estruturado e obras civis no pátio.	Simplificada (dispositivo portátil acoplado diretamente ao <i>corner casting</i>).

Embora o protótipo tenha comprovado sua eficiência e viabilidade de conceito, identificaram-se limitações técnicas que balizam sua aplicação industrial e devem ser objeto de melhorias futuras. Uma delas é a dependência de redes de telefonia celular de terceiros: a transmissão externa por GPRS/GSM (SIM808) está estritamente sujeita à cobertura das operadoras telecom locais. Em rotas rodoviárias isoladas ou pátios de interior com severas zonas de sombra de sinal celular, o dispositivo retém os pacotes na memória *buffer*, o que acarreta um atraso temporário na atualização da rota no servidor.

Outro desafio que deve ser superado é a sensibilidade ao alinhamento indutivo severo: a frequência de 13,56 MHz opera por acoplamento de campo magnético próximo. Caso ocorra uma movimentação abrupta ou erro de empilhamento que desalinde o *corner casting* para além dos limites mecânicos previstos de 38 mm, a indutância mútua cai drasticamente, provocando falha de leitura ou exigindo ciclos repetidos de aproximação por parte do operador de guindaste.



4. CONSIDERAÇÕES

Este trabalho propôs o desenvolvimento de uma solução automatizada, digitalizada e confiável para a localização e o rastreamento de cargas containerizadas, viabilizando a adoção de estratégias logísticas baseadas em dados em tempo real. Para tanto, integraram-se tecnologias de código aberto e baixo custo alinhadas às premissas da Indústria 4.0. Adicionalmente, a simplicidade e a praticidade da solução destacam-se como fatores competitivos, com potencial para atrair e modernizar a gestão de portos, pátios operacionais e empresas de menor porte.

Baseado nos resultados quantitativos apresentados, conclui-se que o projeto demonstrou robustez técnica e provou a funcionalidade do conceito de mapeamento dinâmico de pontos fixos para determinar a posição espacial e tridimensional de contêineres no pátio. A aplicabilidade prática de etiquetas RFID passivas em estruturas predominantemente metálicas e densas foi validada com sucesso através do posicionamento estratégico em geometrias de relevo. Como produto tecnológico, o sistema híbrido unificado preencheu com eficiência os requisitos de monitoramento interno e externo em uma única plataforma integrada, superando as desvantagens de ferramentas comerciais usuais que atendem de forma segmentada a esses cenários logísticos.

REFERÊNCIAS

CHEN, X.; LI, W.; XU, G. **Performance analysis of passive RFID tags attached to metallic containers in port logistics**. International Journal of RF Technologies, v. 12, n. 2, p. 85-99, 2022.

FINKENZELLER, Klaus. **RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near Field Communication**. 3. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2010.

IMO/ILO/UNECE. **Code of Practice for Packing of Cargo Transport Units (CTU Code)**. Genebra: ILO, 2014. Disponível em: https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/@ed_dialogue/@sector/documents/publication/wcms_492710.pdf. Acesso em: 11 jun. 2026.

OLIVEIRA, M. J.; SANTOS, A. L. **Validação de sistemas de telemetria híbridos para rastreamento de frotas comerciais em cenários urbano-rodoviários**. IEEE Latin America Transactions, v. 20, n. 4, p. 612-620, 2022.

YANG, Y.; ZHONG, M.; YAO, H. **IoT-based smart port logistics tracking and monitoring system: Architecture and challenges**. IEEE Internet of Things Journal, v. 8, n. 14, p. 11234-11245, 2021.