Monitoramento IoT com MQTT e Coleta de Resíduos Sólidos Urbanos Orientada por Dados: Plataforma de Simulação e Avaliação Experimental na Malha Viária de Aracaju (SE)

Felipe J. dos S.[1], **Stephanie K. A. De Sousa**[1],
Rubens D. S. Matos Jr.[1], **Fabio L. Sá P.**[1]

[1]Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe (IFS)
Lagarto – SE – Brasil

Resumo. *Este trabalho avalia, por simulação, se o monitoramento do nível de contêineres por Internet das Coisas (IoT) e MQTT torna a coleta de resíduos sólidos urbanos mais eficiente. O firmware ESP32 do protótipo de 2024 foi auditado e reescrito, especificou-se um contrato MQTT 3.1.1 e construiu-se uma plataforma aberta que compara quatro políticas na malha viária real de Aracaju (SE), com contêineres hipotéticos: periódica fixa (A), por limiar (B), dinâmica otimizada (C) e preditiva (D). Em 4.110 execuções pareadas por semente, com 100 contêineres, C percorreu −21,2% de distância em relação a A, mas transbordou 3,61% do volume gerado, contra 1,01% em A. D percorreu −8,0%, sem diferença significativa de transbordamento. No mesmo nível de serviço (1% de transbordamento), C e D exigiram −8,8% e −9,7% de distância em relação a A. Perder até metade das mensagens teve pouco efeito. Os sensores congelados, não detectados pela ingestão, foram o modo de falha mais grave. Os resultados dependem de parâmetros de demanda não calibrados em campo e não representam o serviço real de Aracaju.*

Abstract. *This work uses simulation to assess whether Internet of Things (IoT) fill-level monitoring with MQTT makes urban solid waste collection more efficient. The ESP32 firmware of a 2024 prototype was audited and rewritten, an MQTT 3.1.1 message contract was specified, and an open platform was built to compare four policies on the real road network of Aracaju, Brazil, with hypothetical container sites: fixed periodic (A), threshold-based (B), optimized dynamic (C) and predictive (D). Over 4,110 seed-paired runs with 100 containers, C changed daily distance by −21.2% relative to A but let 3.61% of the generated volume overflow, against 1.01% under A. D changed distance by −8.0% with no significant difference in overflow. At the same service level (1% overflow), C and D required −8.8% and −9.7% distance relative to A. Losing up to half of the messages had little effect. Frozen sensors, which the ingestion layer does not detect, were the most harmful failure mode. Results depend on demand parameters that were not calibrated in the field and do not represent Aracaju's actual service.*

1. Introdução

A coleta de resíduos sólidos urbanos (RSU) é um serviço contínuo, caro e muito visível para a população. Os indicadores nacionais de 2024 registram, para o Brasil, 1,14 kg

de RSU coletado por habitante por dia e, considerando apenas os resíduos domiciliares, 0,84 kg/hab·dia; no Nordeste, esses valores são 1,21 e 0,88 kg/hab·dia, respectivamente [Brasil. Ministério das Cidades 2025, p. 25–26]. Em uma capital como Aracaju, com 602.757 habitantes no Censo de 2022 [IBGE 2022], isso equivale a centenas de toneladas de resíduos domiciliares por dia, que precisam ser recolhidas por frotas com capacidade, jornada e custo limitados. A Política Nacional de Resíduos Sólidos [Brasil 2010] e o marco legal do saneamento [Brasil 2020] reforçam a exigência de planejamento e de indicadores para esse serviço.

Na prática mais comum, a coleta segue roteiros e frequências fixos: cada contêiner é visitado em dias predeterminados, esteja cheio ou quase vazio. Essa regra é simples de operar, mas não se ajusta às variações de geração entre locais e entre dias. Contêineres que enchem rápido transbordam antes da visita; outros são esvaziados com pouca carga. A Internet das Coisas (IoT) oferece uma alternativa: sensores de nível instalados nos contêineres transmitem a ocupação para uma plataforma, que decide quais pontos visitar e em que ordem [Anagnostopoulos et al. 2017, Esmaeilian et al. 2018]. A literatura relata reduções de distância percorrida com esse tipo de estratégia, mas também mostra que os ganhos estimados em simulação tendem a ser maiores que os observados em implantações reais. Uma meta-análise recente encontrou redução média de 39,79% nos estudos de simulação e de 12,37% nos estudos de campo [Maciel et al. 2025]. Parte dessa diferença pode decorrer de hipóteses favoráveis demais nos modelos, como sensores sem erro, comunicação perfeita e comparações com linhas de base pouco exigentes.

Este trabalho é a continuação do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em 2024[1], no qual foi montado, a partir da arquitetura em três camadas de [de Oliveira and Kniess 2018], um protótipo com ESP32, sensor ultrassônico HC-SR04, sensor de temperatura e umidade DHT11 e comunicação MQTT. O protótipo demonstrou a troca de mensagens entre dispositivo, broker e aplicativo, mas não avaliou se o monitoramento melhoraria a coleta, e o firmware continha erros que invertiam o significado da medida de enchimento (Seção 4.3). A presente versão mantém o tema e o hardware original, corrige o firmware e acrescenta o que faltava para responder à pergunta operacional: uma plataforma de simulação em que contêineres virtuais publicam telemetria por MQTT, uma camada de ingestão que estima o estado de cada contêiner e um módulo de planejamento que compara estratégias de coleta sob as mesmas condições.

1.1. Problema e questões de pesquisa

O problema investigado é *como uma arquitetura IoT com sensores de nível, comunicação MQTT e planejamento orientado por dados pode apoiar a eficiência da coleta de RSU, considerando as imperfeições de medição e de comunicação*. Ele foi desdobrado em cinco questões:

QP1 Como o monitoramento do nível de enchimento pode apoiar a decisão de quando coletar?

QP2 Em cenários equivalentes, que diferenças operacionais existem entre a coleta periódica fixa, a coleta por limiar de enchimento e a coleta dinâmica com otimização de rotas, com ou sem previsão?

[1] A versão de 2024 está preservada sem alterações no repositório do projeto, no diretório `original/`.

QP3 Como perda e atraso de mensagens, indisponibilidade de sensores e ruído de medição afetam essas estratégias?

QP4 Qual é a influência da quantidade e da distribuição dos contêineres, da demanda e da frota sobre os resultados?

QP5 Em que condições a estratégia orientada por dados traz ganhos relevantes e em quais a complexidade adicional não se justifica?

1.2. Objetivos

O objetivo geral é desenvolver e avaliar experimentalmente, por simulação, uma plataforma IoT baseada em MQTT para monitoramento de contêineres e planejamento da coleta de RSU. Os objetivos específicos são: (i) auditar e corrigir o firmware do protótipo de 2024; (ii) especificar um contrato de mensagens MQTT com identificação de dispositivo, sequência, validade e versão de esquema; (iii) implementar um simulador de contêineres, sensores ultrassônicos e canal de comunicação com injeção de falhas; (iv) implementar a ingestão, a estimação de estado e quatro políticas de coleta com roteirização por otimização; (v) executar experimentos pareados e reprodutíveis em um cenário construído sobre a malha viária real de Aracaju; e (vi) analisar os resultados com estatística apropriada e discutir limites de validade.

1.3. Delimitação e contribuições

Nenhum componente físico novo foi montado e nenhum dado de campo foi coletado. Toda a avaliação quantitativa é feita por simulação; a malha viária é real (OpenStreetMap), mas as posições dos contêineres e do depósito são hipotéticas, e os resultados não representam o serviço de coleta de Aracaju. Os parâmetros de geração de resíduos combinam dados oficiais e hipóteses declaradas (Seção 5.3).

As contribuições efetivamente demonstradas neste trabalho são: (a) a auditoria e a reescrita do firmware, com compilação verificada; (b) um contrato MQTT 3.1.1 e uma camada de ingestão que trata duplicatas, mensagens fora de ordem, leituras inválidas e dados desatualizados; (c) uma plataforma de simulação aberta, com testes automatizados e verificação de balanço de volume, que usa o mesmo código de ingestão tanto com o broker real quanto com um canal emulado; (d) um protocolo experimental pareado (números aleatórios comuns) com 4.110 execuções de simulação e testes de integração com o broker; e (e) evidência quantitativa sobre a troca entre distância percorrida e nível de serviço, e sobre a sensibilidade dessas estratégias a falhas de telemetria.

1.4. Organização do texto

A Seção 2 apresenta os conceitos usados no trabalho. A Seção 3 discute trabalhos relacionados e posiciona a proposta. A Seção 4 descreve a arquitetura, o firmware e a plataforma. A Seção 5 detalha os modelos, os parâmetros e o protocolo experimental. A Seção 6 apresenta e discute os resultados, e a Seção 7 conclui o trabalho.

2. Fundamentação teórica

2.1. Gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil

A Lei nº 12.305/2010 instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que define responsabilidades dos titulares do serviço público de limpeza urbana, exige planos

de gestão e estabelece a ordem de prioridade entre não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada [Brasil 2010]. A Lei nº 14.026/2020 atualizou o marco legal do saneamento básico, que inclui o manejo de resíduos sólidos [Brasil 2020]. Os dados nacionais do setor passaram a ser publicados pelo Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA) e pelo SINIR [Brasil. Ministério das Cidades 2025, SINIR sd].

Este trabalho trata da etapa de coleta, e não da destinação. A coleta domiciliar é fortemente influenciada pela geração per capita, pela densidade aparente dos resíduos e pelo tipo de acondicionamento. O manual do IBAM indica 230 kg/m³ como peso específico aparente do lixo domiciliar solto, na falta de dados locais, e descreve contêineres plásticos de 120 a 1100 L e caminhões compactadores de 6 a 19 m³ [Monteiro et al. 2001]. A agência ambiental dos Estados Unidos reporta faixas de 148 a 178 kg/m³ para resíduos mistos soltos e de 237 a 415 kg/m³ para resíduos compactados [U.S. Environmental Protection Agency 2016]. A diferença entre essas fontes já mostra que converter volume em massa exige hipóteses explícitas; por isso, o modelo deste trabalho opera em volume e só converte para massa quando a fonte do fator está indicada.

2.2. Cidades inteligentes e IoT na gestão de resíduos

Na gestão de resíduos, as aplicações de IoT mais frequentes são o monitoramento do nível de enchimento, a identificação de contêineres e veículos e a roteirização da coleta [Anagnostopoulos et al. 2017, Esmaeilian et al. 2018]. Uma revisão sistemática com 173 estudos primários mapeou sensores, atuadores, partes interessadas e dados trocados nesses sistemas [Sosunova and Porras 2022]. Outra revisão define a lixeira inteligente como o contêiner dotado de monitoramento de nível e conectividade IoT e aponta a falta de padronização entre as soluções [Zoumpoulis et al. 2024]. Quanto à comunicação, um levantamento sobre sistemas baseados em sensores identificou o LoRaWAN como o protocolo preferido para automação em áreas urbanas [Vishnu et al. 2022], o que contrasta com o Wi-Fi usado no protótipo deste trabalho. Revisões sobre inteligência artificial no setor ressaltam que qualidade de dados, privacidade e custo ainda limitam a adoção [Olawade et al. 2024].

Uma arquitetura IoT para esse fim costuma ser descrita em camadas: dispositivos de borda com sensores e microcontrolador, uma camada de comunicação e uma camada de aplicação que armazena, processa e apresenta os dados [de Oliveira and Kniess 2018]. O protótipo de 2024 seguiu essa organização. A presente versão a desdobra em sete camadas, separando a ingestão, a persistência, a inteligência operacional, a visualização e a avaliação (Seção 4).

2.3. Medição de nível por ultrassom

O HC-SR04 emite um pulso de 40 kHz e mede o tempo até o retorno do eco. Sua folha de dados indica faixa de 2 a 400 cm, ângulo de medição de 15° e precisão de até 3 mm, e recomenda alvo com área mínima de 0,5 m² e superfície "o mais lisa possível" [Elecfreaks sd]. A superfície de resíduos em um contêiner não atende a essas condições: é irregular, pode ter sacos inclinados e varia de material. Como o sensor registra o primeiro eco recebido dentro do cone, a distância medida tende a corresponder ao ponto mais alto do monte, e não ao nível médio. Um estudo exploratório comparou o monitoramento por sensores ultrassônicos com a observação visual dos motoristas e analisou,

para cada abordagem, a troca entre o número de coletas e o número de transbordamentos [Brouwer et al. 2023].

A velocidade do som no ar varia com a temperatura. A aproximação linear $c \approx 331{,}3 + 0{,}606\,T$ m/s (com T em °C) mostra variação de cerca de 5% entre 10 e 40 °C. O DHT11 mede temperatura de 0 a 50 °C com exatidão típica de ± 1 °C [D-Robotics UK 2010], o que é suficiente para essa compensação. No protótipo original, o DHT11 foi apresentado como um sensor que influenciaria o nível de enchimento; nesta versão, seu papel limita-se à compensação da velocidade do som e ao registro de condições ambientais.

2.4. O protocolo MQTT

O MQTT é um protocolo de mensagens do tipo publicação/assinatura padronizado pela OASIS, nas versões 3.1.1 [Banks and Gupta 2014] e 5.0 [Banks et al. 2019]. Os clientes não se comunicam diretamente: publicam mensagens em *tópicos* hierárquicos de um *broker*, que as entrega aos clientes com assinaturas compatíveis, inclusive por curingas (+ para um nível, # para vários). Quatro recursos do protocolo são usados neste trabalho:

- **Qualidade de serviço (QoS).** Com QoS 0, a mensagem é enviada no máximo uma vez, sem confirmação; com QoS 1, ao menos uma vez, com confirmação e possível duplicação; com QoS 2, exatamente uma vez, por meio de um protocolo de quatro passos [Banks and Gupta 2014]. A garantia vale entre cada cliente e o broker; não há garantia fim a fim se um cliente perde dados antes de publicá-los.
- **Mensagens retidas.** O broker guarda a última mensagem retida de cada tópico e a entrega imediatamente a novos assinantes, o que é útil para o estado de disponibilidade de um dispositivo.
- ***Last Will and Testament* (LWT).** Na conexão, o cliente registra uma mensagem que o broker publica se a conexão for encerrada sem a mensagem DISCONNECT, por exemplo após queda de energia ou expiração do *keepalive*.
- **Sessões persistentes.** Com *clean session* desativado, o broker mantém as assinaturas e as mensagens QoS 1/2 pendentes de um cliente desconectado, entregando-as na reconexão.

Essas garantias dependem do cliente usado. A biblioteca PubSubClient, empregada no firmware do ESP32, implementa o MQTT 3.1.1, publica apenas com QoS 0 e não mantém fila de mensagens durante desconexões (ver o relatório de auditoria do firmware no repositório). Por isso, embora o broker Eclipse Mosquitto [Light 2017] aceite o MQTT 5.0, todo o sistema foi especificado em MQTT 3.1.1, e nenhuma afirmação sobre recursos do MQTT 5.0 é feita.

O MQTT não define autenticação nem cifragem: elas dependem do broker e do transporte (TLS). Brokers abertos à internet sem autenticação permitem leitura e injeção de mensagens por terceiros, e o protocolo é alvo de ataques de negação de serviço de baixa taxa, como o SlowITe, demonstrado contra serviços MQTT reais com e sem cifragem [Vaccari et al. 2020]. Estudos comparativos analisam o desempenho do MQTT frente a protocolos como o CoAP, inclusive com mecanismos de segurança ativados [Seoane et al. 2021].

2.5. Modelagem, simulação e gêmeo digital

Simulação de eventos discretos e simulação em tempo discreto são abordagens usuais para avaliar sistemas logísticos estocásticos quando a experimentação real é cara ou inviável [Law 2024]. A credibilidade dos resultados depende de verificação (o modelo computacional implementa corretamente o modelo conceitual) e de validação (o modelo conceitual representa o sistema real com exatidão suficiente para o propósito) [Sargent 2013]. Quando várias alternativas são comparadas, o uso de *números aleatórios comuns*, isto é, a submissão de todas as alternativas às mesmas realizações das variáveis aleatórias, reduz a variância das diferenças estimadas e permite comparações pareadas [Glasserman and Yao 1992].

O termo *gêmeo digital* é usado com frequência em plataformas urbanas de monitoramento [Barth et al. 2023, Cárdenas-León et al. 2024], nem sempre com o mesmo significado. A revisão de [Kritzinger et al. 2018] distingue, segundo o nível de integração de dados entre o objeto físico e sua contraparte digital, três categorias: *modelo digital*, *sombra digital* e *gêmeo digital*[2]. Neste trabalho, adota-se o seguinte critério operacional, coerente com essa gradação: há sombra digital quando o estado do objeto físico atualiza automaticamente o modelo, e só se fala em gêmeo digital quando, além disso, as decisões do modelo retornam automaticamente ao objeto físico. A plataforma desenvolvida mantém, para cada contêiner, um estado estimado atualizado automaticamente pela telemetria, mas as decisões voltam ao "mundo físico" por meio de rotas executadas por veículos, e esse mundo é, ele próprio, simulado. A solução corresponde, portanto, a uma *sombra digital* acoplada a um simulador. Por esse motivo, o termo "gêmeo digital", considerado no título provisório deste trabalho, não foi adotado.

2.6. Roteirização de veículos

O problema de roteirização de veículos (VRP) foi formulado por [Dantzig and Ramser 1959] e consiste em definir rotas de custo mínimo que partem de um depósito e atendem um conjunto de clientes. Na variante capacitada (CVRP), a soma das demandas de cada rota não pode exceder a capacidade do veículo; restrições de duração de jornada e de janelas de tempo geram outras variantes [Toth and Vigo 2014]. Como o CVRP é NP-difícil, instâncias práticas são resolvidas por heurísticas: construtivas, como o vizinho mais próximo [Rosenkrantz et al. 1977] e as economias de [Clarke and Wright 1964]; de melhoria local, como o 2-opt [Croes 1958]; e metaheurísticas, como a busca local guiada (GLS) [Voudouris and Tsang 1999]. A biblioteca de roteirização do Google OR-Tools combina essas técnicas em um resolvedor de propósito geral [Furnon and Perron 2025, Perron and Furnon 2025]. Nenhuma dessas heurísticas garante a solução ótima, e os resultados deste trabalho não são apresentados como ótimos.

A coleta de resíduos é um caso particular bastante estudado [Beliën et al. 2014, Han and Ponce Cueto 2015, Hess et al. 2024]. Quando o nível dos contêineres é conhecido, a decisão diária passa a incluir *quais* contêineres visitar, além da ordem de visita. Essa estrutura aproxima o problema do roteamento de inventário, no qual se

[2] Apenas o resumo desse artigo foi consultado; o texto completo não pôde ser obtido por acesso automatizado.

decide simultaneamente quando reabastecer (aqui, esvaziar) cada ponto e como roteirizar [Mes et al. 2014]. Uma formulação conveniente é o CVRP com prêmios (*prize-collecting*): cada contêiner não visitado gera uma penalidade, e o resolvedor equilibra a distância adicional com o benefício de visitar. Como os volumes reais só são conhecidos na chegada, a execução pode exigir um desvio ao depósito quando o caminhão enche, o que corresponde à política de recurso clássica do VRP com demandas estocásticas [Dror et al. 1989].

2.7. Avaliação experimental

Em experimentos de simulação com réplicas independentes, cada semente aleatória produz uma observação de cada métrica. Com números aleatórios comuns, as observações de duas políticas na mesma semente formam pares. O teste de postos sinalizados de [Wilcoxon 1945] compara pares sem supor normalidade das diferenças; quando várias comparações são feitas, o procedimento de [Holm 1979] controla a taxa de erro do tipo I da família de testes. Intervalos de confiança podem ser obtidos por reamostragem *bootstrap* [Efron 1979, Efron and Tibshirani 1993], e a correlação bisserial de postos pareada, calculada pela fórmula da diferença simples [Kerby 2014], fornece um tamanho de efeito entre -1 e 1. A ausência de significância estatística não demonstra equivalência; apenas indica que os dados não permitem distinguir as alternativas com a confiança adotada. Por fim, a reprodutibilidade de experimentos computacionais exige registrar versões de código e dependências, sementes, parâmetros e dados brutos [Sandve et al. 2013, Peng 2011].

3. Trabalhos relacionados

3.1. Critérios de seleção

Esta seção resulta de uma revisão narrativa, e não de uma revisão sistemática. As buscas foram feitas em novembro de 2026 no Crossref, no OpenAlex, no Google Scholar e nas páginas das editoras, com combinações dos termos *smart waste*, *smart bin*, *fill level*, *waste collection routing*, *IoT*, *dynamic routing* e *inventory routing*. Foram priorizados trabalhos que (i) usam dados de nível de contêineres para decidir a coleta e (ii) avaliam o efeito dessa decisão sobre distância, custo ou nível de serviço, com preferência para publicações de 2021 a 2026, sem descartar trabalhos clássicos. Os metadados de todas as referências foram conferidos no Crossref, no OpenAlex ou na página oficial. Para a maior parte dos trabalhos comparados, apenas o resumo estava acessível; a Tabela 1 registra somente o que consta nesses textos, e células sem informação são marcadas como “n.i.”.

3.2. Panorama

Os primeiros estudos quantitativos sobre coleta guiada por sensores já comparavam políticas dinâmicas com rotas fixas. [Johansson 2006] analisou 3300 contêineres de recicláveis com sensores de nível em Malmö, combinando modelo analítico e simulação de eventos discretos, e relatou reduções de custo, distância e horas de trabalho com escalonamento e roteirização dinâmicos. [Faccio et al. 2011] propuseram um modelo multiobjetivo que usa dados de rastreabilidade em tempo real (sensores volumétricos, RFID e GPS) e o avaliaram por simulação em uma cidade italiana. [Mes et al. 2014] trataram a coleta de contêineres subterrâneos com sensores como um problema de roteamento de inventário e relataram reduções de custo de até 40% com uma heurística antecipatória, cujos parâmetros foram ajustados por simulação.

Na década seguinte, multiplicaram-se as propostas de roteirização dinâmica. Em [Anagnostopoulos et al. 2015], o roteamento considera frota heterogênea e falhas de caminhões. [Akhtar et al. 2017] combinaram CVRP com um algoritmo de busca por retrocesso e um limiar de nível; o melhor desempenho ocorreu com limiares de 70% a 75%, com redução de 36,8% na distância. [Hannan et al. 2020] compararam rotas fixas e variáveis com limiar de 70% e relataram ganhos de eficiência e reduções de custo e emissões. [Ramos et al. 2018] compararam abordagens operacionais para o problema de coleta inteligente com dados reais. Abordagens preditivas estimam o nível futuro dos contêineres para antecipar a coleta: [Ferrer and Alba 2019] relataram rotas 33,2% mais curtas em uma cidade espanhola, e [Iosif et al. 2026] combinaram aprendizado de máquina de curto prazo com VRP dinâmico usando sensores reais e dados sintéticos.

Trabalhos mais recentes deslocam a atenção para a integração entre dados e serviço. [Barth et al. 2023] usaram 98 contêineres com sensores na Suíça para estudar a troca entre custo e qualidade de serviço e concluíram que reduções substanciais de custo são possíveis sem perda de qualidade. [Brouwer et al. 2023] compararam formas de monitoramento e mostraram que a escolha afeta o número de coletas e de transbordamentos. Plataformas como as de [Lozano et al. 2018] e [Cárdenas-León et al. 2024] enfatizam a infraestrutura de comunicação (LoRaWAN) e a visualização para gestores. A meta-análise de [Maciel et al. 2025], com 11 estudos e 21 amostras, estimou redução média combinada de 21,51% na distância percorrida e mostrou que estudos de simulação relatam reduções cerca de três vezes maiores que as implantações reais.

3.3. Lacuna e posicionamento

Os trabalhos analisados mostram ganhos consistentes quando a coleta passa a ser guiada por dados de nível, mas três aspectos aparecem pouco e raramente juntos nos textos consultados. O primeiro é a modelagem explícita das imperfeições da telemetria: perda de mensagens, leituras espúrias do ultrassom, sensores inoperantes e dados desatualizados. [Anagnostopoulos et al. 2015] tratam falhas de caminhões, não de sensores. O segundo é a comparação *pareada* de políticas fixa, por limiar, dinâmica e preditiva sob as mesmas restrições de frota e de jornada, com números aleatórios comuns, réplicas e testes estatísticos com correção para comparações múltiplas. O terceiro é a disponibilidade de uma plataforma aberta que inclua a camada de telemetria e não apenas o otimizador.

Este trabalho se posiciona nessa interseção, de forma incremental. Ele não propõe um novo algoritmo de roteirização: usa um resolvedor estabelecido e concentra a contribuição na arquitetura, na modelagem de falhas e no protocolo experimental. A pergunta implícita na meta-análise de [Maciel et al. 2025], isto é, quanto do ganho reportado em simulação resiste a condições menos favoráveis, orientou o desenho dos experimentos E2 e E3. Como a busca não foi sistemática e vários trabalhos foram lidos apenas pelo resumo, não se afirma que essa combinação seja inédita.

4. Arquitetura e desenvolvimento

4.1. Requisitos

Os requisitos foram derivados das limitações identificadas no protótipo de 2024 e das questões de pesquisa. Os principais são:

Tabela 1. Comparação de trabalhos relacionados (informações extraídas dos resumos, salvo indicação). n.i.: não informado.

Trabalho	Sensoriamento e dados	Comunicação	Avaliação e otimização	Limitações para nossa questão
[Johansson 2006]	nível em 3300 contêineres de recicláveis	sem fio (n.i.)	modelo analítico + simulação; políticas dinâmicas vs. rotas fixas	recicláveis; sem falhas de sensor
[Faccio et al. 2011]	volume, RFID, GPS	GPRS	VRP multiobjetivo; simulação	ganhos não quantificados no resumo
[Mes et al. 2014]	contêineres subterrâneos com sensores	n.i.	roteamento de inventário; até -40% de custo	dependência do ajuste de parâmetros
[Anagnostopoulos et al. 2015]	dados sintéticos e reais	n.i.	roteamento dinâmico robusto	falhas apenas de caminhão; avaliação qualitativa
[Akhtar et al. 2017]	nível (limiar)	n.i.	CVRP + busca por retrocesso; $-36{,}8\%$ distância	horizonte de 4 dias; sem teste estatístico declarado
[Ramos et al. 2018]	nível em tempo real	n.i.	três abordagens operacionais; caso real	ganho não quantificado no resumo
[Lozano et al. 2018]	peso, volume, temperatura	LoRaWAN	rotas dinâmicas; plataforma	contexto rural
[Ferrer and Alba 2019]	histórico + previsão	n.i.	roteirização a partir de previsão; rotas $-33{,}2\%$	um caso; comparação com rota da empresa
[Hannan et al. 2020]	nível (limiar 70%)	n.i.	programação linear inteira mista; rotas fixas vs. variáveis	sem incerteza de sensor ou comunicação
[Barth et al. 2023]	98 contêineres (campo)	n.i.	troca custo $\times$ serviço	contexto suíço
[Brouwer et al. 2023]	ultrassom vs. observação visual	n.i.	coletas $\times$ transbordamentos	uma empresa
[Iosif et al. 2026]	sensores reais + sintéticos	n.i.	previsão de curto prazo + VRP dinâmico	sem análise de falhas
[Maciel et al. 2025]	—	—	meta-análise: $-21{,}5\%$ distância; simulação $-39{,}8\%$ vs. campo $-12{,}4\%$	só distância; 11 estudos
Este trabalho	ultrassom simulado com ruído, viés, falhas	MQTT 3.1.1 (broker real e canal emulado)	A, B, C, D pareadas; 30 sementes; fronteiras custo $\times$ serviço; falhas de telemetria	simulação; contêineres hipotéticos; demanda não calibrada em campo

RF1 Cada contêiner deve publicar ocupação e distância medidas, com identificação, número de sequência, instante e indicador de validade.

RF2 A plataforma deve rejeitar mensagens malformadas, descartar duplicatas, não regredir o estado com mensagens atrasadas e distinguir "contêiner sem dados recentes" de "contêiner vazio".

RF3 A plataforma deve informar a disponibilidade de cada dispositivo, inclusive após queda abrupta.

RF4 O planejamento diário deve selecionar contêineres e gerar rotas que respeitem capacidade dos veículos e duração da jornada.

RF5 Diferentes políticas de coleta devem ser executáveis sobre o mesmo cenário, com as mesmas realizações aleatórias.

RNF1 Reprodutibilidade: toda execução deve ser determinada por configuração e semente registradas.

RNF2 Isolamento: os experimentos usam broker local, sem tráfego para serviços públicos.

RNF3 Verificabilidade: componentes críticos devem ter testes automatizados e invarian-

tes verificados em tempo de execução.

4.2. Visão geral

A Figura 1 mostra as sete camadas implementadas. Na camada de dispositivos convivem o firmware do ESP32, reescrito a partir do protótipo, e os contêineres virtuais do simulador; ambos seguem o mesmo contrato de mensagens. A comunicação passa por um broker Eclipse Mosquitto 2.0.20 executado localmente em contêiner, acessível apenas pela interface de *loopback*. A ingestão valida e filtra as mensagens e mantém o estado estimado de cada contêiner, que é persistido em SQLite e consumido pelas políticas de coleta. As rotas geradas são executadas pelos veículos simulados, cujas coletas zeram o nível dos contêineres virtuais e o estado estimado. A camada de avaliação reúne o executor de experimentos e as análises estatísticas.

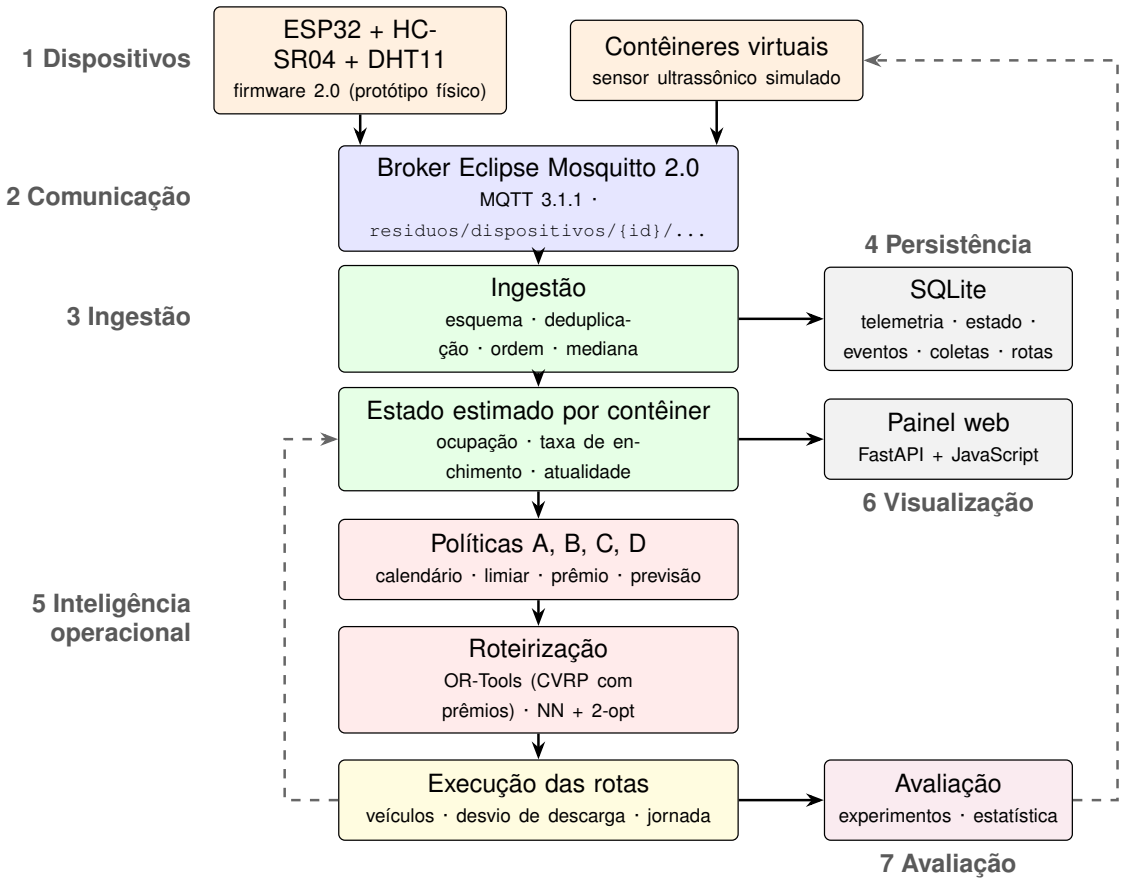
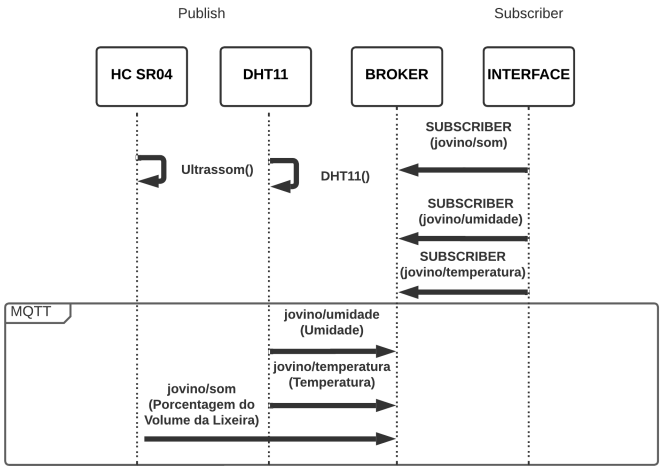


Figura 1. Arquitetura da plataforma. Setas contínuas: fluxo de dados; setas tracejadas: efeito das coletas executadas sobre o estado dos contêineres e registro para avaliação.

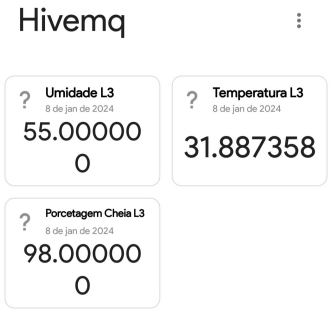
Optou-se por um único pacote Python (`wastesim`), organizado em módulos coesos, em vez de microsserviços. O broker é o único processo separado, porque é ele que precisa ser exercitado como no sistema real. Essa escolha reduz a infraestrutura necessária para reproduzir o estudo a um ambiente Python e a um contêiner do Mosquitto.

4.3. Protótipo de 2024 e auditoria do firmware

O protótipo de 2024 usava um ESP32 DevKit V1, um HC-SR04 e um DHT11, publicando valores em tópicos de um broker público e exibindo-os no aplicativo MQTT Dashboard (Figura 2). Os testes da época foram qualitativos: verificou-se a chegada das mensagens com um obstáculo sobre uma régua, o acionamento remoto de um LED, o uso de dois ESP32 em tópicos distintos e a resposta do DHT11 a um soprador térmico e a um borrifador. Esses registros são mantidos como evidência do funcionamento da comunicação, e não como medição de desempenho.



(a) Sequência de publicação/assinatura (2024)



(b) Aplicativo MQTT Dashboard

Figura 2. Material do protótipo de 2024, reproduzido do trabalho original.

A auditoria do código original identificou 27 defeitos, cada um verificado no código e, quando aplicável, na documentação das bibliotecas e nas folhas de dados. A Tabela 2 resume os de maior impacto. Dois deles comprometem diretamente a medida usada no trabalho: a "porcentagem de volume" era calculada como $d/T_{\max} \cdot 100$, que *cresce* quando a lixeira esvazia, e, em caso de eco perdido, a biblioteca de ultrassom usada retornava 51 cm, valor que a fórmula convertia em 102%. O código também continha credenciais de Wi-Fi em texto claro, publicadas em repositório público; elas não são reproduzidas aqui, e recomenda-se trocá-las.

O firmware 2.0 separa medição, transmissão e rede em módulos e usa um agendador baseado em `millis()`, sem `delay()` no laço principal. A distância é a mediana de uma rajada de cinco pulsos espaçados em 65 ms (a folha de dados recomenda ciclo superior a 60 ms [Elecfreaks sd]), com compensação opcional da velocidade do som pela temperatura do DHT11. A telemetria é publicada a cada 60 s por padrão, com intervalo ajustável por comando remoto. Eventos de limiar usam histerese, e um *watchdog* de 30 s reinicia o dispositivo em caso de travamento.

O firmware foi compilado com o `arduino-cli` 1.5.1 e o núcleo `esp32` 3.3.12 para a placa DOIT ESP32 DevKit V1, com todos os avisos habilitados, sem erros nem avisos. A variante padrão ocupa 941910 bytes de flash (71%) e 51284 bytes de RAM estática (15%). O firmware *não* foi executado em placa real nem no simulador Wokwi: o

Tabela 2. Principais defeitos do firmware de 2024 e correções (auditoria completa em `firmware/AUDITORIA.md`).

Defeito	Correção no firmware 2.0
Percentual proporcional ao espaço vazio, sem limites	ocupação $= 100(H - (d - \mathit{off}))/H$, limitada a $[0, 100]$
Eco perdido convertido em 51 cm (102%)	`pulseIn` com tempo limite; mediana de 5 pulsos com quórum de 3; `valida=false`
Índice de calor publicado como "temperatura"	publica a temperatura do ar
`dht.begin()` ausente; LED como entrada	inicialização corrigida
Broker público, sem autenticação nem TLS	broker configurável, usuário/senha, TLS opcional
Laços bloqueantes de Wi-Fi e MQTT	máquina de estados não bloqueante, recuo exponencial com *jitter*
Sem LWT, sem estado, sem sequência	LWT retido, estado `online`, `boot` em NVS e `seq`
ECHO (5 V) direto em GPIO de 3,3 V	divisor 1 kΩ/2 kΩ ($\approx$ 3,33 V)
ECHO no GPIO12 (pino de *strapping* da tensão da flash)	ECHO movido para o GPIO27
Credenciais no código	`config.h` fora do controle de versão

protótipo físico não estava disponível, e a execução automatizada do Wokwi exige uma credencial que não foi criada. Os arquivos de circuito para o Wokwi estão no repositório, prontos para uso, mas não constituem resultado deste trabalho. Assim, o comportamento em tempo de execução do firmware 2.0 permanece não verificado; o que é verificado em execução é o contrato MQTT, exercitado pelos dispositivos virtuais.

4.4. Contrato de mensagens MQTT

Os tópicos seguem o padrão `residuos/dispositivos/{id}/{tipo}`, com quatro tipos (Tabela 3). A plataforma assina `residuos/dispositivos/+/telemetria`, `.../+/estado` e `.../+/eventos`. A Figura 3 ilustra a sequência de conexão, publicação e queda abrupta.

Tabela 3. Tópicos do contrato MQTT (esquema versão 1).

Sufixo	Sentido	QoS	Retido	Conteúdo
`telemetria`	dispositivo → plataforma	0 (ESP32) / 1 (virtual)	não	leituras periódicas
`estado`	dispositivo → plataforma	1	sim	`online`/`offline`; LWT
`eventos`	dispositivo → plataforma	0/1	não	limiar, falha de sensor, reinício
`comandos`	plataforma → dispositivo	1	não	intervalo, LED, *ping*

Cada telemetria é um objeto JSON com versão do esquema (`v`), identificador (`id`), contador de inicializações persistido em memória não volátil (`boot`), número de sequência (`seq`), instante da medição (`ts`), origem do relógio (`ts_src`) e uma lista de leituras, cada uma com tipo, valor, unidade e validade:

```
{"v":1, "id":"LX-0007", "boot":4, "seq":1532,
```

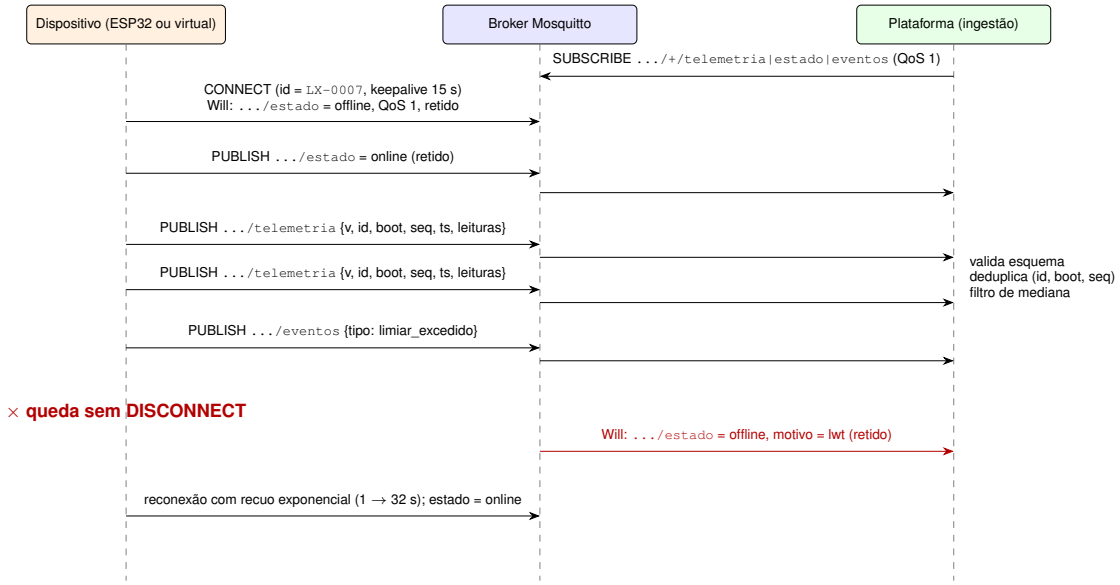


Figura 3. Sequência de mensagens do contrato: conexão com *Last Will*, publicação de estado retido, telemetria, evento e publicação do LWT pelo broker após queda sem DISCONNECT.

```
"ts":1731580000, "ts_src":"ntp",
"leituras":[
  {"tipo":"distancia","valor":31.2,"unidade":"cm","valida":true},
  {"tipo":"ocupacao","valor":78.8,"unidade":"%","valida":true}]}
```

O par (`boot`, `seq`) identifica unicamente cada mensagem de um dispositivo, o que permite descartar duplicatas geradas por reentregas com QoS 1 sem confundi-las com mensagens novas após reinicialização.

4.5. Ingestão e estado estimado

A ingestão aplica, nesta ordem: validação de esquema (versão, coerência entre `id` e tópico, tipos, unidades e faixa da ocupação); deduplicação por (`id`, `boot`, `seq`); registro do último contato; descarte de leituras inválidas para fins de estado; e rejeição, para o estado corrente, de mensagens com instante anterior ao último estado aplicado ou à última coleta registrada. A ocupação observada $\hat{f}_i$ é a mediana das três últimas leituras válidas do ciclo corrente, o que elimina leituras espúrias isoladas. Como a mediana introduz um atraso de uma leitura quando há tendência, o instante associado ao estado é o da leitura mediana, e não o da mais recente; esse detalhe foi revelado por um teste automatizado.

A taxa de enchimento $\hat{r}_i$ (fração do volume por hora) é estimada por mínimos quadrados sobre as leituras das últimas 48 h do ciclo corrente, desde que haja ao menos 6 leituras cobrindo 12 h; na falta delas, usa-se uma média móvel exponencial ($\alpha = 0{,}3$) das taxas de ciclos anteriores e, por último, a mediana das taxas da frota. A projeção para um instante futuro é $\tilde{f}_i(t) = \hat{f}_i + \hat{r}_i\,(t - t_i^{\mathrm{obs}})$. Um contêiner cujo último estado tem mais de 24 h é marcado como *desatualizado*; nesse caso, as políticas podem usar a estimativa por taxa de longo prazo (*fallback*) ou manter o último valor observado. Quando um veículo registra uma coleta, o estado é zerado e um novo ciclo começa.

4.6. Persistência

O SQLite armazena todas as mensagens de telemetria recebidas, com o resultado da ingestão (aplicada, duplicada, fora de ordem ou inválida), o estado de disponibilidade de cada dispositivo, os eventos, as mensagens rejeitadas, as rotas planejadas e as coletas executadas. Nos experimentos em lote, os resultados são gravados em arquivos JSON Lines, uma linha por execução, com a configuração completa, a semente e as métricas; um manifesto registra o *commit* do código, as versões das dependências e a plataforma.

4.7. Simulador

O simulador é de tempo discreto, com passo de 15 min (Figura 4). Antes da execução, são sorteados, a partir de fluxos aleatórios independentes derivados da semente, a geometria do cenário, a matriz de geração de resíduos, os ruídos e falhas dos sensores e as perdas e atrasos do canal. Como esses sorteios não dependem da política, duas políticas executadas com a mesma semente enfrentam exatamente as mesmas condições, o que foi verificado por teste automatizado.

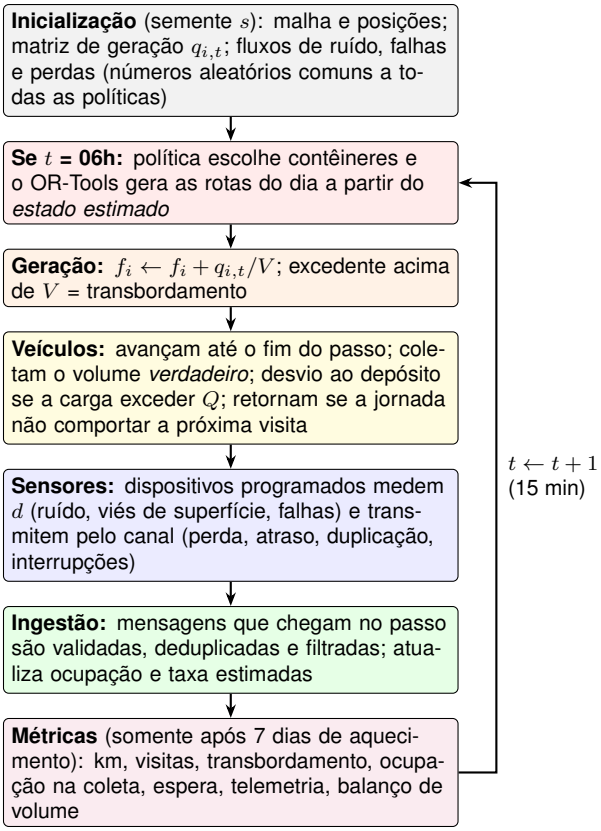


Figura 4. Laço da simulação. As decisões usam apenas o estado estimado; o estado verdadeiro é usado na geração, na execução das coletas e nas métricas.

A separação entre estado verdadeiro e estado estimado é central. As políticas B, C e D só enxergam o que chegou pela telemetria; o estado verdadeiro é usado para gerar resíduos, para determinar o volume efetivamente recolhido na chegada do veículo e para calcular as métricas. A cada execução, o simulador verifica o balanço de volume na

janela avaliada: o volume gerado deve ser igual à soma do volume coletado, do volume transbordado e da variação do estoque nos contêineres.

O modo *live* usa as mesmas classes, mas substitui o canal emulado pelo broker: cada contêiner virtual é um cliente MQTT próprio, com LWT e reconexão automática (paho-mqtt 2.2, MQTT 3.1.1), e a plataforma é um assinante com sessão persistente que alimenta a mesma rotina de ingestão. Nos experimentos em lote, o canal emulado permite processar centenas de milhares de mensagens por execução; a equivalência entre os dois caminhos é verificada no experimento E6.

4.8. Políticas de coleta e roteirização

A Figura 5 resume a decisão diária, tomada às 06h para o turno das 07h às 15h. As quatro políticas diferem apenas na seleção dos contêineres e na forma de atribuir prêmios; frota, capacidade, jornada, velocidade, tempos de atendimento e regra de execução são os mesmos.

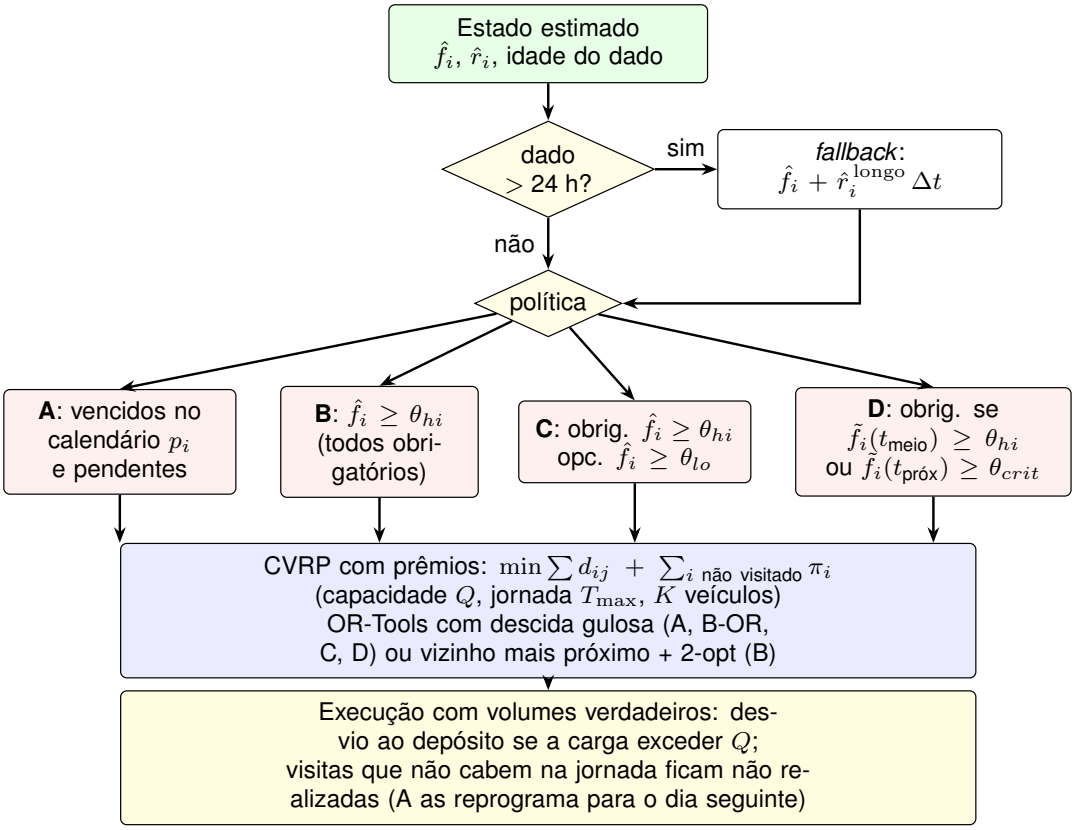


Figura 5. Decisão diária de coleta e execução das rotas.

A – periódica fixa. Cada contêiner recebe um período $p_i = \min(7, \max(1, \lfloor \gamma V / \mu_i \rfloor))$ dias, em que μ_i é a taxa média de geração de longo prazo e $\gamma = 0{,}8$ é a ocupação média desejada na coleta; as fases são distribuídas para equilibrar a carga diária. A política usa a taxa média *verdadeira* do simulador, o que equivale a um planejador com histórico perfeito. Trata-se de uma linha de base deliberadamente exigente: a coleta fixa não é penalizada por um mau dimensionamento de frequências. Visitas não realizadas são reprogramadas para o dia seguinte.

B – limiar. São obrigatórios os contêineres com $\hat{f}_i \geq \theta_{hi} = 0{,}75$. As rotas são construídas pelo vizinho mais próximo, respeitando capacidade e jornada, e melhoradas por 2-opt. A variante B-OR usa a mesma seleção com o OR-Tools, para separar o efeito da seleção do efeito do roteirizador.

C – dinâmica otimizada. São obrigatórios os contêineres com $\hat{f}_i \geq \theta_{hi}$ e opcionais os com $\theta_{lo} = 0{,}50 \leq \hat{f}_i < \theta_{hi}$. O prêmio de um opcional é $\pi_i = \lambda\, \hat{f}_i V$, com $\lambda = 1$ m por litro: o contêiner entra na rota se o desvio necessário for menor que o prêmio.

D – preditiva. Como C, mas com ocupações projetadas pela taxa estimada. É obrigatório o contêiner cuja projeção para o meio do turno é $\geq \theta_{hi}$ ou cuja projeção para o fim do turno seguinte é $\geq \theta_{crit} = 0{,}95$, isto é, que provavelmente transbordaria antes da próxima oportunidade de coleta.

O problema diário é um CVRP com prêmios. Sejam S o conjunto de contêineres selecionados, K o número de veículos, Q a capacidade por viagem, q_i o volume estimado, d_{ij} a distância na malha (assimétrica, por causa das vias de sentido único), t_{ij} o tempo de viagem, s o tempo de atendimento e $T_{\max}$ a jornada. O resolvedor busca rotas $R_1, \ldots, R_K$ que minimizem

$$\sum_{k=1}^{K} \sum_{(i,j)\in R_k} d_{ij} \;+\; \sum_{i \in S \setminus \cup_k R_k} \pi_i \tag{1}$$

sujeitas a $\sum_{i\in R_k} q_i \leq Q$ e $\sum_{(i,j)\in R_k} (t_{ij}+s) \leq T_{\max}$ para todo k. Contêineres obrigatórios recebem $\pi_i = 10^8$, valor superior a qualquer distância possível, de modo que só são omitidos quando não há solução viável que os inclua. O OR-Tools 9.15 é configurado com solução inicial pelo arco mais barato e busca local por descida gulosa até um ótimo local. Essa configuração é determinística: a mesma entrada produz sempre a mesma rota, independentemente da velocidade da máquina. O efeito de substituí-la pela busca local guiada, interrompida por tempo, é medido no experimento E5.

Na execução, o veículo chega a cada contêiner e recolhe o volume verdadeiro naquele instante. Se a carga excederia Q, ele vai ao depósito, descarrega e retorna [Dror et al. 1989]; se a jornada não comporta a próxima visita e o retorno, ele encerra a rota, e as visitas restantes são registradas como não realizadas.

4.9. Painel operacional

O painel web foi construído com FastAPI no servidor e HTML, CSS e JavaScript sem bibliotecas externas no navegador, para funcionar sem acesso à internet. Ele lê exclusivamente dados produzidos pela aplicação: o estado escrito pelo modo *live* a cada passo, o banco SQLite alimentado pela ingestão MQTT, um traço gravado de simulação e o resumo dos experimentos. Há três visões:

- **Operação ao vivo** (Figura 6a): mapa da malha viária com os contêineres coloridos pela ocupação estimada, contêineres sem dado recente em contorno, dispositivos *offline* marcados, depósito, veículos e rotas do dia desenhadas pelas ruas; indicadores de distância, coletas, transbordamento, dispositivos *online* e mensagens (recebidas, duplicadas e rejeitadas); filtros por estado; histórico de telemetria de cada contêiner, consultado no SQLite; e lista de eventos MQTT. Um seletor alterna entre o estado estimado pela plataforma e o estado verdadeiro do simulador, o que permite observar a diferença entre o que o operador vê e o que de fato ocorre.

- ***Replay* A $\times$ D** (Figura 6b): reprodução sincronizada de duas execuções com a mesma semente, com controle de tempo e velocidade.
- **Resultados**: tabela do experimento E1 e fronteira do E2, lidas do resumo gerado pela análise.

4.10. Verificação do software

O pacote tem 67 testes automatizados (pytest), que cobrem: a fórmula de ocupação e seus limites físicos; leituras inválidas; o viés de superfície do modelo de sensor, comparado ao valor teórico $\sigma\sqrt{2/\pi}$; a fração de indisponibilidade do processo de falhas, comparada a $\mathrm{MTTR}/(\mathrm{MTBF} + \mathrm{MTTR})$; a média de longo prazo da geração; o determinismo por semente; a validação do esquema de mensagens; a deduplicação, a ordenação e o filtro de mediana; a estimativa de taxa em uma série linear; o roteirizador em instâncias pequenas, comparado à enumeração exata; o respeito à capacidade e à jornada; o balanço de volume para as quatro políticas; e o uso de números aleatórios comuns entre políticas.

5. Metodologia experimental

5.1. Caracterização da pesquisa

Trata-se de uma pesquisa aplicada, de abordagem quantitativa, conduzida por experimentos computacionais com um modelo de simulação estocástica. O protocolo (hipóteses, sementes, métricas e testes) foi registrado no repositório antes das rodadas definitivas (`docs/protocolo-experimental.md`). As rodadas-piloto, usadas para depuração e para medir o custo computacional, empregaram as sementes 1 e 3; as rodadas definitivas usam as sementes 1001 a 1030, e os resultados do piloto não entram em nenhuma análise.

5.2. Modelos

Geração de resíduos. Para o contêiner i, no passo t do dia d (dia da semana w, hora h), o volume solto gerado, em litros, é

$$q_{i,t} = \mu_i \, I \, W_{p_i}(w) \, Z_{i,d} \, H_{p_i}(h) \, E_{i,t} + e_{i,t}, \tag{2}$$

em que μ_i é a taxa média diária de longo prazo, I é a intensidade do cenário, W_p e H_p são os perfis semanal (média 1) e horário (soma 1) do perfil $p_i \in \{$residencial, comercial, institucional$\}$, $Z_{i,d}$ e $E_{i,t}$ são fatores Gama de média 1 que representam a variação entre dias (CV 0,25) e a chegada irregular dos descartes ao longo do dia (CV 1,0), e $e_{i,t}$ representa descartes volumosos esporádicos (processo de Poisson, em média um a cada 30 dias por contêiner, com 15% a 45% do volume do contêiner). A heterogeneidade entre contêineres é dada por $\mu_i = \bar{\mu}_{p_i} \, \eta_i$, com η_i lognormal de média 1 e CV 0,35. A distribuição Gama foi escolhida por ser não negativa e permitir controlar a média e o coeficiente de variação de forma independente; a lognormal, por produzir a assimetria à direita esperada entre pontos de coleta.

Estado do contêiner e transbordamento. A ocupação verdadeira $f_i \in [0, 1]$ evolui como $f_i \leftarrow f_i + q_{i,t}/V$. Se o resultado excede 1, o excedente $(f_i - 1)V$ é contabilizado como volume transbordado e f_i é limitado a 1. O modelo, portanto, não supõe que o resíduo excedente seja recolhido depois; ele representa uma falha de serviço. Uma coleta zera f_i.

Sensor ultrassônico. Com contêiner prismático de seção constante, a fração de volume é igual à fração de altura (Figura 7). Com D_0 a distância do sensor ao fundo, *off* a zona morta de montagem e $H = D_0 - \mathit{off}$, a distância verdadeira até a superfície é $d = D_0 - fH$, e a ocupação calculada pelo firmware e pela plataforma é

$$\hat{o}(d) = 100 \cdot \min\left\{1, \max\left\{0, \frac{H - (d - \mathit{off})}{H}\right\}\right\}, \tag{3}$$

considerada inválida se d estiver fora de $[2, 400]$ cm ou além do fundo ($d > D_0 + 15$ cm). A medição simulada é

$$d^{\mathrm{med}} = d + \sigma_r\, \varepsilon_1 - \sigma_s\, |\varepsilon_2|, \qquad \varepsilon_1, \varepsilon_2 \sim \mathcal{N}(0, 1), \tag{4}$$

em que o termo semi-normal negativo representa o retorno do primeiro eco pelo ponto mais alto de uma superfície irregular e produz um viés de superestimação da ocupação de $\sigma_s\sqrt{2/\pi}$. Com probabilidade de 1% a leitura é perdida (sem eco) e com 0,5% é espúria, entre 3 e 20 cm, simulando uma obstrução momentânea. A Figura 8(b) mostra 1.500 leituras simuladas nos níveis base e de ruído seis vezes maior. A formulação não se aplica a geometrias não prismáticas sem uma curva altura–volume específica.

Disponibilidade e canal. Cada dispositivo alterna entre operacional e indisponível segundo uma cadeia de Markov de dois estados, com tempo médio entre falhas de 60 dias e tempo médio de reparo de 12 h. Opcionalmente, uma fração dos dispositivos falha definitivamente em instante uniforme no horizonte, ou passa a repetir a mesma leitura (sensor "congelado"). Cada mensagem é perdida com probabilidade p_{perda}, duplicada com probabilidade 0,2% e atrasada segundo uma lognormal de mediana 0,5 s, com 0,2% de atrasos longos (1 a 6 h). Interrupções regionais tornam inacessíveis os dispositivos mais próximos de um centro sorteado durante um intervalo; o firmware não armazena leituras para reenvio, de modo que as mensagens desse período são perdidas.

Planejamento e execução. As políticas e a formulação do CVRP com prêmios foram apresentadas na Seção 4.8 (Equação 1).

5.3. Cenário, dados e parâmetros

O cenário usa a malha viária dirigível do município de Aracaju, extraída do OpenStreetMap [Haklay and Weber 2008] a partir do extrato da região Nordeste distribuído pela Geofabrik [Geofabrik GmbH and OpenStreetMap contributors 2026], com integridade conferida por MD5. O limite municipal é a relação administrativa do próprio OSM. Mantiveram-se as vias de uso automotivo, os sentidos de circulação e a maior componente fortemente conexa: 45011 nós, 86410 arcos dirigidos e 3058,7 km de arcos. Os contêineres são posicionados em interseções sorteadas (uniformemente, ou em agrupamentos no experimento E4), o que faz a densidade de contêineres acompanhar a densidade de ruas. O depósito é o nó mais próximo de um ponto hipotético no oeste da área urbana (Figura 9). As distâncias são caminhos mínimos na malha dirigida, calculados pelo algoritmo de Dijkstra (SciPy [Virtanen et al. 2020]).

A Tabela 4 separa os parâmetros segundo sua natureza: dado público observado (P), dado geográfico real (G), valor da literatura (L), hipótese de cenário (H) e dado sintético (S). Os parâmetros de demanda são hipóteses ancoradas em dados oficiais: com geração domiciliar de 0,88 kg/hab·dia no Nordeste [Brasil. Ministério das Cidades 2025, p. 26] e densidade aparente de 230 kg/m³ [Monteiro et al. 2001], cada habitante gera cerca de 3,8 L/dia de resíduo solto, e um contêiner com taxa média de 300 L/dia atenderia cerca de 78 pessoas. Não há dado municipal verificado de geração por contêiner em Aracaju, e os perfis semanais e horários não foram calibrados com medições; por isso, as conclusões são apresentadas como condicionais a esses parâmetros, e os mais influentes são variados em E3 e E4.

Tabela 4. Parâmetros principais e sua natureza (P: dado público; G: geográfico real; L: literatura; H: hipótese; S: sintético). Lista completa em `docs/parametros.md`.

Parâmetro	Valor-base	Nat.	Fonte ou justificativa
Malha viária	Aracaju, OSM, 45.011 nós	G	[Geofabrik GmbH and OpenStreetMap contributors 2026]
Posição de contêineres e depósito	interseções sorteadas	S	hipotético
Geração domiciliar per capita	0,88 kg/hab·dia	P	[Brasil. Ministério das Cidades 2025] (contexto)
Densidade aparente (solto)	230 kg/m³	L	[Monteiro et al. 2001]
Volume do contêiner	1.100 L	L	[Monteiro et al. 2001]
Geometria	prismática; D_0 = 110 cm; off = 10 cm	H	simplificação
Taxa média por perfil	300 / 380 / 260 L/dia	H	$\approx$ 78 hab./contêiner
Mistura de perfis	60% / 25% / 15%	H	—
Variabilidade	lognormal CV 0,35; Gama CV 0,25 e 1,0	H	—
Faixa do HC-SR04	2–400 cm	L	[Elecfreaks sd]
Ruído; irregularidade da superfície	σ_r = 1,5 cm; σ_s = 3 cm	H	variado em E3
Leituras perdidas / espúrias	1% / 0,5%	H	variado em E3
MTBF / MTTR do dispositivo	60 dias / 12 h	H	—
Período de medição	60 min	H	variado em E3
Perda de mensagens	1%	H	variado em E3
Capacidade do caminhão	26.000 L soltos ($\approx$ 6 t)	L+H	15 m³ [Monteiro et al. 2001] × 400 kg/m³ [U.S. Environmental Protection Agency 2016] ÷ 230 kg/m³
Tempo de atendimento	60 s	L+H	41,95 s medidos [Carlos et al. 2019] + posicionamento
Descarga	15 min	L	[Monteiro et al. 2001]
Velocidade média	20 km/h	H	variada em E4
Jornada	8 h (07h–15h)	H	—
Frota	$\lceil \sum_i \mu_i/(0{,}7\,Q) \rceil$	H	mesma para todas as políticas
Limiares	θ_{hi} = 0,75; θ_{lo} = 0,50; θ_{crit} = 0,95	H	70–75% em [Akhtar et al. 2017]; varridos em E2

A frota é dimensionada pela demanda média total, com utilização-alvo de 70%, e é a mesma para todas as políticas de um cenário. Com essa regra, os cenários de 20, 100 e 500 contêineres usam 1, 2 e 9 veículos, respectivamente. Como a área do município é fixa, o número de contêineres altera também a densidade espacial: em $N = 20$, os pontos estão distantes entre si, situação que favorece pouco a seleção dinâmica.

5.4. Experimentos

A Figura 10 resume os seis experimentos. Cada execução simula 7 dias de aquecimento, descartados, seguidos de 28 dias avaliados (quatro semanas completas, de modo que todos os dias da semana têm o mesmo peso). O aquecimento elimina a influência do enchimento

inicial (uniforme entre 0 e 50%) e do estado inicial da plataforma, que começa sem histórico.

E1 – comparação principal. Políticas A, B, B-OR, C e D com 20, 100 e 500 contêineres; 30 sementes por combinação (450 execuções).

E2 – fronteira distância × serviço. Com 100 contêineres, cada política é executada em vários níveis de seu parâmetro de agressividade: ocupação-alvo $\gamma \in \{0{,}4; \ldots; 1{,}0\}$ para A e limiar $\theta_{hi} \in \{0{,}5; \ldots; 0{,}9\}$ para B-OR, C e D (com $\theta_{lo} = \theta_{hi} - 0{,}25$ e $\theta_{crit} = \theta_{hi} + 0{,}2$); 20 sementes (540 execuções). O objetivo é comparar políticas no mesmo nível de serviço, e não apenas em seus parâmetros padrão.

E3 – robustez da telemetria. Com 100 contêineres, fatores variados um de cada vez: perda de mensagens (5%, 20%, 50%); interrupções regionais de 48 h atingindo 50% dos dispositivos, em média uma vez por semana; medição ideal (sem ruído, sem viés de superfície e sem leituras inválidas ou espúrias) e ruído 3× e 6× (σ_r e σ_s multiplicados); falha permanente de 10% e 30% dos dispositivos; 10% de sensores congelados; período de medição de 15 min, 6 h e 24 h; e desativação do *fallback* nas condições de falha de 30% e de interrupção; 30 sementes (1.860 execuções).

E4 – sensibilidade operacional. Com 100 contêineres: intensidade de demanda 0,7 e 1,3 (com frota redimensionada); alta variabilidade (CV diário 0,5, CV intradiário 2,0, descartes volumosos a cada 10 dias); mudança de regime (+60% de geração em 30% dos contêineres a partir do dia 14) e surto geral (+30% em todos), ambos não antecipados pelo calendário de A nem pelo dimensionamento da frota; frota reduzida a um veículo; layout agrupado; e velocidades de 15 e 30 km/h; 30 sementes (1.200 execuções).

E5 – resolvedor. Descida gulosa × busca local guiada com limite de 5 s por dia, para A, C e D com 500 contêineres; 10 sementes (60 execuções).

E6 – integração MQTT. Broker Mosquitto real: entrega e latência com 100 dispositivos virtuais em QoS 0 e QoS 1 (três repetições); equivalência entre o modo *live* e o modo em lote com canal ideal; reinício do broker durante a publicação; queda abrupta de 10 dispositivos (LWT); e 50 mensagens malformadas.

5.5. Métricas

As métricas primárias são a **distância percorrida** (km/dia, incluindo desvios de descarga e retorno ao depósito) e o **transbordamento**, isto é, o volume que não coube nos contêineres, em percentual do volume gerado no período avaliado. As duas são analisadas em conjunto, porque uma política que deixa de atender contêineres percorre menos e transborda mais.

As métricas secundárias são: visitas por dia; km por m³ coletado; número de episódios em que um contêiner atinge a capacidade; horas de contêiner cheio por contêiner e dia; ocupação verdadeira média no momento da coleta; percentual de coletas com ocupação abaixo de 50%, aqui chamadas de *coletas prematuras*; tempo médio entre um contêiner cruzar 80% e ser coletado; utilização da capacidade dos veículos (volume coletado dividido pelo número de viagens vezes Q); viagens extras de descarga; visitas planejadas não realizadas; contêineres obrigatórios descartados pelo planejador; tempo de execução

do resolvedor; disponibilidade de telemetria (leituras válidas entregues sobre leituras programadas); e o erro absoluto médio da previsão de ocupação com 24 h de antecedência, comparado ao da persistência (supor que a ocupação não muda), calculado apenas para contêineres sem coleta no intervalo. Estimativas de combustível e emissões não são usadas como métrica: a única fonte verificada para o consumo de caminhões compactadores foi lida apenas no resumo e refere-se a outro país [Nguyen and Wilson 2010].

5.6. Análise estatística

Para cada condição, são calculados média, desvio-padrão, mediana, quartis e intervalo de confiança de 95% da média por *bootstrap* percentil, com 10000 reamostragens e semente fixa [Efron 1979, Efron and Tibshirani 1993]. As comparações pré-definidas (B, B-OR, C e D contra A; D contra C; C contra B-OR; B-OR contra B) são pareadas por semente. Para cada uma, reporta-se a diferença média com IC de 95% por *bootstrap*, a diferença relativa, o teste de postos sinalizados de Wilcoxon bilateral [Wilcoxon 1945] e a correlação bisserial de postos pareada r_{rb} [Kerby 2014], em que $r_{rb} = -1$ significa que a política alternativa teve valor menor que a de referência em todas as sementes. Os valores p são ajustados pelo procedimento de Holm [Holm 1979] dentro de cada família, definida como a combinação de experimento e métrica. Testes de normalidade não foram usados para escolher o teste: o Wilcoxon foi definido de antemão por não exigir normalidade das diferenças. No E2, o desempenho no mesmo nível de serviço é obtido por interpolação linear, para cada semente e política, da distância necessária para transbordamento de 1% e de 2% do volume; sementes em que o nível não é alcançado dentro da faixa varrida são excluídas da comparação, e seu número é informado.

5.7. Verificação, reprodutibilidade e ameaças à validade

Verificação. Além dos testes automatizados, cada execução verifica o balanço de volume. Em todas as 4.110 execuções, o maior resíduo absoluto foi de $3{,}7 \times 10^{-8}$ L, compatível com erro de arredondamento em ponto flutuante. O roteirizador foi comparado à enumeração exata em instâncias pequenas, e os comprimentos das rotas reconstruídas pela malha coincidiram com os usados pelo otimizador.

Reprodutibilidade. Cada execução é determinada pela configuração completa e pela semente, gravadas junto com as métricas. Os resultados brutos, o manifesto (versão do código, dependências, plataforma) e os scripts de análise estão no repositório. A descida gulosa do OR-Tools foi escolhida por ser determinística. Uma amostra das execuções foi repetida com a versão final do código, como descrito na Seção 6.

Desvio do protocolo. Depois do início das rodadas definitivas, o código foi submetido a uma revisão independente, feita por um revisor que não participou da implementação. Ela encontrou quatro problemas, corrigidos antes da conclusão das rodadas e registrados em `docs/desvios-protocolo.md`. (i) A política A usava a taxa média de geração sem os descartes volumosos (cerca de 3,5% do volume no cenário-base), contrariando a premissa de histórico perfeito e desfavorecendo A; todas as execuções de A foram refeitas, e as anteriores foram arquivadas sem uso. (ii) A grade de limiares do E2 não levava todas as políticas a atravessar 1% e 2% de transbordamento, o que restringia a comparação no

mesmo nível de serviço a um subconjunto não aleatório de sementes; foram acrescentados os níveis 0,3 e 0,4 (B-OR e C) e 1,0 (D). (iii) A condição "frota reduzida" do E4 resultava na mesma frota da base e foi redefinida como um único veículo. (iv) No E5, o limite de tempo de 5 s truncaria também a descida gulosa, que passou a usar a mesma salvaguarda de 30 s do E1. A revisão confirmou, por outro lado, a ausência de vazamento do estado verdadeiro para as políticas B–D, a validade dos números aleatórios comuns entre políticas e a correção das unidades do modelo de roteirização e dos procedimentos estatísticos.

Ameaças à validade. *Interna*: os perfis de geração são hipóteses; o passo de 15 min discretiza os instantes de coleta; o resolvedor é heurístico, e diferenças de qualidade de rota podem se confundir com diferenças de política (mitigado pela variante B-OR e pelo E5); B e C estimam a carga dos veículos pelo nível observado no planejamento, e não pelo nível esperado na visita, o que lhes impõe mais desvios de descarga; a taxa inicial da ingestão é a mediana verdadeira das taxas, efeito restrito ao aquecimento descartado; e, na condição de amostragem a cada 15 min, os sorteios de ruído e falhas diferem dos da base, o que enfraquece o pareamento dessa condição. *De construto*: o transbordamento é modelado como volume recusado, sem efeito sobre o tempo de atendimento; o limiar de 50% para "coleta prematura" é arbitrário, e por isso a distribuição completa da ocupação na coleta também é apresentada; a espera considera apenas episódios encerrados por coleta; e a disponibilidade de telemetria inclui leituras válidas que chegam atrasadas e são descartadas pela ingestão. *Externa*: os contêineres e o depósito são hipotéticos; a velocidade é constante e não há trânsito; cada veículo tem uma viagem planejada por turno, com desvios de descarga apenas quando necessário; não há restrições de janela de horário; a política A usa taxas médias verdadeiras, o que a favorece. *De conclusão*: as comparações são pareadas e ajustadas para multiplicidade, mas os fatores de E3 e E4 foram variados um de cada vez, e interações não foram estimadas.

6. Resultados e discussão

Os números desta seção são gerados pelos scripts de análise a partir dos arquivos brutos e inseridos no texto por macros. Valores arredondados precedidos de "cerca de" resumem as mesmas tabelas. Foram realizadas 4.110 execuções de simulação, com 0 falhas de execução, totalizando 7,8 horas de processamento.

6.1. Verificação e reprodutibilidade

Os 67 testes automatizados passam na versão usada nas rodadas. Em todas as execuções, o maior resíduo do balanço de volume foi de $3{,}7 \times 10^{-8}$ L. Para verificar a reprodutibilidade, uma amostra aleatória de 125 execuções (3% de cada experimento, no mínimo três) foi repetida a partir das configurações gravadas. Em 125 delas, todas as métricas não temporais coincidiram com as originais, com tolerância relativa de 10^{-12}. As execuções do E5 com busca local guiada ficaram fora da amostra, porque essa busca é interrompida por tempo de relógio e, por construção, não é determinística.

6.2. Integração com o broker MQTT (E6)

O E6 verifica, com o *broker* Mosquitto (2.0.20) em execução local e o cliente Paho 2.2.0, se a cadeia de comunicação se comporta como o contrato da Seção 4 prevê. Os testes usam

dispositivos virtuais executados na mesma máquina. Eles medem a lógica de publicação, entrega e ingestão, e não o desempenho de uma rede sem fio urbana.

Entrega e latência. Cada repetição publica 20.000 mensagens de 100 dispositivos, a cerca de 342 mensagens por segundo. Com QoS 1, a menor taxa de entrega entre as três repetições foi de 100,00%, com latência mediana de 0,7 ms e percentil 99 de 1,5 ms. Com QoS 0, os valores foram 100,00%, 0,6 ms e 1,2 ms. Esses números refletem a comunicação local e servem como limite inferior de latência, não como estimativa de campo.

Equivalência entre os modos. Uma simulação de seis dias com 40 contêineres e a política D foi executada com a mesma semente em dois modos: em lote, com canal ideal, e no modo *live*, em que todas as leituras passam pelo *broker* real e pela mesma camada de ingestão. Os resultados *não* foram idênticos. O modo *live* fez 90 visitas e registrou 3 transbordamentos, contra 89 e 4 no modo em lote, e percorreu 385,0 contra 384,8 km. A causa foi identificada e verificada. O contrato MQTT arredonda a distância e a ocupação a 0,1 cm e 0,1%, enquanto o modo em lote usa a leitura com precisão total. O arredondamento alterou uma decisão de limiar ao longo dos seis dias, e a diferença se propagou para as visitas seguintes. Repetida a execução em lote com o mesmo arredondamento do *payload*, as cinco métricas comparadas (distância, visitas, volumes coletado e transbordado e número de transbordamentos) foram idênticas às do modo *live*. Portanto, a cadeia MQTT (publicação, *broker*, assinatura, validação e ingestão) não introduz diferenças além da quantização prevista no contrato. As rodadas E1–E5 usam a precisão total. O efeito da quantização sobre os resultados agregados não foi medido. O arredondamento (até 0,05 cm) é muito menor que o ruído de medição (desvio-padrão de 1,5 cm), mas, como este teste mostra, pode alterar decisões individuais.

Reinício do *broker*. O *broker* foi reiniciado durante a publicação contínua de 100 dispositivos (duração do reinício: cerca de 0,4 s). Com QoS 0, 237 de 7.830 publicações não chegaram à plataforma (entrega de 96,97%). Com QoS 1 e sessão persistente no assinante, perderam-se 0 de 7.740 (entrega de 100,00%), e 100 dispositivos se reconectaram sozinhos. Nas publicações feitas com a conexão interrompida, o cliente retornou erro em 241 chamadas com QoS 1. Mesmo assim, todas as mensagens chegaram, porque a biblioteca as manteve na fila e as enviou após a reconexão. A deduplicação por (`boot`, `seq`) não foi exigida nesse teste (0 duplicatas).

Desconexão abrupta e mensagens inválidas. Dez dispositivos foram encerrados sem desconexão normal. A plataforma recebeu a mensagem de *Last Will* de 10 deles, em até 2,97 s, e um novo assinante encontrou 10 estados *offline* retidos. Das 50 mensagens malformadas (JSON inválido, versão desconhecida, identificador divergente do tópico, campo obrigatório ausente e ocupação fora da faixa física), 50 foram rejeitadas sem alterar o estado estimado.

6.3. Comparação principal (E1)

A Tabela 5 e a Figura 11 resumem o desempenho das cinco políticas nas três escalas. As comparações pareadas com A estão nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 5. E1 – médias por política e escala (30 sementes; IC 95% *bootstrap* entre colchetes). "Espera": tempo médio entre o contêiner atingir 80% e ser coletado.

N	Pol.	km/dia [IC 95%]	Transb. % [IC 95%]	Ocup. coleta (%)	Coletas <50% (%)	Visitas/dia	Espera (h)
20	A	60,8 [57,2; 64,4]	1,19 [0,93; 1,52]	62	28,6	9,5	12,4
	B	50,1 [47,6; 52,6]	5,35 [4,72; 5,99]	92	0,0	6,1	14,0
	B-OR	49,8 [47,4; 52,2]	5,31 [4,66; 5,96]	92	0,0	6,1	14,0
	C	47,8 [45,2; 50,4]	4,24 [3,67; 4,87]	85	0,4	6,7	13,3
	D	55,8 [52,9; 58,7]	1,10 [0,86; 1,42]	68	16,2	8,7	9,3
100	A	122,0 [119,8; 124,4]	1,01 [0,94; 1,09]	61	29,6	47,8	12,1
	B	121,7 [119,5; 124,1]	5,79 [5,62; 5,95]	92	0,0	30,1	14,4
	B-OR	100,1 [98,4; 101,8]	5,77 [5,58; 5,96]	92	0,0	30,2	14,3
	C	96,2 [94,4; 98,1]	3,61 [3,48; 3,74]	81	0,7	35,1	12,8
	D	112,2 [110,5; 114,1]	0,92 [0,85; 1,00]	66	17,3	44,1	8,9
500	A	357,8 [355,1; 360,6]	0,95 [0,91; 0,98]	61	29,3	240,2	12,5
	B	364,7 [361,2; 368,0]	5,31 [5,20; 5,42]	91	0,0	153,1	14,0
	B-OR	304,3 [302,0; 306,6]	5,27 [5,16; 5,37]	91	0,0	153,2	14,0
	C	307,2 [304,3; 310,1]	2,24 [2,17; 2,31]	75	1,3	193,7	11,5
	D	332,3 [330,2; 334,4]	0,63 [0,60; 0,67]	63	21,7	234,4	8,8

Quando coletar (QP1). Com os dados de nível, as políticas B e C coletam contêineres mais cheios: em $N = 100$, a ocupação verdadeira média na coleta foi de 92% (B) e 81% (C), contra 61% na coleta periódica, e as coletas com ocupação abaixo de 50% caíram de 29,6% (A) para 0,0% (B) e 0,7% (C). A distribuição completa (Figura 12) mostra que A espalha as coletas por toda a faixa de ocupação, enquanto B as concentra acima de 75%. A política preditiva ocupa uma posição intermediária (66% de ocupação média; 17,3% de coletas abaixo de 50%): ela antecipa visitas a contêineres que provavelmente transbordariam antes da próxima oportunidade e, ao fazê-lo, aceita coletá-los mais vazios. Coletar mais cheio, portanto, não é sinônimo de coletar melhor: as políticas que mais elevam a ocupação na coleta são também as que mais deixam contêineres transbordar.

Diferenças operacionais (QP2). Os resultados confirmam parcialmente as hipóteses pré-especificadas. *H2a* se confirma: C percorreu menos que A em todas as escalas, com variação de $-21{,}4\%$, $-21{,}2\%$ e $-14{,}1\%$ para 20, 100 e 500 contêineres ($p_{\mathrm{Holm}} < 0{,}001$ em $N = 100$; $r_{rb} = -1$, isto é, menor distância em todas as 30 sementes). Mas essa economia veio acompanhada de transbordamento maior: 3,61% do volume gerado em C contra 1,01% em A ($N = 100$), uma diferença de 2,60 pontos percentuais (IC 95%: 2,48 a 2,73). Em $N = 500$ a redução relativa de C foi menor que nas outras escalas. *H2b* se confirma com folga: B transbordou 5,79% do volume em $N = 100$, mais de cinco vezes o valor de A, pois só visita contêineres que já estão perto do limite. O roteirizador também pesa. Com o vizinho mais próximo e 2-opt, B percorreu praticamente a mesma distância que A em $N = 100$ ($-0{,}2\%$; $p_{\mathrm{Holm}} = 0{,}655$) e 1,9% em $N = 500$, embora visitasse menos contêineres por dia. Com o OR-Tools (B-OR), a mesma seleção percorreu $-18{,}0\%$

e $-15{,}0\%$ em relação a A. Portanto, em comparações informais, parte do ganho atribuído à "coleta inteligente" pode vir apenas da qualidade do roteirizador.

H2c também se confirma: D transbordou menos que C em todas as escalas (0,92% contra 3,61% em $N = 100$; $p_{\text{Holm}} <$0,001) e percorreu mais (16,6%). O resultado mais relevante para a questão prática, porém, é a comparação com a linha de base: D percorreu menos que A nas três escalas ($-8{,}2\%$, $-8{,}0\%$ e $-7{,}1\%$), com transbordamento igual ou menor. Em $N = 500$, D transbordou $-33{,}1\%$ em relação a A ($p_{\text{Holm}} <$0,001). Em $N = 100$ e $N = 20$, as diferenças de transbordamento ($-8{,}7\%$ e $-7{,}6\%$) não foram significativas ($p_{\text{Holm}} =$ 0,288 e 1,000). Pelo item 4 da análise pré-especificada, isso não autoriza afirmar que os dois níveis de serviço sejam equivalentes, apenas que não se detectou diferença com 30 sementes. Mesmo assim, é o único caso do E1 em que uma política com telemetria reduz a distância sem piora detectável do transbordamento.

Tabela 6. E1 – comparações pareadas de km/dia (alternativa − referência; 30 pares; r_{rb}: correlação bisserial de postos; p ajustado por Holm na família E1/km).

Escala	Comparação	Dif. média	IC 95%	Dif. (%)	r_{rb}	p (Holm)
$N = 20$	B − A	−10,66	[−12,31; −9,08]	−17,5	−1,00	<0,001
$N = 20$	B-OR − A	−10,99	[−12,75; −9,34]	−18,1	−1,00	<0,001
$N = 20$	C − A	−12,97	[−14,58; −11,43]	−21,4	−1,00	<0,001
$N = 20$	D − A	−4,97	[−5,98; −3,96]	−8,2	−0,99	<0,001
$N = 20$	D − C	8,01	[7,18; 8,82]	16,8	1,00	<0,001
$N = 20$	C − B-OR	−1,98	[−2,54; −1,45]	−4,0	−0,94	<0,001
$N = 20$	B-OR − B	−0,33	[−0,58; −0,10]	−0,7	−0,57	0,014
$N = 100$	B − A	−0,28	[−1,92; 1,37]	−0,2	−0,10	0,655
$N = 100$	B-OR − A	−21,98	[−23,18; −20,71]	−18,0	−1,00	<0,001
$N = 100$	C − A	−25,81	[−27,00; −24,63]	−21,2	−1,00	<0,001
$N = 100$	D − A	−9,80	[−10,98; −8,52]	−8,0	−1,00	<0,001
$N = 100$	D − C	16,01	[15,26; 16,75]	16,6	1,00	<0,001
$N = 100$	C − B-OR	−3,84	[−4,68; −3,04]	−3,8	−1,00	<0,001
$N = 100$	B-OR − B	−21,70	[−22,95; −20,58]	−17,8	−1,00	<0,001
$N = 500$	B − A	6,86	[4,21; 9,68]	1,9	0,85	<0,001
$N = 500$	B-OR − A	−53,54	[−54,92; −52,22]	−15,0	−1,00	<0,001
$N = 500$	C − A	−50,59	[−52,23; −48,94]	−14,1	−1,00	<0,001
$N = 500$	D − A	−25,47	[−26,70; −24,20]	−7,1	−1,00	<0,001
$N = 500$	D − C	25,12	[23,45; 26,74]	8,2	1,00	<0,001
$N = 500$	C − B-OR	2,95	[1,16; 4,77]	1,0	0,58	0,013
$N = 500$	B-OR − B	−60,40	[−63,14; −57,64]	−16,6	−1,00	<0,001

6.4. Mesmo nível de serviço: fronteiras distância × transbordamento (E2)

As comparações do E1 dependem dos parâmetros padrão de cada política: um limiar de 75% em C é uma escolha, e não uma propriedade da política. O E2 varia esses parâmetros e traça, para cada política, a curva de distância necessária para cada nível de transbordamento (Figura 13).

A curva de A fica acima das demais nos dois níveis analisados: para manter o transbordamento em 1% do volume gerado, A precisou, em média, de 122,9 km/dia,

Tabela 7. E1 – comparações pareadas de transbordamento (pontos percentuais do volume gerado; mesma estrutura da Tabela 6).

Escala	Comparação	Dif. média	IC 95%	Dif. (%)	r_{rb}	p (Holm)
$N = 20$	B − A	4,16	[3,60; 4,76]	350,9	1,00	<0,001
$N = 20$	B-OR − A	4,12	[3,55; 4,74]	347,3	1,00	<0,001
$N = 20$	C − A	3,06	[2,54; 3,63]	257,6	1,00	<0,001
$N = 20$	D − A	−0,09	[−0,29; 0,10]	−7,6	−0,14	1,000
$N = 20$	D − C	−3,15	[−3,66; −2,69]	−74,2	−1,00	<0,001
$N = 20$	C − B-OR	−1,06	[−1,32; −0,81]	−20,1	−0,97	<0,001
$N = 20$	B-OR − B	−0,04	[−0,12; 0,04]	−0,8	−0,19	1,000
$N = 100$	B − A	4,77	[4,62; 4,93]	471,8	1,00	<0,001
$N = 100$	B-OR − A	4,76	[4,60; 4,92]	470,1	1,00	<0,001
$N = 100$	C − A	2,60	[2,48; 2,73]	256,8	1,00	<0,001
$N = 100$	D − A	−0,09	[−0,17; −0,01]	−8,7	−0,40	0,288
$N = 100$	D − C	−2,69	[−2,80; −2,58]	−74,4	−1,00	<0,001
$N = 100$	C − B-OR	−2,16	[−2,28; −2,04]	−37,4	−1,00	<0,001
$N = 100$	B-OR − B	−0,02	[−0,09; 0,06]	−0,3	−0,09	1,000
$N = 500$	B − A	4,36	[4,26; 4,47]	461,6	1,00	<0,001
$N = 500$	B-OR − A	4,32	[4,22; 4,43]	457,4	1,00	<0,001
$N = 500$	C − A	1,29	[1,23; 1,36]	137,0	1,00	<0,001
$N = 500$	D − A	−0,31	[−0,35; −0,28]	−33,1	−1,00	<0,001
$N = 500$	D − C	−1,61	[−1,65; −1,56]	−71,8	−1,00	<0,001
$N = 500$	C − B-OR	−3,03	[−3,09; −2,96]	−57,5	−1,00	<0,001
$N = 500$	B-OR − B	−0,04	[−0,08; 0,00]	−0,8	−0,34	0,419

contra 111,1 km/dia em D, uma variação de −9,7% (20 sementes; p_{Holm} <0,001). Para C, a variação foi de −8,8%, e para B-OR, de −3,3%. Com 2% de transbordamento, a variação foi de −11,3% para C, −9,7% para D e −4,1% para B-OR (Tabela 8). As curvas de C e D ficam próximas. Em 1%, a diferença de D em relação a C foi de −0,9% e não significativa ($p_{\text{Holm}} = 0{,}202$). Em 2%, D exigiu 1,8% a mais que C (p_{Holm} <0,001). B-OR, que não usa contêineres opcionais, fica entre A e C.

Essa análise muda a leitura do E1. A diferença entre C e D no E1 não indica que a previsão seja necessária para obter ganhos; indica sobretudo que, com os parâmetros padrão, C opera em um ponto de mais transbordamento da fronteira e D em um ponto de menos. A vantagem robusta, observada em ambos, é a da seleção orientada por dados sobre o calendário fixo: para o mesmo nível de serviço, cerca de 9% a 11% menos distância, conforme o nível. No cenário-base, a previsão não trouxe economia adicional no mesmo nível de serviço: C, com limiar mais baixo, alcança o mesmo transbordamento com distância estatisticamente indistinguível da de D (1%) ou ligeiramente menor (2%). Com os parâmetros padrão, D opera no ponto de baixo transbordamento da fronteira. Sua vantagem aparece sobretudo quando a demanda muda ao longo do tempo (Seção 6.6). Esse valor, −9,7%, é menor que os ganhos médios relatados por estudos de simulação na meta-análise de [Maciel et al. 2025] (cerca de 40%) e próximo da média de implantações reais (cerca de 12%). Uma explicação plausível é que a linha de base aqui é exigente: A tem frequências ajustadas contêiner a contêiner, com as taxas médias verdadeiras, e rotas otimizadas pelo mesmo resolvedor.

Tabela 8. E2 – distância necessária no mesmo nível de transbordamento (interpolação por semente; diferença em km/dia). Todas as políticas alcançaram os dois níveis nas 20 sementes, e todas as comparações têm 20 pares.

Transb.	Comparação	Dif. média	IC 95%	Dif. (%)	r_{rb}	p (Holm)
1,0%	B-OR − A	−4,12	[−5,51; −2,78]	−3,3	−0,97	<0,001
1,0%	C − A	−10,84	[−12,78; −9,01]	−8,8	−1,00	<0,001
1,0%	D − A	−11,88	[−13,55; −10,31]	−9,7	−1,00	<0,001
1,0%	D − C	−1,03	[−2,36; 0,31]	−0,9	−0,33	0,202
2,0%	B-OR − A	−4,69	[−5,66; −3,73]	−4,1	−1,00	<0,001
2,0%	C − A	−13,07	[−14,16; −12,00]	−11,3	−1,00	<0,001
2,0%	D − A	−11,21	[−12,02; −10,43]	−9,7	−1,00	<0,001
2,0%	D − C	1,86	[1,03; 2,71]	1,8	0,86	<0,001

Previsão. O preditor de taxa usado por D teve erro absoluto médio de 0,107 (em fração do volume) para a ocupação 24 h à frente, contra 0,244 da persistência, em $N = 100$. Os erros foram calculados apenas para contêineres sem coleta no intervalo e incluem o efeito do ruído de medição.

6.5. Robustez a falhas de telemetria (E3)

O E3 perturba um fator por vez no cenário-base ($N = 100$). A Tabela 9 mostra o transbordamento médio de cada política e a disponibilidade de telemetria, e a Figura 14 mostra as mesmas médias com seus intervalos. A política A não usa telemetria e serve de referência fixa. A Tabela 10 compara cada condição com a base, dentro de cada política.

Tabela 9. E3 – transbordamento médio por condição e disponibilidade de telemetria (leituras válidas entregues/leituras programadas, na política C). Última coluna: distância de D. 30 sementes por célula; $N = 100$.

	Telemetria	Transbordamento (% do volume)				km/dia
Condição	disponível (%)	A	B-OR	C	D	D
base	97,2	1,01	5,77	3,61	0,92	112,2
perda 5%	93,2	1,01	5,74	3,64	0,91	112,3
perda 20%	78,5	1,01	5,82	3,61	0,88	113,1
perda 50%	49,1	1,01	6,02	3,77	0,83	114,5
interrupção 48 h	84,8	1,01	6,36	4,06	0,91	113,1
sem ruído	98,2	1,01	6,55	4,19	1,02	110,5
ruído ×3	95,8	1,01	4,61	2,80	0,74	116,9
ruído ×6	93,8	1,01	3,56	2,14	0,65	126,7
falha permanente 10%	90,4	1,01	6,01	3,79	0,95	112,8
falha permanente 30%	78,8	1,01	6,32	4,08	1,05	114,1
congelados 10%	97,1	1,01	9,70	6,89	5,07	110,0
amostragem 15 min	97,1	1,01	5,54	3,48	0,93	111,5
amostragem 6 h	97,1	1,01	7,79	5,12	0,69	117,6
amostragem 24 h	96,9	1,01	27,25	20,74	2,49	109,3
falha perm. 30%, sem *fallback*	78,8	—	21,53	19,39	13,08	105,3
interrupção 48 h, sem *fallback*	84,8	—	9,26	6,57	2,01	112,4

Perda de mensagens e interrupções. Perdas independentes de 5% e 20% das mensagens não alteraram o transbordamento de forma detectável em nenhuma política. Mesmo com 50% de perda, quando só metade das leituras chegou à plataforma, o efeito foi pequeno: 0,25 p.p. em B-OR ($p_{\text{Holm}} = 0{,}001$), 0,16 p.p. em C (não significativo) e $-0{,}09$ p.p. em D. Com uma leitura por hora e decisões uma vez por dia, a plataforma tolera muitas lacunas: basta que alguma leitura recente chegue antes do planejamento. As interrupções regionais de 48 h, que deixam metade dos dispositivos sem comunicação, tiveram efeito maior em B-OR (+0,59 p.p.) e em C (+0,45 p.p.; ambos $p_{\text{Holm}} < 0{,}001$), mas não em D ($-0{,}01$ p.p.; $p_{\text{Holm}} = 1{,}000$).

Estimativa para dados desatualizados (H3b). O mecanismo de *fallback*, que projeta a ocupação dos contêineres sem dado recente pela taxa de longo prazo, foi decisivo. Com 30% dos sensores em falha permanente e o *fallback* ativo, o transbordamento de C aumentou 0,47 p.p. em relação à base. Sem ele, isto é, mantendo indefinidamente o último valor lido, o aumento foi de 15,31 p.p.; em D, de 0,13 p.p. com *fallback* e 12,03 p.p. sem ele. Nas interrupções de 48 h, desligar o *fallback* elevou o aumento de C de 0,45 para 2,51 p.p. A hipótese H3b se confirma. Um contêiner que para de reportar continua a encher, e uma plataforma que trata o último valor lido como atual deixa de visitá-lo.

Falhas que a plataforma não detecta. Os sensores congelados (10% dos dispositivos passam a repetir sempre a mesma leitura, a partir de um instante sorteado) foram a perturbação mais grave entre as de menor intensidade: +3,94 p.p. em B-OR, +3,28 p.p. em C e +4,15 p.p. em D. O transbordamento de D passou de valores próximos aos de A para cerca de cinco vezes o de A. Ao contrário do sensor que se cala, o sensor congelado continua a enviar mensagens válidas e recentes. O critério de desatualização não o identifica, e o *fallback* não é acionado. A ingestão implementada não verifica se a ocupação permanece constante por tempo anormal. Essa verificação é simples e deve preceder qualquer uso operacional (Seção 6.10).

Ruído e período de amostragem. O resultado contrário à hipótese H3a veio do ruído. Eliminar todo o erro de medição *aumentou* o transbordamento de B-OR, C e D (+0,78, +0,58 e +0,10 p.p.), e triplicar ou sextuplicar o ruído o *reduziu* (em C, $-0{,}81$ e $-1{,}47$ p.p.), ao custo de mais distância (Tabela 9). O motivo está no modelo de medição (Seção 5). O termo de superfície irregular sempre encurta a distância medida, porque o pulso reflete no pico da pilha. Por isso, ele desloca a ocupação observada para cima, em média cerca de 0,8 vez o seu desvio-padrão. Nas condições do E3, esse viés foi escalado junto com o ruído simétrico e funcionou como margem de segurança: o contêiner parece mais cheio do que está e é visitado antes. O E3, portanto, não separa o efeito do ruído simétrico do efeito do viés sistemático, o que fica como limitação do desenho. Em termos práticos, um limiar de 75% sobre leituras enviesadas para cima equivale a um limiar menor sobre a ocupação verdadeira, e a calibração do sensor em campo altera o ponto de operação das políticas.

O período de amostragem separou as políticas. Com uma leitura a cada 6 h, o transbordamento de C aumentou 1,51 p.p.; com uma a cada 24 h, 17,13 p.p., e o de B-OR,

21,48 p.p. Em D, o aumento foi de 1,57 p.p. com amostragem diária, e com 6 h o transbordamento caiu (−0,24 p.p.). As políticas que decidem pelo valor observado dependem de dados frequentes, porque o valor lido envelhece até o planejamento. A política que projeta a ocupação pela taxa estimada compensa boa parte desse envelhecimento. Amostrar a cada 15 minutos, em vez de 1 h, não trouxe benefício relevante a nenhuma política. Isso interessa ao projeto do dispositivo, porque cada leitura transmitida consome energia.

Tabela 10. E3 – variação do transbordamento em relação à base, dentro de cada política (p.p. do volume gerado; 30 pares; Holm na família E3/transbordamento).

Condição	Comparação	Dif. média	IC 95%	Dif. (%)	r_{rb}	p (Holm)
perda 5%	B-OR (cond. − base)	−0,02	[−0,09; 0,04]	−0,4	−0,11	1,000
perda 20%	B-OR (cond. − base)	0,05	[−0,02; 0,13]	0,9	0,28	1,000
perda 50%	B-OR (cond. − base)	0,25	[0,15; 0,34]	4,3	0,79	0,001
interrupção 48 h	B-OR (cond. − base)	0,59	[0,41; 0,79]	10,2	0,95	<0,001
sem ruído	B-OR (cond. − base)	0,78	[0,67; 0,89]	13,6	1,00	<0,001
ruído ×3	B-OR (cond. − base)	−1,16	[−1,25; −1,07]	−20,1	−1,00	<0,001
ruído ×6	B-OR (cond. − base)	−2,21	[−2,31; −2,10]	−38,2	−1,00	<0,001
falha permanente 10%	B-OR (cond. − base)	0,24	[0,14; 0,34]	4,2	0,78	0,002
falha permanente 30%	B-OR (cond. − base)	0,55	[0,42; 0,68]	9,5	0,97	<0,001
congelados 10%	B-OR (cond. − base)	3,94	[3,49; 4,39]	68,2	1,00	<0,001
amostragem 15 min	B-OR (cond. − base)	−0,23	[−0,34; −0,11]	−3,9	−0,71	0,008
amostragem 6 h	B-OR (cond. − base)	2,02	[1,88; 2,15]	35,0	1,00	<0,001
amostragem 24 h	B-OR (cond. − base)	21,48	[21,22; 21,73]	372,4	1,00	<0,001
falha perm. 30%, sem *fallback*	B-OR (cond. − base)	15,22	[14,30; 16,18]	240,8	1,00	<0,001
interrupção 48 h, sem *fallback*	B-OR (cond. − base)	2,91	[2,37; 3,46]	45,7	1,00	<0,001
perda 5%	C (cond. − base)	0,03	[−0,05; 0,12]	0,8	0,05	1,000
perda 20%	C (cond. − base)	0,00	[−0,08; 0,08]	−0,1	−0,09	1,000
perda 50%	C (cond. − base)	0,16	[0,04; 0,27]	4,3	0,48	0,375
interrupção 48 h	C (cond. − base)	0,45	[0,31; 0,58]	12,4	0,95	<0,001
sem ruído	C (cond. − base)	0,58	[0,47; 0,70]	16,1	0,99	<0,001
ruído ×3	C (cond. − base)	−0,81	[−0,90; −0,72]	−22,5	−1,00	<0,001
ruído ×6	C (cond. − base)	−1,47	[−1,54; −1,39]	−40,7	−1,00	<0,001
falha permanente 10%	C (cond. − base)	0,18	[0,07; 0,28]	4,9	0,57	0,095
falha permanente 30%	C (cond. − base)	0,47	[0,37; 0,57]	13,0	0,99	<0,001
congelados 10%	C (cond. − base)	3,28	[2,69; 3,91]	90,7	1,00	<0,001
amostragem 15 min	C (cond. − base)	−0,13	[−0,24; −0,02]	−3,6	−0,45	0,469
amostragem 6 h	C (cond. − base)	1,51	[1,38; 1,64]	41,9	1,00	<0,001
amostragem 24 h	C (cond. − base)	17,13	[16,81; 17,43]	474,5	1,00	<0,001
falha perm. 30%, sem *fallback*	C (cond. − base)	15,31	[14,36; 16,30]	375,3	1,00	<0,001
interrupção 48 h, sem *fallback*	C (cond. − base)	2,51	[2,02; 3,05]	62,0	1,00	<0,001
perda 5%	D (cond. − base)	−0,02	[−0,06; 0,03]	−1,8	−0,10	1,000
perda 20%	D (cond. − base)	−0,04	[−0,09; 0,01]	−4,5	−0,30	1,000
perda 50%	D (cond. − base)	−0,09	[−0,14; −0,04]	−9,7	−0,66	0,024
interrupção 48 h	D (cond. − base)	−0,01	[−0,06; 0,03]	−1,6	−0,13	1,000
sem ruído	D (cond. − base)	0,10	[0,05; 0,14]	10,3	0,70	0,010
ruído ×3	D (cond. − base)	−0,18	[−0,22; −0,14]	−19,7	−0,96	<0,001
ruído ×6	D (cond. − base)	−0,28	[−0,33; −0,23]	−30,1	−0,99	<0,001
falha permanente 10%	D (cond. − base)	0,02	[−0,02; 0,06]	2,3	0,14	1,000
falha permanente 30%	D (cond. − base)	0,13	[0,07; 0,19]	13,6	0,77	0,002
congelados 10%	D (cond. − base)	4,15	[3,46; 4,88]	448,7	1,00	<0,001
amostragem 15 min	D (cond. − base)	0,01	[−0,04; 0,06]	0,9	0,06	1,000
amostragem 6 h	D (cond. − base)	−0,24	[−0,28; −0,19]	−25,5	−1,00	<0,001
amostragem 24 h	D (cond. − base)	1,57	[1,32; 1,84]	169,5	1,00	<0,001
falha perm. 30%, sem *fallback*	D (cond. − base)	12,03	[11,10; 12,90]	1.145,3	1,00	<0,001
interrupção 48 h, sem *fallback*	D (cond. − base)	1,10	[0,82; 1,40]	120,6	1,00	<0,001

6.6. Sensibilidade operacional (E4)

O E4 varia a demanda, a frota, o arranjo espacial e a velocidade. A Figura 15 mostra, para cada condição, a diferença pareada de cada política em relação a A, e as Tabelas 11 e 12

trazem os valores.

Mudança na demanda (H4). A política A planeja o calendário com a taxa média verdadeira de cada contêiner, mas não acompanha mudanças posteriores. Quando 30% dos contêineres passam a gerar 60% a mais a partir do 14.º dia, o transbordamento médio de A sobe de 1,01% para cerca de 4%. O de D sobe menos e fica $-2{,}58$ p.p. em relação a A ($p_{\mathrm{Holm}} < 0{,}001$), com distância praticamente igual ($-1{,}3\%$). O mesmo padrão aparece no aumento geral de 30% da demanda ($-1{,}80$ p.p.), agora com 3,0% de distância. C também se degrada menos que A nessas condições, mas parte de um transbordamento maior e continua acima dela. A hipótese H4 se confirma para mudanças de regime. É nelas que o componente preditivo mostra seu valor mais claro. Quando a intensidade muda desde o início e A a conhece (demanda $\times 0{,}7$ e $\times 1{,}3$), A mantém cerca de 1% de transbordamento. Ainda assim, com demanda baixa, D reduziu ao mesmo tempo a distância ($-9{,}1\%$) e o transbordamento ($-0{,}65$ p.p.), e as reduções de distância de C cresceram com a intensidade ($-18{,}7\%$, $-21{,}2\%$ e $-26{,}1\%$ para $\times 0{,}7$, base e $\times 1{,}3$).

Frota insuficiente. Com um único veículo, a capacidade planejada (uma viagem de 26.000 L por turno, pela regra de execução do modelo) fica abaixo do volume gerado por dia, e nenhuma política evita o transbordamento: A chegou a 31%, e as demais ficaram entre 18% e 24% (Tabela 12). Nessa escassez, as políticas com telemetria transbordaram $-12{,}56$ p.p. (C) e $-7{,}62$ p.p. (D) em relação a A, porque priorizam os contêineres mais cheios. Em contrapartida, percorreram mais (49,0% e 60,2%). Esse resultado não indica que a telemetria substitua frota. Indica que, quando a frota é insuficiente, os dados ajudam a decidir quem fica sem coleta.

Arranjo espacial e velocidade. Com contêineres agrupados em poucas áreas, todas as distâncias caem e D reduziu a distância ($-5{,}7\%$) e o transbordamento ($-0{,}35$ p.p.) em relação a A. A velocidade do veículo (15 ou 30 km/h) praticamente não alterou as diferenças relativas. No cenário-base, a jornada de 8 h tem folga: em A, cada um dos dois veículos se desloca cerca de 3 h por dia a 20 km/h.

6.7. Sensibilidade ao resolvedor (E5)

Com 500 contêineres, a descida gulosa do OR-Tools levou em média 1,01 s (A), 1,29 s (C) e 1,40 s (D) por planejamento diário. A busca local guiada (GLS), interrompida após 5 s, encontrou rotas mais curtas: a distância diária variou $-0{,}8\%$ em A, $-0{,}2\%$ em C e $-0{,}7\%$ em D (p_{Holm}: 0,006, 0,432 e 0,020; 10 sementes). As diferenças são pequenas diante das diferenças entre políticas, e a ordem se manteve com os dois resolvedores: com GLS, C percorreu 301,8 km/dia, D 327,0 e A 350,5. O transbordamento praticamente não mudou (diferenças de $-0{,}002$, 0,041 e $-0{,}004$ p.p.). Como a melhoria do GLS foi um pouco maior em A, o uso da descida gulosa nas rodadas principais tende a favorecer levemente as políticas com telemetria, em menos de 1% da distância de A. A escolha da descida gulosa, motivada pelo determinismo, não altera as conclusões.

6.8. Relação com a literatura

As reduções de distância medidas aqui são menores que as frequentemente relatadas por estudos de simulação. Com os parâmetros padrão, C percorreu cerca de 21% menos que

A, mas transbordou mais. No mesmo nível de serviço, a variação ficou entre $-8{,}8\%$ e $-11{,}3\%$. Duas escolhas de desenho explicam boa parte da diferença. A primeira é que a linha de base usa o mesmo resolvedor e frequências ajustadas por contêiner com taxas verdadeiras. Muitos estudos comparam a coleta inteligente com uma rota fixa pouco otimizada, o que mistura o efeito dos dados com o efeito da roteirização. O E1 mostrou que essa mistura é grande: em $N = 100$ e $N = 500$, só trocar o vizinho mais próximo pelo OR-Tools reduziu a distância de B em 17% a 18%. A segunda escolha é medir o transbordamento junto com a distância. Uma política que visita apenas contêineres acima de 75% economiza distância, mas transfere o custo para o serviço. [Brouwer et al. 2023] descrevem o mesmo compromisso entre número de coletas e número de transbordamentos. Os ganhos modestos e a importância das hipóteses sobre a demanda também são coerentes com a meta-análise de [Maciel et al. 2025], em que os resultados de implantações reais ficam bem abaixo dos de simulações.

6.9. Implicações práticas

Para um município que avalie sensores de nível, os resultados sugerem cinco cuidados. Eles valem para o modelo estudado e precisam ser confirmados em campo.

1. Comparar com uma linha de base bem roteirizada. Parte do ganho da "coleta inteligente" pode ser obtida apenas com melhor roteirização da coleta atual.
2. Fixar o nível de serviço antes de medir a economia. Reduções de distância obtidas com mais transbordamento não são ganhos de eficiência.
3. Tratar dados ausentes explicitamente. A estimativa por taxa para contêineres sem dado recente foi a diferença entre degradação pequena e falha grave.
4. Detectar sensores que continuam a reportar valores implausíveis (constantes, por exemplo). Esse é o modo de falha mais perigoso encontrado.
5. Não superdimensionar a frequência de amostragem: uma leitura por hora foi suficiente, e a previsão compensou leituras ainda mais espaçadas.

O valor dos dados aparece mais claramente quando a demanda muda e o calendário fixo fica defasado, situação comum em áreas de crescimento urbano, eventos e sazonalidade turística.

6.10. Limitações

Os resultados valem para o modelo e os parâmetros descritos. Os perfis de geração, a heterogeneidade entre contêineres e os descartes volumosos são hipóteses de cenário e não foram calibrados com medições de campo. As posições dos contêineres e do depósito são hipotéticas, e os resultados não descrevem o serviço real de Aracaju. O veículo percorre a malha a velocidade constante, sem trânsito, e cada veículo faz uma rota planejada por turno, com desvios ao depósito apenas quando a carga excede a capacidade. Por isso, o cenário de frota reduzida mede sobretudo a restrição de capacidade. O transbordamento é modelado como volume recusado, sem efeitos sobre os contêineres vizinhos ou sobre o comportamento da população. O E3 não separa o ruído simétrico do viés da superfície irregular, e os fatores do E3 e do E4 foram variados um de cada vez, sem estimar interações. O resolvedor é heurístico, e a qualidade das rotas pode variar com o tamanho da instância (Seção 6.7). A plataforma não detecta sensores congelados. O firmware foi compilado, mas não executado em hardware, e a integração MQTT foi verificada com dispositivos virtuais em *broker* local, não em rede celular ou Wi-Fi urbana. Por fim, a

política A recebe as taxas médias verdadeiras, um planejador que nenhum município possui. Uma linha de base estimada com histórico real tenderia a ser pior, e as diferenças em relação a ela seriam maiores. Esse efeito não foi quantificado.

7. Conclusão

Este trabalho retomou o protótipo de 2024, que mede a ocupação de uma lixeira com sensor ultrassônico e ESP32 e publica os dados por MQTT, e o transformou em um estudo experimental da questão que o motivava: se esses dados tornam a coleta mais eficiente. O firmware foi auditado e reescrito, a comunicação foi especificada em um contrato MQTT, e a decisão de coleta foi avaliada por simulação pareada sobre a malha viária de Aracaju, com contêineres hipotéticos. As respostas às questões de pesquisa, válidas para o modelo e os parâmetros adotados, são as seguintes.

QP1 – quando coletar. Os dados de nível permitem coletar contêineres mais cheios. A coleta por limiar elevou a ocupação média na coleta de 61% para 92% e praticamente eliminou as coletas abaixo de 50% de ocupação. Coletar mais cheio, porém, significa chegar mais perto do limite. A decisão útil não é "coletar quando estiver cheio", mas "coletar antes que transborde". A política preditiva implementa essa segunda regra com uma projeção pela taxa de enchimento estimada.

QP2 – diferenças operacionais. Com os parâmetros padrão, as políticas com telemetria percorreram menos que a coleta periódica, mas a maior parte da economia veio acompanhada de mais transbordamento. A política dinâmica (C) percorreu $-21{,}2\%$ e transbordou 3,61% do volume, contra 1,01% em A. A preditiva (D) percorreu $-8{,}0\%$ sem piora detectável do transbordamento. No mesmo nível de serviço (1% de transbordamento), a seleção orientada por dados exigiu de $-8{,}8\%$ (C) a $-9{,}7\%$ (D) de distância em relação a A, sem diferença significativa entre C e D. Parte do ganho frequentemente atribuído aos sensores vem da roteirização: a mesma seleção por limiar percorreu cerca de 18% menos com o OR-Tools do que com o vizinho mais próximo.

QP3 – falhas de telemetria. A perda de mensagens teve efeito pequeno mesmo em níveis altos, porque as decisões são diárias e as leituras, horárias. Interrupções regionais, falhas permanentes e amostragem espaçada prejudicaram as políticas que decidem pelo valor observado. A estimativa por taxa para dados desatualizados evitou a maior parte dessa degradação. O modo de falha mais grave foi o sensor congelado, que continua a enviar leituras válidas e não é detectado pela ingestão implementada. O ruído de medição teve efeito contrário ao esperado, explicado pelo viés para cima do modelo de superfície irregular.

QP4 – escala, demanda e frota. As reduções relativas de distância foram semelhantes em 20 e 100 contêineres e menores em 500. A vantagem da política preditiva sobre o calendário fixo cresceu quando a demanda mudou depois do planejamento: com aumento de 60% em 30% dos contêineres, A passou de cerca de 1% para 4% de transbordamento,

e o transbordamento de D variou $-2{,}58$ p.p. em relação ao de A, com distância praticamente igual. Com frota insuficiente, nenhuma política evitou o transbordamento. Os dados apenas redistribuíram a falta de capacidade.

QP5 – quando os dados não compensam. Os ganhos encolheram quando a comparação foi feita com uma linha de base bem roteirizada e no mesmo nível de serviço. Nessas condições, a redução de distância ficou entre 9% e 11%, contra cerca de 21% de C com os parâmetros padrão, obtidos à custa de transbordamento. Esses 9% a 11% ficam abaixo dos ganhos relatados por muitos estudos de simulação e próximos da média de implantações reais na meta-análise de [Maciel et al. 2025]. Os dados pioraram o resultado em dois casos. Com 10% de sensores congelados, não detectados, a política preditiva transbordou cerca de cinco vezes mais que a periódica. Com frota insuficiente, as políticas com telemetria transbordaram menos, mas percorreram mais. Os dados compensaram mais claramente quando a demanda mudou de forma não prevista pelo calendário.

Limites das conclusões. Nada aqui mostra que a coleta inteligente funcione em Aracaju ou em outra cidade. Os resultados dependem de perfis de geração não calibrados, de posições hipotéticas e de um modelo de operação simplificado (Seção 6.10). O que o trabalho oferece é uma plataforma aberta e reprodutível em que essas hipóteses podem ser trocadas por dados reais, e um conjunto de cuidados metodológicos que reduzem o risco de superestimar os ganhos.

Trabalhos futuros. Em ordem de prioridade: (i) calibrar o modelo de demanda com medições de contêineres reais, em parceria com o serviço municipal; (ii) montar e testar o firmware revisado em hardware, medindo consumo de energia e alcance de comunicação; (iii) implementar a detecção de sensores congelados e de leituras implausíveis; (iv) separar, no modelo de medição, o ruído simétrico do viés de superfície e calibrá-los com ensaios do sensor; (v) estimar a linha de base periódica com histórico ruidoso em vez das taxas verdadeiras; e (vi) incluir múltiplas viagens por turno, janelas de tempo e trânsito no modelo de operação.

Referências

Akhtar, M., Hannan, M. A., Begum, R. A., Basri, H., and Scavino, E. (2017). Backtracking search algorithm in CVRP models for efficient solid waste collection and route optimization. *Waste Management*, 61:117–128. doi:10.1016/j.wasman.2017.01.022.

Anagnostopoulos, T., Zaslavsky, A., Kolomvatsos, K., Medvedev, A., Amirian, P., Morley, J., and Hadjieftymiades, S. (2017). Challenges and opportunities of waste management in IoT-enabled smart cities: A survey. *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, 2(3):275–289. doi:10.1109/TSUSC.2017.2691049.

Anagnostopoulos, T., Zaslavsky, A., and Medvedev, A. (2015). Robust waste collection exploiting cost efficiency of IoT potentiality in smart cities. In *2015 International Conference on Recent Advances in Internet of Things (RIoT)*, pages 1–6. IEEE. doi:10.1109/RIOT.2015.7104901.

Banks, A., Briggs, E., Borgendale, K., and Gupta, R. (2019). MQTT version 5.0. https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/os/mqtt-v5.0-os.html. OASIS Standard, 7 mar. 2019. Acesso em: 14 nov. 2026.

Banks, A. and Gupta, R. (2014). MQTT version 3.1.1. https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.html. OASIS Standard, 29 out. 2014. Acesso em: 14 nov. 2026.

Barth, L., Schweiger, L., Benedech, R., and Ehrat, M. (2023). From data to value in smart waste management: Optimizing solid waste collection with a digital twin-based decision support system. *Decision Analytics Journal*, 9:100347. doi:10.1016/j.dajour.2023.100347.

Beliën, J., De Boeck, L., and Van Ackere, J. (2014). Municipal solid waste collection and management problems: A literature review. *Transportation Science*, 48(1):78–102. doi:10.1287/trsc.1120.0448.

Brasil (2010). Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. institui a política nacional de resíduos sólidos; altera a lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Diário Oficial da União. Acesso em: 14 nov. 2026.

Brasil (2020). Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. atualiza o marco legal do saneamento básico. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Diário Oficial da União. Acesso em: 14 nov. 2026.

Brasil. Ministério das Cidades (2025). Relatório dos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos: SINISA 2025, ano de referência 2024. https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/sinisa/resultados-sinisa/RELATORIO_SINISA_RESIDUOS_SOLIDOS_2025.pdf. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília, dez. 2025. Acesso em: 14 nov. 2026.

Brouwer, Y., Barbosa-Póvoa, A. P., Antunes, A. P., and Rodrigues Pereira Ramos, T. (2023). Comparison of different waste bin monitoring approaches: An exploratory study. *Waste Management & Research*, 41(10):1570–1583. doi:10.1177/0734242X231160691.

Cárdenas-León, I., Koeva, M., Nourian, P., and Davey, C. (2024). Urban digital twin-based solution using geospatial information for solid waste management. *Sustainable Cities and Society*, 115:105798. doi:10.1016/j.scs.2024.105798.

Carlos, M., Gallardo, A., Edo-Alcón, N., and Abaso, J. R. (2019). Influence of the municipal solid waste collection system on the time spent at a collection point: A case study. *Sustainability*, 11(22):6481. doi:10.3390/su11226481.

Clarke, G. and Wright, J. W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 12(4):568–581. doi:10.1287/opre.12.4.568.

Croes, G. A. (1958). A method for solving traveling-salesman problems. *Operations Research*, 6(6):791–812. doi:10.1287/opre.6.6.791.

D-Robotics UK (2010). DHT11 humidity & temperature sensor. https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf. Tradução da folha de dados do fabricante, datada de 30 jul. 2010. Acesso em: 14 nov. 2026.

Dantzig, G. B. and Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management Science*, 6(1):80–91. doi:10.1287/mnsc.6.1.80.

de Oliveira, S. S. and Kniess, J. (2018). Arquitetura baseada em Internet das coisas para medição e monitoramento de resíduos. *Anais do Computer on the Beach*, 9:130–139. Disponível em: https://periodicos.univali.br/index.php/acotb/article/view/12744.

Dror, M., Laporte, G., and Trudeau, P. (1989). Vehicle routing with stochastic demands: Properties and solution frameworks. *Transportation Science*, 23(3):166–176. doi:10.1287/trsc.23.3.166.

Efron, B. (1979). Bootstrap methods: Another look at the jackknife. *The Annals of Statistics*, 7(1):1–26. doi:10.1214/aos/1176344552.

Efron, B. and Tibshirani, R. J. (1993). *An Introduction to the Bootstrap*. Springer US. doi:10.1007/978-1-4899-4541-9.

Elecfreaks ([s.d.]). Ultrasonic ranging module HC-SR04. https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/HCSR04.pdf. Folha de dados sem data, hospedada pela SparkFun. Acesso em: 14 nov. 2026.

Esmaeilian, B., Wang, B., Lewis, K., Duarte, F., Ratti, C., and Behdad, S. (2018). The future of waste management in smart and sustainable cities: A review and concept paper. *Waste Management*, 81:177–195. doi:10.1016/j.wasman.2018.09.047.

Faccio, M., Persona, A., and Zanin, G. (2011). Waste collection multi objective model with real time traceability data. *Waste Management*, 31(12):2391–2405. doi:10.1016/j.wasman.2011.07.005.

Ferrer, J. and Alba, E. (2019). BIN-CT: Urban waste collection based on predicting the container fill level. *Biosystems*, 186:103962. doi:10.1016/j.biosystems.2019.04.006.

Furnon, V. and Perron, L. (2025). OR-Tools routing library. https://developers.google.com/optimization/routing/. Google. Versão v9.12 (2025-02-17) conforme citação recomendada; ajustar para a versão usada. Acesso em: 14 nov. 2026.

Geofabrik GmbH and OpenStreetMap contributors (2026). Extrato OpenStreetMap da região nordeste do brasil (arquivo nordeste-261113.osm.pbf). https://download.geofabrik.de/south-america/brazil/nordeste.html. Dados sob licença ODbL 1.0. Acesso em: 14 nov. 2026.

Glasserman, P. and Yao, D. D. (1992). Some guidelines and guarantees for common random numbers. *Management Science*, 38(6):884–908. doi:10.1287/mnsc.38.6.884.

Haklay, M. and Weber, P. (2008). OpenStreetMap: User-generated street maps. *IEEE Pervasive Computing*, 7(4):12–18. doi:10.1109/MPRV.2008.80.

Han, H. and Ponce Cueto, E. (2015). Waste collection vehicle routing problem: Literature review. *Promet – Traffic & Transportation*, 27(4):345–358. doi:10.7307/ptt.v27i4.1616.

Hannan, M. A., Begum, R. A., Al-Shetwi, A. Q., Ker, P. J., Al Mamun, M. A., Hussain, A., Basri, H., and Mahlia, T. M. I. (2020). Waste collection route optimisation model for linking cost saving and emission reduction to achieve sustainable development goals. *Sustainable Cities and Society*, 62:102393. doi:10.1016/j.scs.2020.102393.

Hess, C., Dragomir, A. G., Doerner, K. F., and Vigo, D. (2024). Waste collection routing: a survey on problems and methods. *Central European Journal of Operations Research*, 32(2):399–434. doi:10.1007/s10100-023-00892-y.

Holm, S. (1979). A simple sequentially rejective multiple test procedure. *Scandinavian Journal of Statistics*, 6(2):65–70. Disponível em: https://www.jstor.org/stable/4615733.

IBGE (2022). Censo demográfico 2022: Tabela 4709 – população residente, variação absoluta de população residente e taxa de crescimento geométrico. https://sidra.ibge.gov.br/tabela/4709. Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA). Aracaju (SE), código 2800308. Acesso em: 14 nov. 2026.

Iosif, P., Karantoumanis, E., Sarigiannidis, P., and Ploskas, N. (2026). Optimizing waste collection routes using IoT sensors, predictive simulation, and VRP techniques: A case study in Kozani, Greece. In *Proceedings of the 29th Pan-Hellenic Conference on Progress in Computing and Informatics*, pages 7–12. ACM. doi:10.1145/3829216.3829275.

Johansson, O. M. (2006). The effect of dynamic scheduling and routing in a solid waste management system. *Waste Management*, 26(8):875–885. doi:10.1016/j.wasman.2005.09.004.

Kerby, D. S. (2014). The simple difference formula: An approach to teaching nonparametric correlation. *Comprehensive Psychology*, 3:11.IT.3.1. doi:10.2466/11.IT.3.1.

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., and Sihn, W. (2018). Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11):1016–1022. doi:10.1016/j.ifacol.2018.08.474.

Law, A. M. (2024). *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw Hill, 6 edition. ISBN 978-1-264-26824-5.

Light, R. A. (2017). Mosquitto: server and client implementation of the MQTT protocol. *Journal of Open Source Software*, 2(13):265. doi:10.21105/joss.00265.

Lozano, Á., Caridad, J., De Paz, J. F., Villarrubia González, G., and Bajo, J. (2018). Smart waste collection system with low consumption LoRaWAN nodes and route optimization. *Sensors*, 18(5):1465. doi:10.3390/s18051465.

Maciel, R. R., de Souza, A. D., Almeida, R. M. A., and Leite, J. P. R. R. (2025). The impact of IoT-enabled routing optimization on waste collection distance: A systematic review and meta-analysis. *Logistics*, 9(4):161. doi:10.3390/logistics9040161.

Mes, M., Schutten, M., and Rivera, A. P. (2014). Inventory routing for dynamic waste collection. *Waste Management*, 34(9):1564–1576. doi:10.1016/j.wasman.2014.05.011.

Monteiro, J. H. P., Figueiredo, C. E. M., Magalhães, A. F., de Melo, M. A. F., de Brito, J. C. X., de Almeida, T. P. F., and Mansur, G. L. (2001). *Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos*. IBAM, Rio de Janeiro. Coordenação técnica: Victor Zular Zveibil. Patrocínio: SEDU/PR.

Nguyen, T. T. T. and Wilson, B. G. (2010). Fuel consumption estimation for kerbside municipal solid waste (MSW) collection activities. *Waste Management & Research*, 28(4):289–297. doi:10.1177/0734242X09337656.

Olawade, D. B., Fapohunda, O., Wada, O. Z., Usman, S. O., Ige, A. O., Ajisafe, O., and Oladapo, B. I. (2024). Smart waste management: A paradigm shift enabled by artificial intelligence. *Waste Management Bulletin*, 2(2):244–263. doi:10.1016/j.wmb.2024.05.001.

Peng, R. D. (2011). Reproducible research in computational science. *Science*, 334(6060):1226–1227. doi:10.1126/science.1213847.

Perron, L. and Furnon, V. (2025). OR-Tools. https://developers.google.com/optimization/. Google. Versão v9.12 (2025-02-17) conforme citação recomendada; ajustar para a versão usada. Acesso em: 14 nov. 2026.

Ramos, T. R. P., de Morais, C. S., and Barbosa-Póvoa, A. P. (2018). The smart waste collection routing problem: Alternative operational management approaches. *Expert Systems with Applications*, 103:146–158. doi:10.1016/j.eswa.2018.03.001.

Rosenkrantz, D. J., Stearns, R. E., and Lewis, II, P. M. (1977). An analysis of several heuristics for the traveling salesman problem. *SIAM Journal on Computing*, 6(3):563–581. doi:10.1137/0206041.

Sandve, G. K., Nekrutenko, A., Taylor, J., and Hovig, E. (2013). Ten simple rules for reproducible computational research. *PLoS Computational Biology*, 9(10):e1003285. doi:10.1371/journal.pcbi.1003285.

Sargent, R. G. (2013). Verification and validation of simulation models. *Journal of Simulation*, 7(1):12–24. doi:10.1057/jos.2012.20.

Seoane, V., Garcia-Rubio, C., Almenares, F., and Campo, C. (2021). Performance evaluation of CoAP and MQTT with security support for IoT environments. *Computer Networks*, 197:108338. doi:10.1016/j.comnet.2021.108338.

SINIR ([s.d.]). SINIR+: Sistema nacional de informações sobre a gestão de resíduos sólidos. https://sinir.gov.br/. Portal do Governo Federal. Acesso em: 14 nov. 2026.

Sosunova, I. and Porras, J. (2022). IoT-enabled smart waste management systems for smart cities: A systematic review. *IEEE Access*, 10:73326–73363. doi:10.1109/ACCESS.2022.3188308.

Toth, P. and Vigo, D., editors (2014). *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2 edition. doi:10.1137/1.9781611973594.

U.S. Environmental Protection Agency (2016). Volume-to-weight conversion factors. https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-04/documents/volume_to_weight_conversion_factors_memorandum_04192016_508fnl.pdf. Office of Resource Conservation and Recovery, abr. 2016. Acesso em: 14 nov. 2026.

Vaccari, I., Aiello, M., and Cambiaso, E. (2020). SlowITe, a novel denial of service attack affecting MQTT. *Sensors*, 20(10):2932. doi:10.3390/s20102932.

Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., et al. (2020). SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 17(3):261–272. doi:10.1038/s41592-019-0686-2.

Vishnu, S., Ramson, S. R. J., Rukmini, M. S. S., and Abu-Mahfouz, A. M. (2022). Sensor-based solid waste handling systems: A survey. *Sensors*, 22(6):2340. doi:10.3390/s22062340.

Voudouris, C. and Tsang, E. (1999). Guided local search and its application to the traveling salesman problem. *European Journal of Operational Research*, 113(2):469–499. doi:10.1016/S0377-2217(98)00099-X.

Wilcoxon, F. (1945). Individual comparisons by ranking methods. *Biometrics Bulletin*, 1(6):80–83. doi:10.2307/3001968.

Zoumpoulis, P., Konstantinidis, F. K., Tsimiklis, G., and Amditis, A. (2024). Smart bins for enhanced resource recovery and sustainable urban waste practices in smart cities: A systematic literature review. *Cities*, 152:105150. doi:10.1016/j.cities.2024.105150.

A. Reprodução dos experimentos

O repositório do projeto contém o código, os dados brutos e os scripts necessários para reproduzir todos os resultados. Com Python 3.12 e Docker ou Podman, a sequência é:

```
uv venv --python 3.12 .venv && source .venv/bin/activate
uv pip install -r requirements-lock.txt   # versões fixadas
python -m pytest -q                       # testes automatizados
scripts/broker.sh start      # Mosquitto 2.0.20, 127.0.0.1:1883
python -m experiments.run E1 E2 E3 E4 --workers 5
python -m experiments.run E5 --workers 3
python -m experiments.mqtt_integration
python -m experiments.replay && python -m experiments.analysis
python -m experiments.figures && python -m experiments.animations
python scripts/verify_reproducibility.py
scripts/build_paper.sh                    # TeX Live 2026 em contêiner
```

O executor grava uma linha por execução em `experiments/raw/E*.jsonl`, com a configuração completa, a semente e as métricas, e pula execuções já concluídas, o que permite interromper e retomar a rodada. Os manifestos registram o *commit* do código, as versões das bibliotecas e a plataforma.

B. Material suplementar

As animações abaixo foram geradas a partir de execuções gravadas e estão no diretório `animations/` do repositório, em GIF e MP4. Nenhuma delas é ilustração conceitual: os quadros reproduzem os estados registrados.

A_enchimento Ocupação de seis contêineres ao longo de 7 dias (política A, semente 1001).

B_telemetria_mqtt Telemetria recebida pela plataforma pelo broker Mosquitto em uma execução do modo *live* (80 contêineres virtuais), com eventos de limiar.

C_coleta_veiculos Veículos executando as rotas da política D na malha de Aracaju.

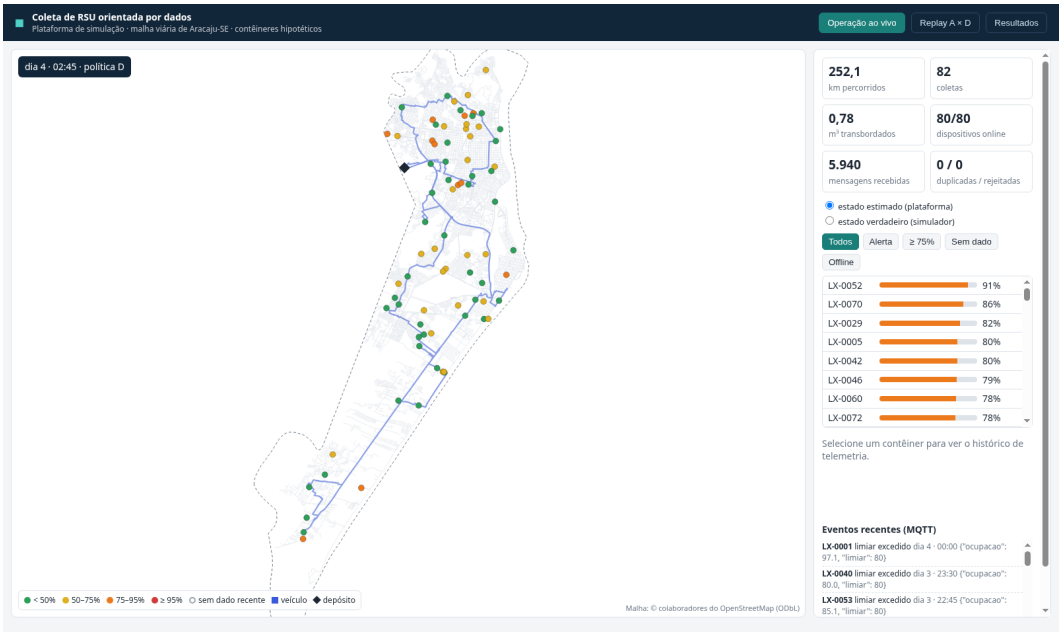
D_comparacao_A_D Comparação sincronizada das políticas A e D com a mesma demanda.

E_falha_comunicacao Estado verdadeiro e estado visto pela plataforma durante uma interrupção regional de 48 h.

C. Mapa de pinos do firmware 2.0

D. Declaração de uso de ferramentas de inteligência artificial

O desenvolvimento desta versão contou com a assistência de um modelo de linguagem (Claude, da Anthropic) na revisão bibliográfica (busca e conferência de metadados), na escrita e revisão do código, na execução dos experimentos e na redação do texto. Todas as referências tiveram os metadados conferidos em fontes oficiais (Crossref, OpenAlex ou página do editor), e o registro dessa verificação, incluindo quais textos foram lidos integralmente e quais apenas pelo resumo, está em `paper/references/biblioteca.csv`. Os resultados numéricos foram produzidos pelos programas do repositório e inseridos no texto automaticamente. A responsabilidade pelo conteúdo é dos autores, e o uso dessa assistência deve observar as normas da instituição.



(a) Operação ao vivo: telemetria recebida pelo broker, rotas do dia e histórico de um contêiner.



(b) Replay sincronizado das políticas A e D (semente 1001, $N = 100$).

Figura 6. Capturas do painel operacional, obtidas com a aplicação em execução (navegador em modo *headless*).

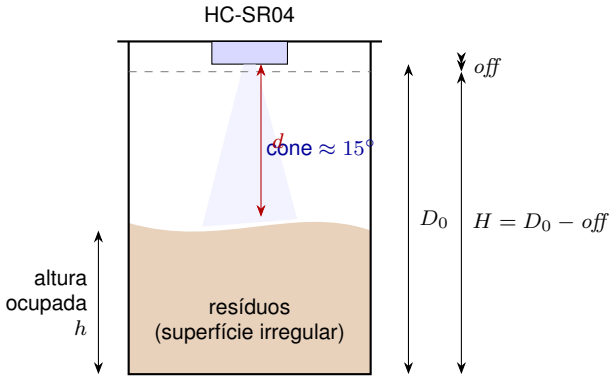


Figura 7. Geometria adotada para o contêiner instrumentado.

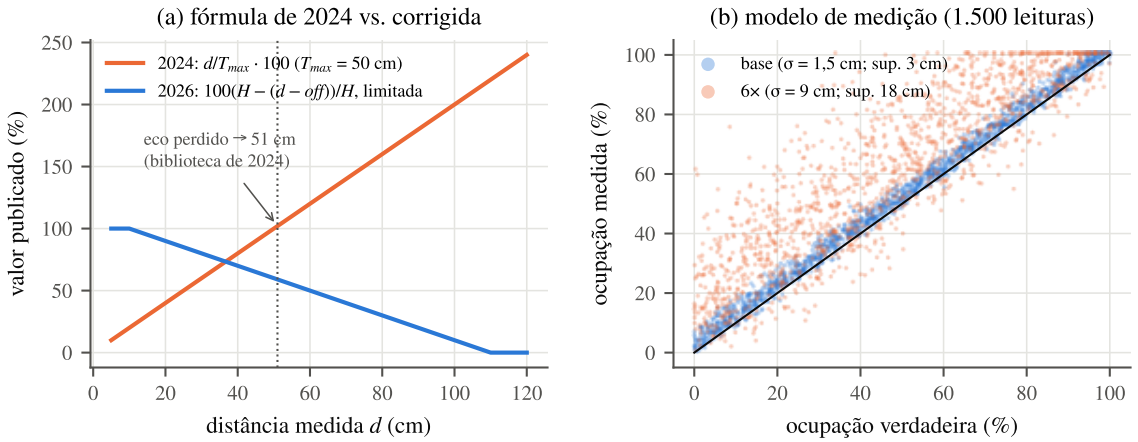


Figura 8. (a) Valor publicado em função da distância medida: a fórmula de 2024 cresce quando o contêiner esvazia e ultrapassa 100%; a fórmula corrigida é limitada a $[0, 100]$. (b) Ocupação medida $\times$ verdadeira pelo modelo de sensor (Equação 4), nos níveis de ruído base e 6$\times$.

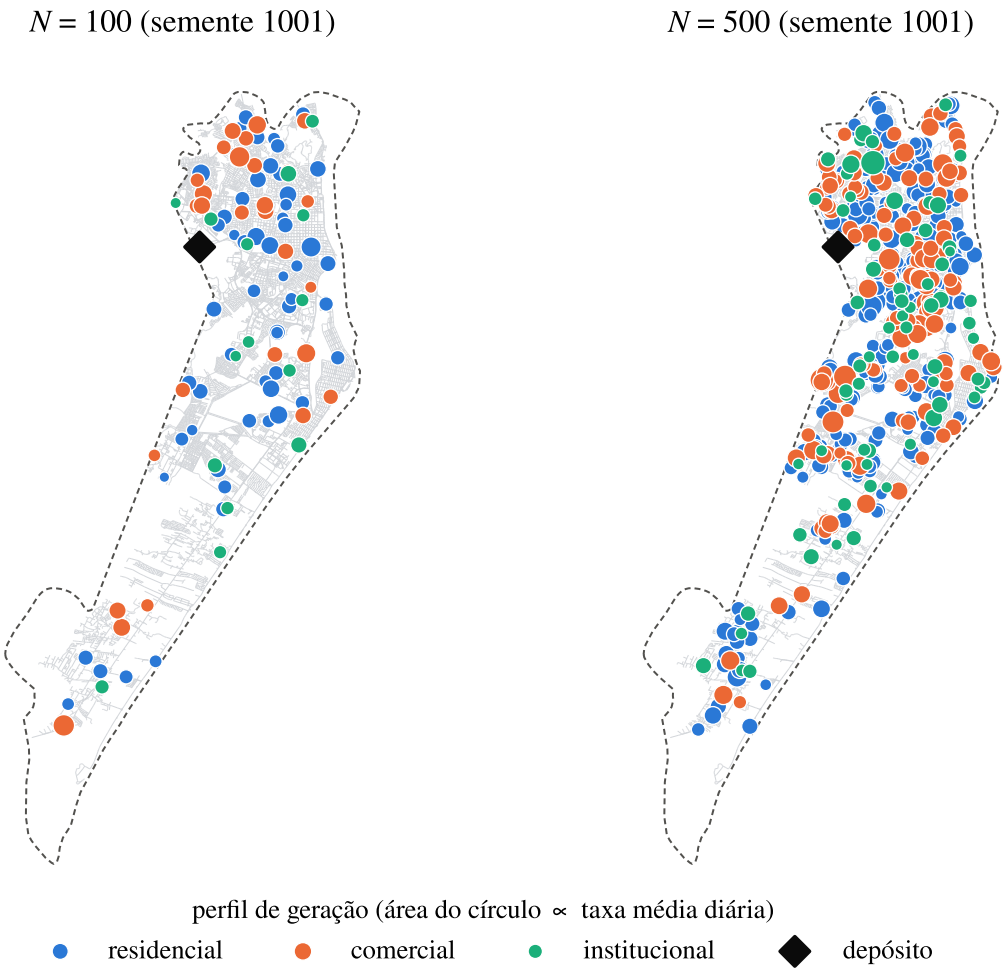


Figura 9. Contêineres simulados sobre a malha viária de Aracaju para 100 e 500 contêineres (semente 1001). As posições e o depósito são hipotéticos e não correspondem a equipamentos existentes.

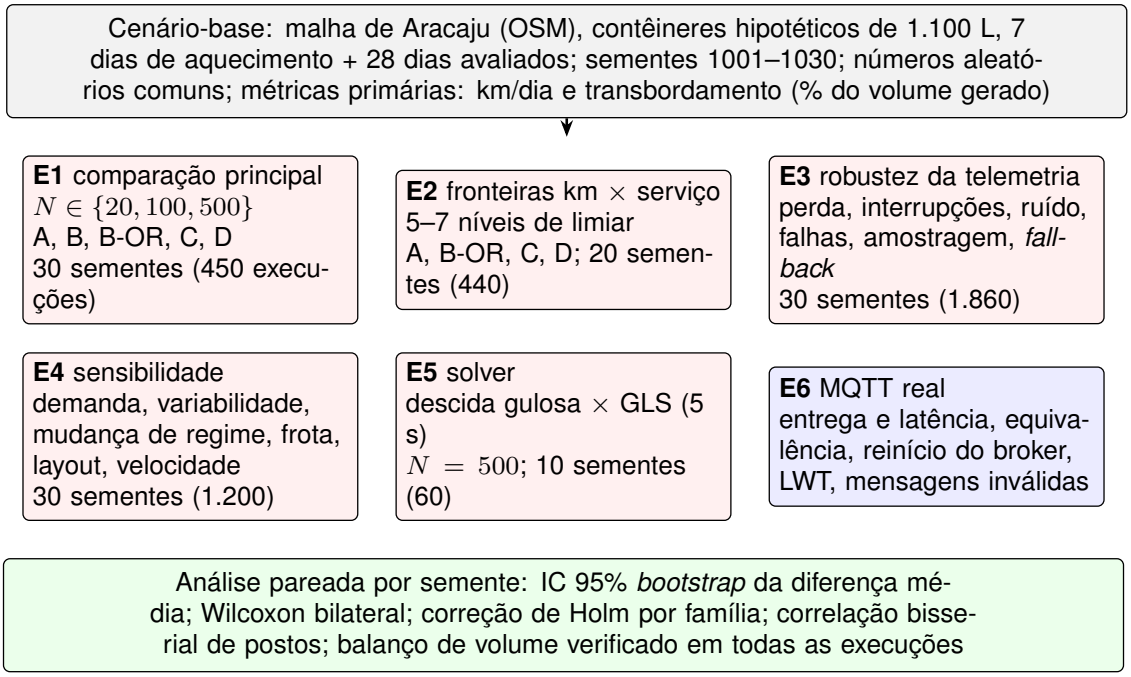


Figura 10. Protocolo experimental.

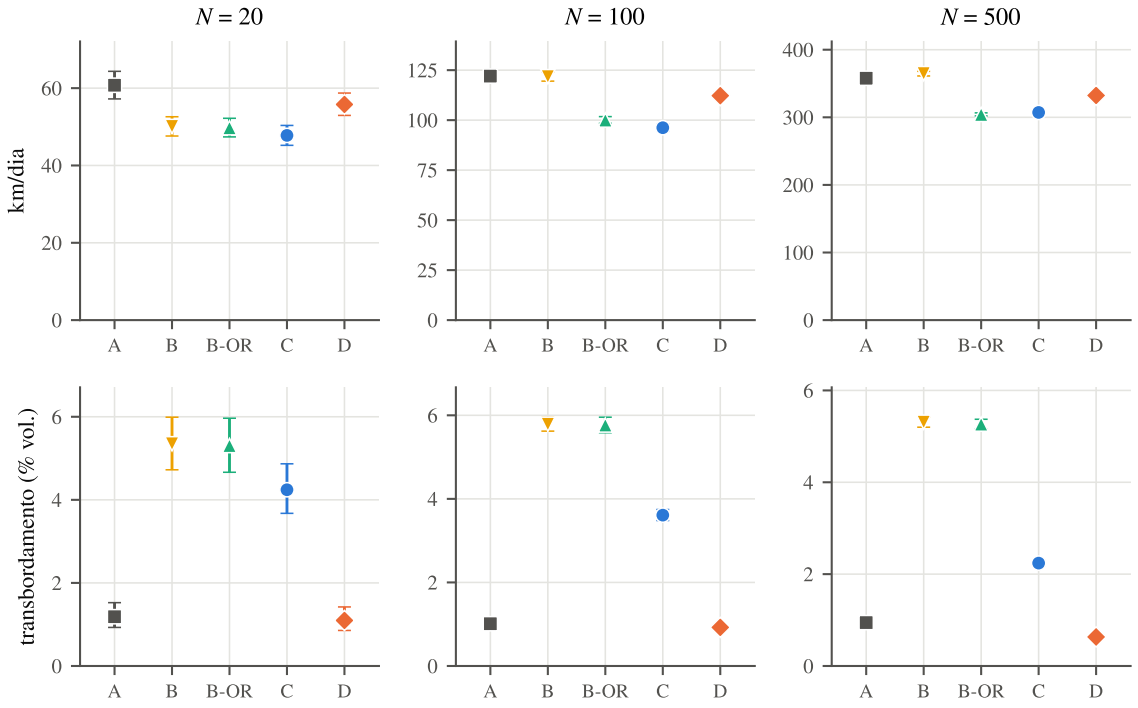


Figura 11. E1 – distância diária e transbordamento por política e escala (média e IC 95%, 30 sementes).

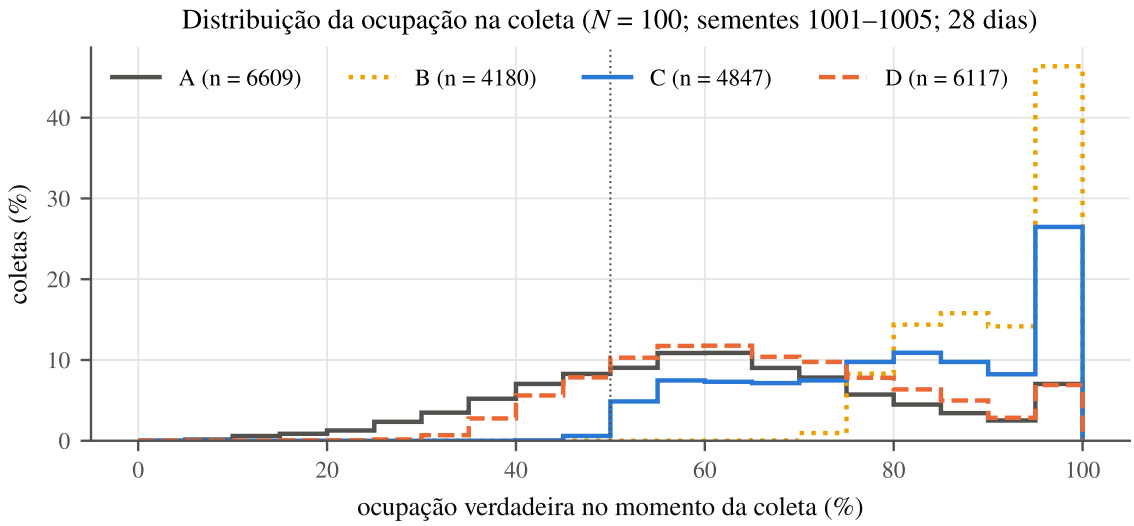


Figura 12. Distribuição da ocupação verdadeira no momento da coleta ($N = 100$; cinco sementes; 28 dias avaliados).

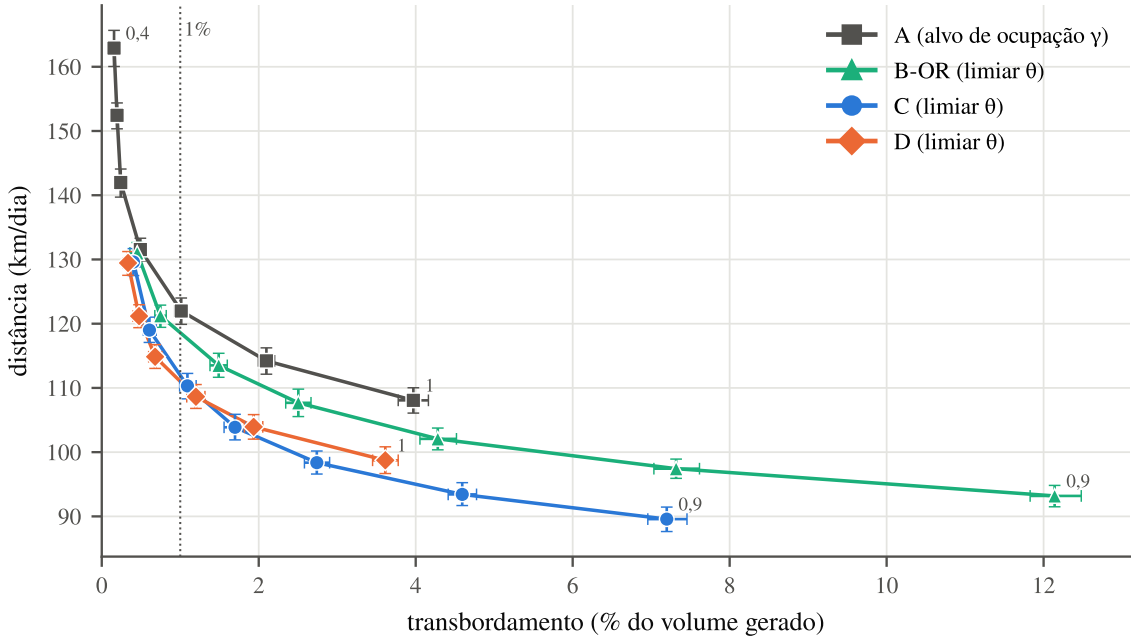


Figura 13. E2 – fronteiras distância × transbordamento ($N = 100$; 20 sementes por ponto; barras: IC 95% nos dois eixos). Números junto aos pontos: valor do parâmetro nos extremos (ocupação-alvo γ de 0,4 a 1 para A; limiar θ_{hi} a partir de 0,3 para B-OR e C e de 0,5 para D, no extremo de menor transbordamento).

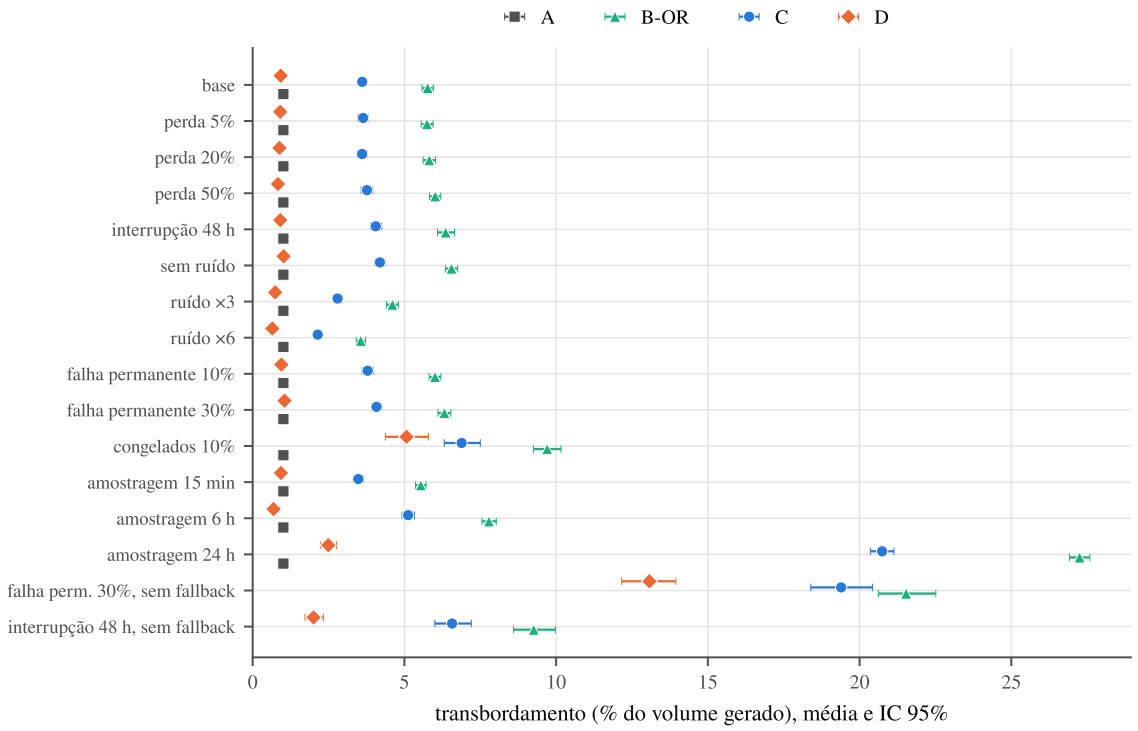


Figura 14. E3 – transbordamento por condição de telemetria (média e IC 95%; 30 sementes; $N = 100$).

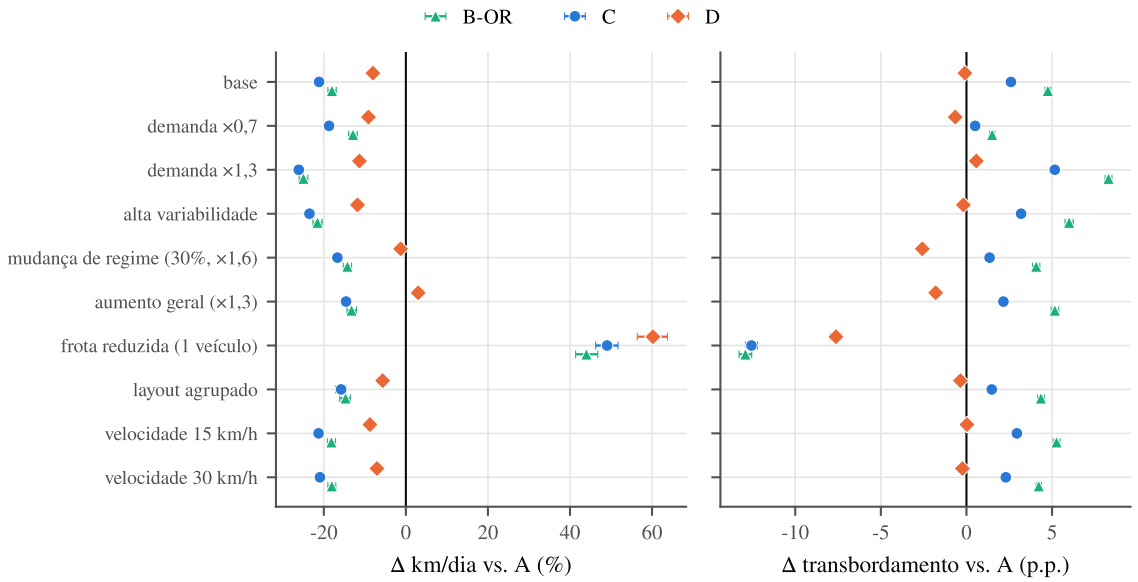


Figura 15. E4 – diferença pareada em relação a A por condição (média e IC 95%; 30 sementes; $N = 100$). Esquerda: distância (% de A); direita: transbordamento (pontos percentuais).

Tabela 11. E4 – comparações pareadas de km/dia por condição (alternativa − referência; 30 pares; Holm na família E4/km).

Condição	Comparação	Dif. média	IC 95%	Dif. (%)	r_{rb}	p (Holm)
base	B-OR − A	−21,98	[−23,19; −20,71]	−18,0	−1,00	<0,001
base	C − A	−25,81	[−26,95; −24,61]	−21,2	−1,00	<0,001
base	D − A	−9,80	[−10,97; −8,51]	−8,0	−1,00	<0,001
base	D − C	16,01	[15,28; 16,75]	16,6	1,00	<0,001
demanda ×0,7	B-OR − A	−12,69	[−13,72; −11,66]	−12,9	−1,00	<0,001
demanda ×0,7	C − A	−18,43	[−19,49; −17,36]	−18,7	−1,00	<0,001
demanda ×0,7	D − A	−8,98	[−9,89; −8,03]	−9,1	−1,00	<0,001
demanda ×0,7	D − C	9,45	[8,58; 10,24]	11,8	1,00	<0,001
demanda ×1,3	B-OR − A	−36,94	[−38,49; −35,36]	−25,0	−1,00	<0,001
demanda ×1,3	C − A	−38,63	[−40,14; −37,10]	−26,1	−1,00	<0,001
demanda ×1,3	D − A	−16,75	[−18,07; −15,40]	−11,3	−1,00	<0,001
demanda ×1,3	D − C	21,89	[21,09; 22,68]	20,0	1,00	<0,001
alta variabilidade	B-OR − A	−27,56	[−28,99; −26,11]	−21,5	−1,00	<0,001
alta variabilidade	C − A	−30,07	[−31,46; −28,67]	−23,5	−1,00	<0,001
alta variabilidade	D − A	−15,08	[−16,33; −13,94]	−11,8	−1,00	<0,001
alta variabilidade	D − C	14,99	[14,33; 15,64]	15,3	1,00	<0,001
mudança de regime (30%, ×1,6)	B-OR − A	−17,40	[−18,65; −16,16]	−14,2	−1,00	<0,001
mudança de regime (30%, ×1,6)	C − A	−20,38	[−21,56; −19,18]	−16,7	−1,00	<0,001
mudança de regime (30%, ×1,6)	D − A	−1,57	[−2,82; −0,24]	−1,3	−0,55	0,008
mudança de regime (30%, ×1,6)	D − C	18,82	[18,07; 19,56]	18,5	1,00	<0,001
aumento geral (×1,3)	B-OR − A	−16,48	[−17,87; −14,99]	−13,2	−1,00	<0,001
aumento geral (×1,3)	C − A	−18,14	[−19,38; −16,77]	−14,6	−1,00	<0,001
aumento geral (×1,3)	D − A	3,74	[2,46; 5,25]	3,0	0,94	<0,001
aumento geral (×1,3)	D − C	21,88	[21,05; 22,73]	20,6	1,00	<0,001
frota reduzida (1 veículo)	B-OR − A	23,60	[22,19; 25,10]	44,0	1,00	<0,001
frota reduzida (1 veículo)	C − A	26,30	[24,81; 27,73]	49,0	1,00	<0,001
frota reduzida (1 veículo)	D − A	32,29	[30,24; 34,19]	60,2	1,00	<0,001
frota reduzida (1 veículo)	D − C	5,99	[4,36; 7,68]	7,5	0,98	<0,001
layout agrupado	B-OR − A	−13,25	[−14,53; −12,20]	−14,7	−1,00	<0,001
layout agrupado	C − A	−14,25	[−15,49; −13,11]	−15,8	−1,00	<0,001
layout agrupado	D − A	−5,11	[−6,25; −4,17]	−5,7	−1,00	<0,001
layout agrupado	D − C	9,14	[8,33; 9,95]	12,0	1,00	<0,001
velocidade 15 km/h	B-OR − A	−22,12	[−23,32; −20,89]	−18,2	−1,00	<0,001
velocidade 15 km/h	C − A	−25,93	[−27,17; −24,72]	−21,3	−1,00	<0,001
velocidade 15 km/h	D − A	−10,68	[−11,83; −9,48]	−8,8	−1,00	<0,001
velocidade 15 km/h	D − C	15,25	[14,69; 15,82]	15,9	1,00	<0,001
velocidade 30 km/h	B-OR − A	−22,06	[−23,26; −20,88]	−18,0	−1,00	<0,001
velocidade 30 km/h	C − A	−25,61	[−26,88; −24,38]	−20,9	−1,00	<0,001
velocidade 30 km/h	D − A	−8,61	[−9,71; −7,39]	−7,0	−1,00	<0,001
velocidade 30 km/h	D − C	17,00	[16,29; 17,68]	17,6	1,00	<0,001

Tabela 12. E4 – comparações pareadas de transbordamento (p.p. do volume gerado; Holm na família E4/transbordamento).

Condição	Comparação	Dif. média	IC 95%	Dif. (%)	r_{rb}	p (Holm)
base	B-OR − A	4,76	[4,59; 4,92]	470,1	1,00	<0,001
base	C − A	2,60	[2,47; 2,73]	256,8	1,00	<0,001
base	D − A	−0,09	[−0,17; −0,01]	−8,7	−0,40	0,115
base	D − C	−2,69	[−2,80; −2,58]	−74,4	−1,00	<0,001
demanda ×0,7	B-OR − A	1,50	[1,34; 1,65]	132,5	1,00	<0,001
demanda ×0,7	C − A	0,51	[0,35; 0,67]	44,7	0,91	<0,001
demanda ×0,7	D − A	−0,65	[−0,76; −0,55]	−57,8	−1,00	<0,001
demanda ×0,7	D − C	−1,16	[−1,28; −1,05]	−70,9	−1,00	<0,001
demanda ×1,3	B-OR − A	8,30	[8,09; 8,50]	673,7	1,00	<0,001
demanda ×1,3	C − A	5,16	[4,97; 5,35]	418,7	1,00	<0,001
demanda ×1,3	D − A	0,58	[0,49; 0,66]	46,9	1,00	<0,001
demanda ×1,3	D − C	−4,58	[−4,76; −4,40]	−71,7	−1,00	<0,001
alta variabilidade	B-OR − A	6,00	[5,76; 6,24]	151,6	1,00	<0,001
alta variabilidade	C − A	3,19	[2,98; 3,39]	80,7	1,00	<0,001
alta variabilidade	D − A	−0,18	[−0,32; −0,03]	−4,5	−0,44	0,104
alta variabilidade	D − C	−3,37	[−3,51; −3,22]	−47,1	−1,00	<0,001
mudança de regime (30%, ×1,6)	B-OR − A	4,08	[3,86; 4,29]	97,0	1,00	<0,001
mudança de regime (30%, ×1,6)	C − A	1,35	[1,16; 1,54]	32,2	1,00	<0,001
mudança de regime (30%, ×1,6)	D − A	−2,58	[−2,72; −2,43]	−61,4	−1,00	<0,001
mudança de regime (30%, ×1,6)	D − C	−3,93	[−4,07; −3,79]	−70,8	−1,00	<0,001
aumento geral (×1,3)	B-OR − A	5,16	[4,94; 5,39]	140,6	1,00	<0,001
aumento geral (×1,3)	C − A	2,16	[1,95; 2,38]	58,7	1,00	<0,001
aumento geral (×1,3)	D − A	−1,80	[−1,98; −1,61]	−48,9	−1,00	<0,001
aumento geral (×1,3)	D − C	−3,95	[−4,11; −3,80]	−67,8	−1,00	<0,001
frota reduzida (1 veículo)	B-OR − A	−12,91	[−13,28; −12,54]	−41,0	−1,00	<0,001
frota reduzida (1 veículo)	C − A	−12,56	[−12,91; −12,20]	−39,9	−1,00	<0,001
frota reduzida (1 veículo)	D − A	−7,62	[−7,96; −7,30]	−24,2	−1,00	<0,001
frota reduzida (1 veículo)	D − C	4,94	[4,77; 5,10]	26,1	1,00	<0,001
layout agrupado	B-OR − A	4,35	[4,16; 4,55]	437,6	1,00	<0,001
layout agrupado	C − A	1,48	[1,36; 1,60]	148,9	1,00	<0,001
layout agrupado	D − A	−0,35	[−0,42; −0,28]	−35,4	−1,00	<0,001
layout agrupado	D − C	−1,83	[−1,95; −1,71]	−74,1	−1,00	<0,001
velocidade 15 km/h	B-OR − A	5,26	[5,07; 5,46]	497,4	1,00	<0,001
velocidade 15 km/h	C − A	2,95	[2,80; 3,11]	278,5	1,00	<0,001
velocidade 15 km/h	D − A	0,03	[−0,06; 0,11]	2,9	0,14	0,503
velocidade 15 km/h	D − C	−2,92	[−3,06; −2,77]	−72,8	−1,00	<0,001
velocidade 30 km/h	B-OR − A	4,22	[4,07; 4,38]	422,8	1,00	<0,001
velocidade 30 km/h	C − A	2,30	[2,15; 2,45]	230,1	1,00	<0,001
velocidade 30 km/h	D − A	−0,24	[−0,31; −0,16]	−23,5	−0,87	<0,001
velocidade 30 km/h	D − C	−2,53	[−2,66; −2,41]	−76,8	−1,00	<0,001

Tabela 13. Ligações do protótipo com o firmware 2.0 (DOIT ESP32 DevKit V1).

Sinal	GPIO	Observação
HC-SR04 TRIG	14	nível alto de 3,3 V é suficiente para o disparo
HC-SR04 ECHO	27	via divisor 1 kΩ (série) / 2 kΩ (terra): $5 \times 2/3 \approx 3{,}33$ V
DHT11 DATA	4	alimentação em 3,3 V; *pull-up* de 4,7–10 kΩ para 3,3 V
LED	2	LED da placa; saída