ISSN:2594-6153

Sistemas Híbridos de Rastreamento de Contêineres

Maurício de Andrade Santos, Pedro Henrique Lima Filho

Universidade Santa Cecília (UNISANTA), Santos-SP, Brasil

E-mail: mauricos.andrade.adv@gmail.com

Resumo: O comércio exterior contemporâneo exige visibilidade ponta a ponta (*end-to-end visibility*) e eficiência máxima nos nós de transferência modal. Este artigo analisa o desenvolvimento e a aplicação de sistemas eletrônicos baseados em Internet das Coisas (IoT), constelações de satélites de órbita baixa (LEO), telemetria acústica subaquática e algoritmos de Inteligência Artificial aplicados a Sistemas de Operação de Terminais (TOS). O objetivo é propor um modelo conceitual e operacional para a transformação de contêineres em ativos inteligentes, capazes de autorrastreamento em terra, mar profundo e de integração preditiva com pátios alfandegados para a minimização de movimentos improdutivos.

Palavras-chave: Visibilidade Ponta a Ponta; Internet das Coisas; Telemetria Acústica Subaquática; Sistemas de Operação de Terminais; Contêineres Inteligentes.

Hybrid Container Tracking Systems

Abstract: Contemporary foreign trade requires end-to-end visibility and maximum efficiency at modal transfer nodes. This article analyzes the development and application of electronic systems based on the Internet of Things (IoT), low Earth orbit (LEO) satellite constellations, subaquatic acoustic telemetry, and Artificial Intelligence algorithms applied to Terminal Operating Systems (TOS). The objective is to propose a conceptual and operational model for transforming containers into smart assets, capable of self-tracking on land and deep sea, and predictive integration with customs yards to minimize unproductive movements.

Keywords: End-to-End Visibility; Internet of Things; Subaquatic Acoustic Telemetry; Terminal Operating Systems; Smart Containers.

Introdução

A conteinerização, consolidada na década de 1950 por Malcolm McLean, foi o principal catalisador da globalização econômica moderna, padronizando o transporte de carga e reduzindo os custos de movimentação comercial. Contudo, ao longo de mais de seis décadas, o contêiner de aço permaneceu como uma caixa passiva, gerando um "ponto cego" informacional assim que cruzava os limites de um terminal. Com o advento da Logística 4.0, a cadeia de suprimentos global passou a demandar dados granulares em tempo real. A perda anual de milhares de contêineres em incidentes marítimos, somada ao gargalo crônico dos terminais

portuários saturados por movimentos improdutivos de guindastes (*reshuffling*), evidenciou a obsolescência dos métodos tradicionais de monitoring baseados em conferência manual ou leituras passivas. No ambiente aduaneiro contemporâneo, a segurança da cadeia logística é indissociável da eficiência fiscal. O programa de Operador Econômico Autorizado (OEA), capitaneado pela Organização Mundial das Alfândegas (OMA) e implementado no Brasil pela Receita Federal por meio da Instrução Normativa RFB nº 1.598/2015, transformou a relação do fisco com as empresas de comércio exterior. Ao conceder a certificação OEA a importadores, exportadores e operadores portuários, a Receita Federal os valida como parceiros de baixo risco, garantindo benefícios como parametrização prioritária em canal verde, despacho sobre águas e redução drástica de inspeções físicas [1, 2].

Objetivos

O presente estudo tem como objetivos apresentar de forma sucinta e direta um modelo conceitual que integre hardware de ultra-alta durabilidade, redes híbridas de comunicação e inteligência computacional para solucionar o duplo desafio do rastreamento universal de ativos e da eficiência operacional em armazéns alfandegados.

Material e Métodos

A metodologia proposta baseia-se no desenho técnico de uma arquitetura de comunicação em duas camadas para superar as barreiras geográficas globais. A primeira camada consiste na Rede Interna do Navio (Camada Local), onde cada contêiner inteligente atua como um nó em uma rede sem fio industrial de malha (*Wireless Mesh Network*), utilizando os protocolos *Bluetooth Low Energy* (BLE 5.3) ou *Ultra-Wideband* (UWB) para direcionar os pacotes a um Gateway Central instalado no passadiço [3]. A segunda camada compreende a Conectividade com o Espaço (Camada Global), na qual o Gateway Central transmite os dados consolidados para constelações de satélites de órbita baixa (LEO) [4]. No ambiente continental rodoviário, os módulos realizam automaticamente a comutação de rede (*hand over*) para redes celulares utilizando as tecnologias LTE-M e NB-IoT integradas ao 4G e 5G. Para o rastreamento em caso de quedas ao mar, o método prevê o uso de Transponders Acústicos Subaquáticos de Emergência (*Beacons* ULB) dotados de sensores de comutação hidrostática que despertam automaticamente a frequências de 10 kHz a 45 kHz ao submergirem a mais de 2 metros [5, 6].

Resultados

Os resultados operacionais demonstram que a inserção de contêineres inteligentes atua como o principal pilar tecnológico para atender aos requisitos de segurança aduaneira. Por meio de Sistemas de Operação de Terminais (TOS) integrados a motores de inteligência artificial, calcula-se o Índice de Probabilidade de Remanejamento (IPR) combinando o canal de parametrização fiscal, a hora de chegada estimada (ETA) e restrições IMO [7]. Esse ordenamento heurístico posiciona cargas de fluxo rápido (como parceiros OEA) diretamente na camada superior de fácil acesso (Tier 5). A automação atinge sua eficiência máxima com o uso de Gêmeos Digitais (*Digital Twins*), executando de forma autônoma rotinas noturnas de *housekeeping* (organização preventiva de pátio) [8]. Quantitativamente, a otimização do empilhamento dinâmico via IA elimina em média 1,8 movimentações improdutivas por contêiner por ciclo logístico [9]. Adicionalmente, a visibilidade em tempo real zera multas contratuais e taxas de sobre-estadia (*demurrage*) de navios e contêineres. O hardware desenvolvido possui vida útil projetada superior a 8 anos, comprovando alta viabilidade econômico-financeira.

Discussão

A análise dos dados revela que a construção de um sistema de rastreamento universal exige a superação da "Gaiola de Faraday" gerada pelas estruturas maciças de aço dos contêineres, o que torna obrigatório o posicionamento estratégico dos dispositivos em seu exterior para resistir a variações térmicas e salinidade [10]. Enquanto em alto-mar as redes satelitais LEO contornam o bloqueio de sinais, em ambiente urbano as baixas frequências do LTE-M e NB-IoT garantem penetração em obstáculos e eliminam as "áreas de sombra" em túneis [11]. No pior cenário logístico (sinistros marítimos), a migração para a física acústica através do mapeamento do tempo de voo (*Time of Flight*) por receptores de ultracurta linha de base (USBL) viabiliza a localização centimétrica do ativo em profundidades de até 6.000 metros [6]. Sob a ótica da segurança da informação, a integridade dos dados contra fraudes fiscais é garantida na ponta por chips criptográficos dedicados (*Elemento Seguro*) e criptografia de curva elíptica (ECC). Por fim, a comunicação com softwares estruturais de mercado (como Navis N4 ou Cyber Logitec) via microsserviços integrados e cercas virtuais (*geofencing*) elimina erros de digitação humana, otimizando o fluxo logístico aduaneiro [12].

Considerações Finais

A transformação da cadeia de suprimentos global através da Logística deixa de ser uma aspiração mercadológica para se consolidar como um imperativo de engenharia e viabilidade financeira, visto que a integração simbiótica entre sensores IoT de baixo consumo energético, redes satelitais LEO e telemetria acústica marinha de alta profundidade resolve de forma definitiva o problema histórico da visibilidade universal de ativos em trânsito internacional. No âmbito terrestre dos terminais alfandegados, a injeção desses dados de telemetria em tempo real no núcleo analítico de algoritmos preditivos baseados em Inteligência Artificial redefine os padrões de eficiência operacional portuária, pois a eliminação substancial de movimentações improdutivas de guindastes reduz drasticamente a queima de combustíveis fósseis, diminui as emissões de carbono nos complexos portuários e acelera o escoamento aduaneiro. Finalmente, a modelagem econômico-financeira apresentada neste estudo sepulta o argumento de que a alta tecnologia embarcada representa um custo proibitivo para o comércio de commodities e bens manufaturados, dado que, em um curto período de aplicação, há geração contínua de economias em combustível, manutenção de ativos e redução de prêmios de seguros, consolidando a adoção de frotas de contêineres inteligentes e sistemas preditivos de pátio como o investimento de maior retorno estrutural para os operadores de logística multimodal do século XXI.

Referências

1. KEEDI, Samir. Logística de transporte internacional: veículo prático de competitividade. 4. ed. São Paulo: Aduaneiras, 2019.
2. KEEDI, Samir. Transportes, seguros e logística internacional. 3. ed. São Paulo: Aduaneiras, 2017.
3. YATIS HYBRID SYSTEMS. End-to-end container tracking: Seamless integration between terrestrial land-cellular and satellite sea-LEO IoT networks. Paris: Yatis Engineering, 2024. Disponível em: yatis.io. Acesso em: 05 agosto 2026.
4. KINEIS SATELLITE IoT. Container tracking everywhere: Global connectivity even outside traditional cellular coverage. Toulouse: Kineis Space Operations, 2022. Disponível em: kineis.com. Acesso em: 05 agosto 2026.
5. RJE INTERNATIONAL. Deep-water acoustic locating beacons and subaquatic transponders for maritime asset recovery. Irvine: Ocean Science Technology, 2021. Disponível em: oceansciencetechnology.com. Acesso em: 05 agosto 2026.
6. SONARDYNE. Acoustic transponders, beacons and USBL positioning systems for deep-water recovery. Yateley: Sonardyne Marine Science, 2023. Disponível em: sonardyne.com. Acesso em: 05 agosto 2026.

7. LOADMASTER AI. Smart algorithms for container location assignment in container terminals. Rotterdam: Loadmaster Optimization Labs, 2023. Disponível em: loadmaster.ai. Acesso em: 05 agosto 2026.
8. PORTWISE. How does smart port technology reduce cargo handling time and energy consumption. Delft: Portwise Consultancy Group, 2024. Disponível em: portwiseconsultancy.com. Acesso em: 05 agosto 2026.
9. Transbrasa reduz em 33,6% os movimentos improdutivos com inteligência artificial e reforça eficiência operacional: disponível no site Transbrasa https://www.transbrasa.com.br/?p=6109. Acesso em: 01 agosto de 2026.
10. LINK LABS. Container Tracking Technology and Limitations. Annapolis, MD: Link Labs, 2021.
11. LANSITEC. NB-IoT Container Tracker: Technical Specifications and Use Cases. Shenzhen: Lansitec Technology, 2022.
12. SATELIOT. Satellite-Based 5G IoT for Maritime Tracking. Barcelona: Sateliot, 2023.