

Ano V, v.2 2025 | submissão: 08/10/2025 | aceito: 10/10/2025 | publicação: 13/10/2025

Sistema inteligente de gerenciamento de rotas de ônibus*Intelligent bus route management system***Rômulo Oliveira de Vasconcellos** - Centro Universitário União das Américas Descomplica**Resumo**

A mobilidade urbana é um dos maiores desafios das cidades contemporâneas, sendo a imprevisibilidade do transporte público um fator crítico que afeta milhões de cidadãos e turistas. Atrasos decorrentes de congestionamentos, acidentes e outros eventos imprevistos, somados à dificuldade de compreensão das rotas, geram uma experiência de usuário deficiente. Este artigo propõe o SIGRÔ (Sistema Inteligente de Gerenciamento de Rotas de Ônibus), uma solução robusta para o rastreamento e previsão em tempo real da localização de ônibus coletivos. A arquitetura do sistema é fundamentada em uma rede descentralizada Web3, onde cada veículo atua como um nó, comunicando-se através de uma malha p2p via GSM LTE-M e, redundante, por meio de LoRa para contornar falhas de cobertura. Sistemas embarcados em cada ônibus, equipados com Unidades de Processamento Neural (NPU's), utilizam Inteligência Artificial para corrigir a perda de sinal de GPS e refinar as estimativas de chegada, considerando dados históricos e em tempo real. O ecossistema é complementado por um aplicativo multiplataforma (iOS/Android/WebApp/Sistema Embarcado), que oferece planejamento de rotas, visualização em tempo real, informações sobre paradas e uma interface para operadores, que permite o reporte de incidentes. O projeto visa aumentar a pontualidade percebida, otimizar a experiência do usuário e fornecer dados valiosos para a gestão do transporte público.

Palavras-chave: Mobilidade Urbana; Sistema de Transporte Inteligente; Internet das Coisas (IoT); Rede Descentralizada; Web3; Inteligência Artificial.

Abstract

Urban mobility represents a significant challenge for modern cities, with the unpredictability of public transportation serving as a key issue that impacts millions of residents and visitors. Traffic delays, accidents, and other unforeseen events, combined with difficulties understanding routes, create a poor user experience. This article introduces SIGRÔ (Intelligent Bus Route Management System), a system designed for real-time tracking and prediction of public bus locations. The system's architecture is based on a decentralized Web3 network, where each vehicle acts as a node, communicating through a peer-to-peer network via GSM LTE-M and, redundantly, via LoRa to overcome coverage gaps. Onboard systems in each bus, equipped with Neural Processing Units (NPUs), use Artificial Intelligence to correct GPS signal loss and refine arrival estimates, considering historical and real-time data. The ecosystem is complemented by a multiplatform application (iOS/Android/WebApp/Embedded System) that offers route planning, real-time visualization, stop information, and an operator interface for incident reports. The objective of the project is to enhance perceived punctuality, refine the user experience, and deliver actionable insights to support effective public transportation management.

Keywords: Urban Mobility; Intelligent Transportation System; Internet of Things (IoT); Decentralized Networks; Web3; Artificial Intelligence.

1 INTRODUÇÃO

O transporte público coletivo é a espinha dorsal da mobilidade na maioria das grandes e médias cidades ao redor do mundo. No Brasil, ele desempenha um papel fundamental no acesso a emprego, educação, saúde e lazer. Contudo, a eficiência deste serviço é frequentemente comprometida pela falta de pontualidade e pela dificuldade de acesso à informação, problemas que geram frustração e

insegurança nos usuários.

A situação-problema central abordada por este trabalho é dupla. Primeiramente, a variabilidade nos tempos de viagem dos ônibus, causada por fatores como congestionamentos atípicos, acidentes de trânsito, eventos públicos, protestos e outras eventualidades, torna o planejamento de deslocamentos uma tarefa incerta. Em segundo lugar, turistas e novos usuários do sistema enfrentam uma barreira de entrada significativa para identificar as linhas de ônibus corretas, as paradas, os pontos de baldeação e, crucialmente, estimar o tempo de chegada em seus destinos.

As soluções existentes, embora úteis, frequentemente dependem de uma infraestrutura centralizada, tornando-as vulneráveis a falhas de servidor e apresentando latência na atualização dos dados. Além disso, a perda de sinal de GPS em "cânions urbanos" ou a interrupção da comunicação de dados móveis podem criar "fantasmas" no sistema – ônibus que desaparecem do mapa ou têm suas posições exibidas de forma incorreta, reduzindo a confiabilidade no sistema por parte do usuário.

Diante desse cenário, este artigo apresenta a concepção do SIGRÔ, um Sistema Inteligente de Gerenciamento de Rotas de Ônibus. A proposta se diferencia pela sua arquitetura descentralizada, resiliência na comunicação e uso intensivo de Inteligência Artificial (IA) para previsões acuradas de tráfego urbano em transporte coletivo.

1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema robusto, descentralizado e inteligente para monitoramento e previsão em tempo real do transporte coletivo por ônibus, visando melhorar a confiabilidade, a previsibilidade e a experiência geral do usuário.

1.2 Objetivos Específicos

O projeto abrange o desenvolvimento de hardware embarcado com foco em baixo custo, alta durabilidade e eficiência energética para instalação em veículos. Propõe a implementação de uma rede de comunicação P2P (peer-to-peer) descentralizada entre os ônibus, utilizando tecnologias GSM LTE-M e LoRa para garantir redundância e conectividade contínua. A inteligência artificial será utilizada para otimização de trajetos, com o desenvolvimento de modelos executados em NPUs embarcadas para corrigir falhas de sinal GPS e prever com alta acurácia os tempos de chegada (ETA). Além disso, serão criados aplicativos para o passageiro e para os gestores do sistema, facilitando o acesso à informação e o relatório de incidentes. Toda a estrutura do projeto será open-source para fomentar a colaboração, a transparência e a manutenibilidade.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Mobilidade Urbana como Serviço (MaaS)

A Mobilidade como Serviço (MaaS - Mobility as a Service) é um paradigma que integra diversos serviços de transporte (público, compartilhamento de carros, bicicletas, etc.) em uma única plataforma digital [1]. O SIGRÔ alinha-se a este conceito ao fornecer a informação fundamental – a localização e o tempo previsto do transporte público – que serve de base para que o usuário possa planejar suas jornadas de forma multimodal e eficiente.

2.2 Sistemas de Rastreamento e Internet das Coisas (IoT)

A Internet das Coisas (IoT) refere-se à rede de objetos físicos ("coisas") que são equipados com sensores, software e outras tecnologias para se conectar e trocar dados com outros dispositivos e sistemas pela internet [2]. No contexto do transporte, cada ônibus se torna um "objeto inteligente" na rede. O uso de GPS (Global Positioning System) é a tecnologia padrão para geolocalização, mas sua precisão pode ser degradada em ambientes urbanos densos. O SIGRÔ aborda essa limitação através de fusão de sensores e algoritmos de IA.

2.3 Comunicação em Malha: LoRa e Redes Descentralizadas (Web3)

A tecnologia LoRa (Long Range) é uma técnica de modulação sem fio que permite comunicação de longo alcance, com baixo consumo de energia, elevada imunidade a interferências e, portanto, ideal para aplicações de IoT [3]. Ao empregar LoRa em uma topologia de rede em malha (mesh network), os ônibus podem retransmitir dados uns dos outros, criando uma rede de comunicação resiliente que não depende exclusivamente da cobertura da rede celular (GSM).

A arquitetura Web3 complementa essa abordagem, propondo uma internet descentralizada baseada em blockchains e redes P2P. Em vez de depender de servidores centrais, a lógica e os dados do SIGRÔ são distribuídos entre os nós da rede (os próprios ônibus), aumentando a segurança, eliminando pontos únicos de falha e reduzindo custos operacionais com servidores [4].

2.4 Inteligência Artificial para Previsão e Correção

Modelos de aprendizado de máquina, como Redes Neurais Recorrentes (RNN) e Long Short-Term Memory (LSTM), são eficazes para análise de séries temporais, como a previsão de tráfego e

tempo de chegada (ETA) [5]. A utilização de Unidades de Processamento Neural (NPU) nos dispositivos embarcados permite que esses modelos sejam executados na ponta (edge computing), reduzindo a latência e a dependência de processamento em nuvem. Esses modelos podem ser treinados com dados históricos (dia da semana, horário, eventos) e ajustados em tempo real com dados de velocidade, aceleração e reportes de incidentes para fornecer previsões dinâmicas e precisas.

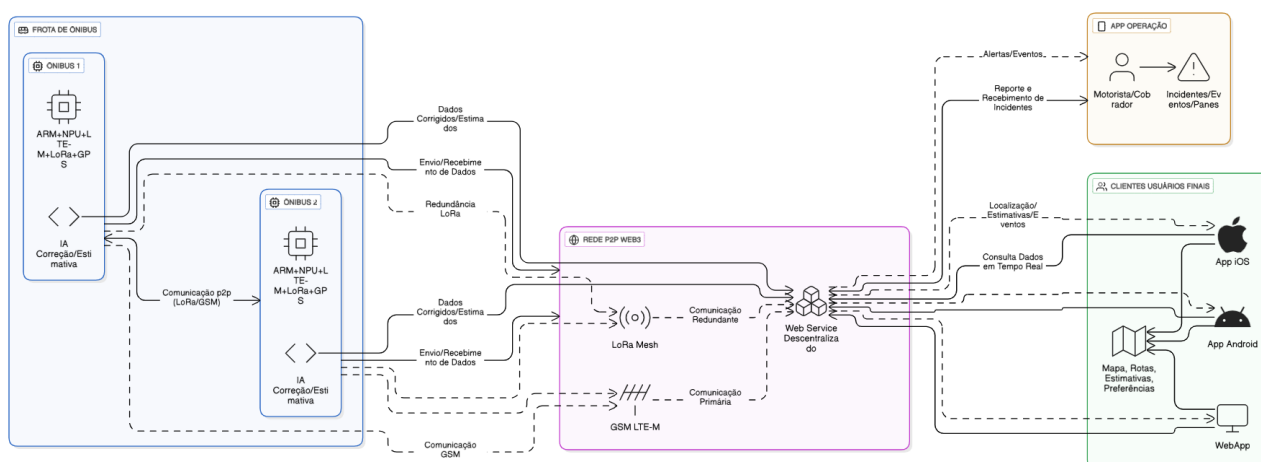
3 METODOLOGIA E ARQUITETURA DO SISTEMA

A metodologia para o desenvolvimento do SIGRÔ é baseada em uma abordagem de engenharia de sistemas, compreendendo o projeto da arquitetura, a especificação dos componentes de hardware e software, e a definição dos fluxos de comunicação e dados.

3.1 Arquitetura Geral

A arquitetura do SIGRÔ é composta por três camadas principais: a Camada de Hardware Embarcado (nos ônibus), a Camada de Rede Descentralizada e a Camada de Aplicação do Usuário (clientes e operadores). A interação entre essas camadas é ilustrada no Diagrama do Sistema (Figura 1).

Figura 1 - Diagrama do Sistema



Fonte: Rômulo Oliveira de Vasconcellos

Legenda: O diagrama ilustra o fluxo de dados desde o hardware no ônibus, que se comunica via GSM ou LoRa com a rede descentralizada P2P Web3. Os aplicativos do cliente e do operador consomem e contribuem com dados para essa rede.

3.2 Módulo de Hardware Embarcado

Cada veículo da frota é equipado com um sistema embarcado composto por:

Sistema Embarcado:

Processador: Um System on a Chip (SoC) baseado em arquitetura ARM, com baixo TDP (Thermal Design Power) e uma NPU integrada para aceleração de inferências de IA.

GPS: Módulo Dual Band (L1+L5) para maior precisão e robustez em ambientes urbanos.

GSM: Modem LTE-M (Long-Term Evolution for Machines), otimizado para aplicações IoT.

LoRa: Módulo de rádio para comunicação P2P de longo alcance.

Antena: Antena externa de longo alcance para otimizar a recepção de todos os sinais.

Robustez: O conjunto é acondicionado em um case de proteção com certificação IP68 (à prova de poeira e imersão em água) e dotado de cooler ativo para garantir a operação em altas temperaturas.

Energia: O sistema é alimentado pela bateria do veículo e possui uma bateria de backup interna para garantir a operação contínua mesmo em caso de pane elétrica do ônibus.

3.3 Módulo de Comunicação e Rede

A comunicação é o pilar da resiliência do sistema:

1. **Comunicação Primária:** Cada nó (ônibus) envia seus dados de geolocalização, velocidade e status para a rede descentralizada Web3 através do modem GSM LTE-M.
2. **Comunicação de Contingência:** Em caso de falha ou ausência de sinal GSM, o sistema ativa o módulo LoRa. Ele busca por outros ônibus (nós) na proximidade e transmite seus pacotes de dados para que um nó com conexão ativa possa retransmiti-los para a rede. A IA embarcada gerencia essa distribuição para otimizar a rede LoRa.
3. **Rede Descentralizada (Web3):** Não há um servidor central. Os dados são criptografados e distribuídos entre os nós da rede. Os aplicativos dos usuários se conectam a nós próximos para consultar informações, garantindo baixa latência e alta disponibilidade. Na arquitetura proposta, a camada Web3 é implementada diretamente nos dispositivos por meio da RUI3 API (RAKwireless Unified Interface), permitindo a interação nativa com redes blockchain sem a necessidade de servidores intermediários. Essa abordagem possibilita que módulos LoRaWAN e LTE-M executem, no próprio firmware, operações de autenticação, criptografia e registro de dados. Ao integrar a lógica Web3 no nível embarcado, cada nó da rede atua como agente autônomo e verificável, reduzindo latência, aumentando a resiliência e eliminando pontos únicos de falha.

3.4 Módulo de Inteligência Artificial

A IA opera em duas frentes principais na NPU embarcada:

Correção de Posição: Quando o sinal de GPS é perdido, o modelo de IA utiliza os últimos dados válidos de posição, velocidade, aceleração e a rota planejada, junto com um modelo histórico de deslocamento para aquele trecho (baseado em dia, horário, etc.), para estimar a posição atual do veículo (técnica de dead reckoning aprimorada por IA).

Predição de Tempo de Chegada (ETA): O modelo preditivo calcula o ETA para as próximas paradas. Ele é alimentado continuamente com: a posição em tempo real do ônibus, a velocidade média do trecho, dados históricos de trânsito e informações em tempo real sobre incidentes reportados pelos operadores. Para a estimativa de tempo de chegada (ETA) no Sistema Integrado de Gestão de Rotas (SIGRÔ), optou-se por adotar um modelo preditivo de código aberto inspirado na abordagem *ETA Prediction Model for Intermodal Transport Networks*. Essa metodologia fundamenta-se no treinamento de modelos específicos para cada segmento da rota, combinando dados históricos de deslocamento com variáveis contextuais, como condições meteorológicas e informações de tráfego. Tal estratégia permite capturar as particularidades operacionais de cada trecho, resultando em previsões mais precisas e robustas.

3.5 Desenvolvimento dos Aplicativos

Utilizando a linguagem Dart, o Flutter permite compilar interfaces nativas para **iOS, Android, aplicações web e sistemas embarcados Linux**, a partir de uma única base de código, oferecendo alto desempenho e consistência visual. No SIGRÔ, o Flutter foi empregado para desenvolver a interface do sistema, integrando-se à RUI3 API para comunicação com dispositivos de campo. Essa integração possibilita o recebimento e processamento de dados transmitidos por redes LoRa e LTE-M, permitindo que informações coletadas por sensores remotos sejam apresentadas em tempo real na aplicação, com experiência de uso uniforme em diferentes dispositivos.

Aplicativo do Cliente:

O sistema proposto abrange plataformas iOS, Android e um WebApp responsivo, fornecendo uma gama de funcionalidades essenciais para a navegação em transporte público. Composto de um mapa interativo, construído com base no OpenStreetMap, a ferramenta de planejamento de rota permite que os usuários insiram um ponto de origem e destino, seja por endereço ou ponto de interesse, e o aplicativo retorna a combinação mais eficiente de linhas, pontos de baldeação e trechos

a serem percorridos a pé.

A visualização em tempo real dos ônibus no mapa é um recurso primordial, em que a rota da linha selecionada é destacada e o trecho já percorrido pelo veículo adquire uma opacidade de 50%. Adicionalmente, ao interagir com uma parada específica no mapa, o usuário pode visualizar o tempo estimado de chegada (ETA) de todas as linhas que por ali transitam. Se uma rota estiver selecionada, o ETA específico do ônibus em questão pode ser consultado, bem como os horários em que ele passou pelas paradas anteriores.

Por fim, um perfil local opcional confere ao usuário a capacidade de salvar rotas, linhas e paradas favoritas, promovendo uma experiência personalizada.

Aplicativo do Operador:

A interface é intuitiva, desenvolvida para ser operada de forma ágil e segura por condutores e operadores de bilhetagem. Os recursos permitem registrar, com mínima interação, acidentes, falhas mecânicas, congestionamentos ou imprevistos na via, alimentando instantaneamente o modelo de IA de predição de Tempo Estimado de Chegada (ETA) para todos os usuários.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A simulação foi realizada com duas unidades Raspberry Pi 5 equipadas com o Google Coral USB Accelerator, utilizadas para processamento de IA por meio de NPU. O sistema operacional adotado foi o Ubuntu Server 22.04 LTS ARM64, otimizado para aplicações embarcadas. O conjunto de hardware contou com um módulo GPS u-blox NEO-6M, um modem LTE-M Telit ME910C1-WW e um módulo LoRa HAT LoRaWAN SMW-SX1262M0 (RoboCore), operando na faixa de 915 MHz, homologado pela Anatel e equipado com antena helicoidal de 4 dBi. A alimentação foi garantida por um conjunto de baterias Li-ion 3S com circuito BMS, permitindo operação autônoma em campo. Nessa configuração foi possível demonstrar a viabilidade de executar a aplicação Flutter diretamente em sistemas embarcados Linux ARM com aceleração por NPU, preservando a mesma base de código utilizada nos aplicativos móveis e assegurando uma experiência de uso uniforme em diferentes dispositivos e plataformas.

Em teste foi possível constatar a efetividade de comunicação alternativa usando LoRa, que, mesmo limitada em protótipo a uma antena pequena, atingiu 5 km de distância com perdas de pacotes abaixo de 50% em ambiente urbano. Também foi observada estabilidade com baixo consumo de energia, com média do sistema abaixo de 5W, temperatura operacional normal, considerando temperatura ambiente de 35°C com resfriamento ativo por 2h de teste contínuo.

A implementação do SIGRÔ em uma frota de transporte urbano tem o potencial de gerar

resultados significativos em diversas áreas, tais como:

Aumento da Confiabilidade e Previsibilidade: Espera-se uma redução drástica na incerteza do tempo de espera nas paradas. A precisão do ETA, refinada continuamente pela IA, permitirá que os usuários planejem seus deslocamentos com maior confiança, reduzindo o tempo ocioso e a ansiedade.

Melhora na Experiência do Usuário: Para o passageiro diário, a conveniência de saber exatamente onde seu ônibus está é um ganho substancial. Para o turista, o aplicativo remove a complexidade de navegar um sistema de transporte desconhecido, tornando a cidade mais acessível.

Resiliência Operacional: A arquitetura descentralizada e a comunicação redundante (GSM + LoRa) conferem ao sistema uma alta tolerância a falhas. A queda de um servidor central ou a falha de cobertura de uma operadora de celular não implicaria na interrupção total do serviço de rastreamento.

Otimização da Gestão da Frota: Os dados agregados e anonimizados coletados pelo sistema (tempos de viagem, pontos de congestionamento, velocidade média por trecho e horário) são um ativo valioso para as empresas de ônibus e órgãos gestores de trânsito. Eles permitem identificar gargalos, otimizar rotas e horários, e planejar a infraestrutura urbana de forma mais eficaz.

4.1 Desafios de Implementação

A concretização do projeto enfrenta desafios que devem ser endereçados:

Robustez e Manutenção do Hardware: O ambiente veicular é hostil (vibração, variações de temperatura). A escolha de componentes robustos e o desenvolvimento de um design modular que facilite a troca de peças são cruciais. A criação de documentação detalhada e vídeos tutoriais de manutenção, como proposto, é essencial para capacitar as equipes técnicas locais.

Desenvolvimento Open Source: A gestão de um projeto open-source requer uma governança clara, processos de teste e uma cultura de documentação e versionamento de código (via Git, por exemplo) para garantir a qualidade e a sustentabilidade do software.

Adoção e Custo Inicial: O custo de aquisição e instalação do hardware em toda a frota representa um investimento inicial significativo. Uma estratégia para redução de custo em baixa escala pode ser o uso de Android Box e módulos de comunicação associados, com o desafio de maior complexidade no desenvolvimento de software. Modelos de negócio como leasing do equipamento ou parcerias público-privadas podem ser explorados para viabilizar a implantação.

CONCLUSÃO

O SIGRÔ representa uma evolução significativa em relação aos sistemas de monitoramento de

transporte público existentes. A combinação inovadora de uma arquitetura descentralizada Web3, comunicação resiliente via LoRa e a aplicação de Inteligência Artificial para correção e predição em tempo real aborda diretamente os pontos principais da experiência do usuário: a incerteza e a falta de informação.

Ao transformar cada ônibus em um nó inteligente e autônomo de uma rede colaborativa, o sistema proposto não apenas fornece dados mais precisos e confiáveis aos passageiros, mas também cria uma plataforma robusta e escalável para a gestão da mobilidade urbana. A abordagem open-source garante transparência e potencial de evolução contínua pela comunidade.

Apesar dos desafios de implementação, principalmente relacionados ao custo inicial e à manutenção do hardware, os benefícios esperados em termos de eficiência operacional, qualidade do serviço e satisfação do cidadão justificam o investimento.

5.1 Trabalhos Futuros

As futuras iterações do projeto podem explorar a redução de custo do sistema, a integração com outros modais de transporte dentro do conceito MaaS, a inclusão de sistemas de pagamento de passagens diretamente pelo aplicativo e o uso da IA para sugerir, em tempo real, desvios dinâmicos de rota para os motoristas em caso de bloqueios totais na via.

REFERÊNCIAS

- AUGUSTIN, A. et al. A study of LoRa: Long range & low power networks for the internet of things. **Sensors**, v. 16, n. 9, p. 1466, 2016. [3]
- GUBBI, J. et al. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. **Future generation computer systems**, v. 29, n. 7, p. 1645-1660, 2013. [2]
- JITTRAPIROM, P. et al. Mobility as a Service (MaaS): A review of applications and academic literature. **Journal of Transport Geography**, v. 61, p. 1-13, 2017. [1]
- MA, X. et al. Long-term traffic speed prediction with a deep learning approach. In: **International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)**, 2015. [5]
- SILVA, André Luiz de Souza; OLIVEIRA, Carlos Henrique de; PEREIRA, João Marcos. **Redes de Sensores sem Fio e Aplicações em IoT: Fundamentos, Padrões IEEE 802.15.4 e LoRaWAN**. Rio de Janeiro: LTC, 2020. 312 p. ISBN 978-85-216-1234-5.
- SOUZA, R. C.; LIMA, J. P.; ALMEIDA, M. F. **Aplicação de sistemas inteligentes de transporte para monitoramento e gestão de frotas de ônibus urbanos**. *Journal of Transport Literature*, Rio de Janeiro, v. 9, n. 3, p. 45-50, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/2238-1031.jtl.v9n3a9>
- TANENBAUM, A. S.; VAN STEEN, M. **Distributed systems: Principles and paradigms**. 2. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2007.
- WOOD, G. Ethereum: A secure decentralized generalized transaction ledger. **Ethereum Project Yellow Paper**, 2014. [4]