

Estratégia de Compartilhamento de Drones em Sistemas de Entrega com Centros de Distribuição Distribuídos

Leonel Feitosa¹, Gabriel Campos¹, Iure Fé¹,
José Miqueias Pereira¹, Lucas Lopes¹,
Carlos Kamienski² e Francisco Airtton Silva¹

¹Universidade Federal do Piauí – PI – Brasil

²Universidade Federal do ABC – SP – Brasil

{leonelfeitosa, gabriel.mourao, iure.fe}@ufpi.edu.br

{jmiqueias, lucaslopes092020, faps}@ufpi.edu.br

carlos.kamienski@ufabc.edu.br

Resumo. *Sistemas de entrega por drones em múltiplos Centros de Distribuição (CDs) exigem mecanismos para lidar com variações de demanda e reduzir ociosidade da frota. Quando a demanda se concentra em um CD, formam-se filas e cresce o tempo de atendimento, enquanto outro CD mantém drones disponíveis. Este trabalho propõe um modelo para um sistema com dois CDs de distribuição e mecanismo de compartilhamento de drones ativado por desequilíbrio entre demanda e disponibilidade, permitindo analisar o impacto dessa estratégia sobre o atendimento ao longo do tempo. Os resultados caracterizam como o compartilhamento acompanha a alternância de demanda, reduz saturação e estabiliza o atendimento ao longo do tempo, com ganhos em tempo médio de missão, vazão, utilização da frota e probabilidade de cancelamento de envio. A validação foi realizada por comparação entre o modelo e um simulador.*

Abstract. *Drone delivery systems operating across multiple Distribution Centers (DCs) require mechanisms to handle demand variations and reduce fleet idleness. When demand concentrates at a single DC, queues form and service time increases, while another DC keeps drones available. This work proposes a model for a system with two distribution DCs and a drone-sharing mechanism triggered by imbalance between demand and availability, enabling the analysis of the impact of this strategy on service performance over time. The results characterize how sharing follows demand alternation, reduces saturation, and stabilizes service over time, achieving gains in average mission time, throughput, fleet utilization, and delivery cancellation probability. Validation was performed by comparing the model with a simulator.*

1. Introdução

Nos últimos anos, os sistemas de entrega por drones têm se consolidado na logística de última milha, combinando avanços tecnológicos, navegação autônoma e integração com plataformas digitais de pedidos. Esse movimento também aparece nas projeções de mercado, que apontam US\$ 1,68 bilhão em 2023 e crescimento para US\$ 4,35 bilhões até 2027, com liderança da Ásia-Pacífico (39%), seguida por América do Norte e Europa [Statista Research Department 2026]. Em paralelo, a adoção em contextos urbanos

evolui de projetos piloto para operações em escala: a Walmart anunciou a expansão do serviço para cinco novas cidades (Atlanta, Charlotte, Houston, Orlando e Tampa) em 2025 [Walmart Corporate 2025] e, em janeiro de 2026, Wing + Walmart informaram a ampliação para mais 150 lojas, com meta de 270 localidades até 2027 (cobertura potencial de 40 milhões de pessoas), evidenciando tração prática e a intensificação do interesse por frotas aéreas autônomas em cenários reais [Wing 2026].

Apesar de promissores, drones de entrega ainda envolvem investimento relevante, podendo custar de alguns milhares de dólares a cerca de US\$ 60 mil, a depender de fatores como porte e capacidade de carga [JOUAV 2024]. Nesse cenário, o aumento do volume de pedidos e a pressão por prazos menores tornam necessário usar melhor esses recursos, principalmente em regiões densas, onde a demanda varia ao longo do tempo e pode concentrar filas e atrasos em um Centro de Distribuição (CD) enquanto outros permanecem com parte da frota ociosa. Assim, além de viabilizar a operação, torna-se importante tratar de oscilações de demanda e com o balanceamento de carga entre CDs por meio de mecanismos que permitam realocação dinâmica de drones, sustentando níveis de serviço sob variação de demanda.

Este artigo investiga um problema recorrente em sistemas de entrega por drones com múltiplos CDs: variações de demanda ao longo do tempo podem concentrar requisições em um único CD, levando ao crescimento das filas e ao aumento do tempo de atendimento, enquanto outro CD mantém parte da frota ociosa. Essa diferença dificulta manter o atendimento estável ao longo do tempo e aumenta a chance de cancelamento de envios, motivando a necessidade de mecanismos operacionais de balanceamento baseados no desequilíbrio entre demanda e disponibilidade. A literatura cobre amplamente planejamento e alocação em instâncias estáticas [Mirzapour et al. 2024, Bruni et al. 2023, Hana and Kob 2025, Luo et al. 2025], e há abordagens que observam a dinâmica temporal via simulação [Ghelichi et al. 2024] ou caracterizam regimes médios com filas [Pei et al. 2021]. Ainda assim, nem todos os estudos representam explicitamente a evolução temporal do atendimento e o compartilhamento de drones como mecanismo operacional de balanceamento entre CDs, destacando a importância de investigar de forma detalhada como essa estratégia influencia o desempenho do sistema ao longo do tempo, especialmente em termos de filas, utilização e cancelamentos.

Para analisar esse comportamento e o efeito de políticas de realocação entre CDs, este trabalho adota Redes de Petri Estocásticas (Stochastic Petri Nets - SPNs), que permitem modelar e estimar probabilisticamente o desempenho do atendimento sob chegadas contínuas. Além disso, SPNs são uma alternativa especialmente eficaz para representar concorrência, paralelismo e sincronização, sendo mais intuitivas do que abordagens convencionais, como cadeias de Markov, nesse tipo de sistema [Feitosa et al. 2025].

Este trabalho propõe um modelo em Redes de Petri Estocásticas (SPN) para avaliar o compartilhamento de drones em sistemas de entrega com dois CDs e variação de demanda ao longo do tempo. O modelo representa chegadas de pacotes, formação de filas, execução de missões e a realocação de drones entre CDs como mecanismo operacional de balanceamento, descrevendo de forma detalhada e estruturada como são modelados e estimados probabilisticamente o desempenho do atendimento sob chegadas contínuas. Além disso, SPNs são especialmente adequadas para representar concorrência, paralelismo e sincronização, sendo mais intuitivas do que abordagens convencionais, como cadeias de Markov, nesse tipo de sistema [Feitosa et al. 2025]. A análise é conduzida no regime

transiente, isto é, acompanhando a evolução das métricas ao longo do tempo, pois esse período evidencia de forma mais clara filas, ociosidade e cancelamentos, e não apenas valores médios. O desempenho é avaliado por métricas como tempo médio de missão, vazão, utilização da frota e probabilidade de cancelamento de envio, e o modelo é validado por comparação com um simulador do mesmo cenário e parametrização, reforçando a consistência dos resultados obtidos.

O artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta uma comparação com trabalhos relacionados; a Seção 3 descreve o modelo SPN e respectivas métricas; a Seção 4 traz um estudo de caso e os resultados em análise transiente; e a Seção 5 conclui o trabalho e indica direções futuras.

2. Trabalhos Relacionados

A literatura sobre entregas por drones aborda decisões como planejamento de rotas, dimensionamento de frotas e avaliação do atendimento. Embora existam diferentes abordagens para esse cenário, nem todas representam explicitamente a dinâmica temporal do sistema nem tratam o compartilhamento de drones como mecanismo operacional de balanceamento entre CDs. Nesta seção, discutimos 13 trabalhos representativos e destacamos os principais contrastes em relação à proposta deste artigo.

Os estudos analisados permitem observar diferenças quanto à organização do sistema, aos métodos de avaliação, à consideração da dinâmica temporal e às métricas priorizadas. Também examinamos se os trabalhos incorporam o compartilhamento de drones como mecanismo operacional ou se permanecem restritos ao planejamento de rotas, frotas e políticas de atendimento.

Tipo de sistema. A tabela evidencia três agrupamentos principais: (i) abordagens truck-drone, presentes em [Mirzapour et al. 2024], [Dang et al. 2024], [Zhang et al. 2024], [Bi et al. 2024] e [Das et al. 2020]; (ii) cenários UAV-only, observados em [Wen et al. 2025] e [Ghelichi et al. 2024]; e (iii) configurações com shared fleet/depot, exploradas em [Bruni et al. 2023], [Hana and Kob 2025], [Luo et al. 2025], [Pei et al. 2021] e [Sawadsitang et al. 2021]. Essa separação ajuda a entender se o sistema é estruturado por cooperação caminhão-drone, por operações exclusivamente aéreas ou por compartilhamento de recursos entre múltiplos atores/locais.

Método de avaliação. Há predominância de otimização matemática (MILP) em [Bruni et al. 2023], [Hana and Kob 2025] e [Das et al. 2020], enquanto simulação combinada com otimização aparece em [Wen et al. 2025] e [Ghelichi et al. 2024]. Modelos robustos/estocásticos são usados em [Mirzapour et al. 2024] e [Sawadsitang et al. 2021]. Já aprendizado por reforço surge em [Luo et al. 2025] e [Bi et al. 2024]. Por fim, [Dang et al. 2024], [Zhang et al. 2024] e [Benarbia 2021] organizam e discutem a literatura, servindo como base de síntese e posicionamento.

Natureza temporal. A maioria dos trabalhos trata o problema como instância estática, típica de planejamento/otimização por cenário, como em [Mirzapour et al. 2024], [Hana and Kob 2025] e [Bruni et al. 2023]. Em contraste, [Ghelichi et al. 2024] assume análise transiente, observando a evolução do comportamento ao longo do tempo via simulação. Já [Pei et al. 2021] se apoia em um modelo de filas com leitura estacionária, útil para caracterizar regimes médios de operação. Essa coluna separa claramente estudos de “planejamento por instância” daqueles que observam dinâmica temporal do atendimento.

Métricas. As métricas mais frequentes se concentram em tempo e custo, recorrentes em vários trabalhos, incluindo [Mirzapour et al. 2024] e [Das et al. 2020]. Dimensões energéticas ganham centralidade em [Bruni et al. 2023]. Medidas associadas a QoS/nível de serviço aparecem com destaque em [Hana and Kob 2025] e [Bi et al. 2024]. No caso de [Pei et al. 2021], métricas de espera/atraso e parâmetros econômicos ligados a preço e dimensionamento sustentam a análise. Por sua vez, [Sawadsitang et al. 2021] incorpora também risco e confiabilidade como parte da avaliação.

Compartilhamento de Drones. A coluna de compartilhamento destaca os estudos em que a frota é explicitamente compartilhada ou há mecanismo direto de cooperação envolvendo drones como recurso comum, caso de [Bruni et al. 2023], [Hana and Kob 2025], [Luo et al. 2025], [Pei et al. 2021] e [Sawadsitang et al. 2021]. Nos demais, o sistema pode envolver múltiplos veículos (inclusive caminhões e drones), mas sem caracterizar o drone como recurso compartilhado entre atores/depósitos/restaurantes, como em [Das et al. 2020] e [Mirzapour et al. 2024]. Esse recorte ajuda a separar trabalhos onde “coordenação” ocorre por roteamento/políticas, daqueles onde há pooling/compartilhamento como mecanismo operacional central.

Contribuições em relação à literatura existente. Em comparação aos trabalhos analisados, este estudo se distingue por integrar o compartilhamento de drones a uma modelagem estocástica voltada à análise transiente do sistema. Enquanto a maior parte da literatura trata o problema como instância estática, aqui investigamos o efeito operacional ao longo do tempo da alternância de demanda e da realocação de frota, capturando formação de filas, picos de carga e adaptação do atendimento. Diferentemente de abordagens baseadas apenas em MILP, DRL ou simulação, o uso de Redes de Petri Estocásticas permite representar concorrência, sincronização e compartilhamento de recursos sob incerteza temporal, oferecendo uma leitura integrada do impacto da política sobre métricas como tempo médio de missão, vazão, utilização e probabilidade de cancelamento de envio, tratando o compartilhamento como mecanismo operacional ativo de balanceamento de carga.

3. Modelagem do Sistema

Esta seção apresenta a modelagem utilizada para analisar o desempenho do sistema de entregas por drones. Inicialmente, descreve-se o cenário considerado, incluindo os CDs de distribuição e o mecanismo de compartilhamento de frota. Em seguida, é apresentado o modelo SPN proposto e, por fim, são definidas as métricas adotadas na avaliação.

3.1. Cenário de Entrega por Drones

A Figura 1 apresenta o cenário de avaliação, composto por dois CDs de distribuição geograficamente distintos, denominados *Centro de Distribuição A* e *Centro de Distribuição B*. Cada CD recebe pacotes associados à sua região de atendimento, mantém uma fila local e opera com uma frota local de drones. Os pacotes permanecem em fila até a disponibilidade de um drone. Uma vez alocado, o drone executa integralmente a missão, incluindo a coleta do pacote, o deslocamento até o destino, a entrega e o retorno ao CD de origem, passando então a integrar novamente a frota disponível.

Além da operação local, o cenário incorpora um mecanismo de compartilhamento de drones entre os CDs. Esse mecanismo é acionado quando a demanda se concentra em um dos CDs por um período e a frota local não acompanha o acúmulo de pacotes,

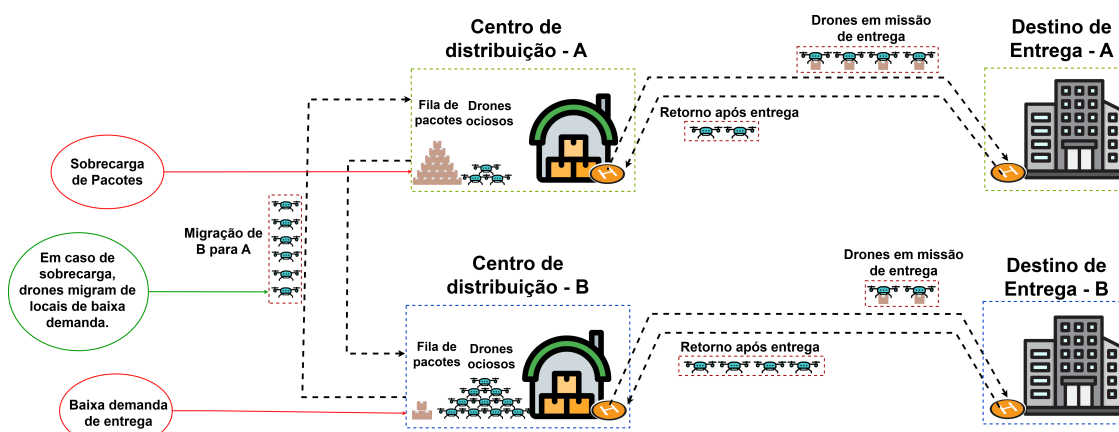


Figura 1. Cenário de entrega por drones com dois centros de distribuição e compartilhamento de frota.

enquanto o outro CD mantém drones ociosos. Nessa condição, parte da frota é transferida temporariamente do CD com menor carga para o CD mais demandado, de modo a reduzir filas e atrasos sem interromper o atendimento básico do CD que cede drones. Como a demanda alterna ao longo do tempo, o compartilhamento também pode se inverter, permitindo que a frota acompanhe a mudança do CD mais carregado.

Do ponto de vista funcional, o cenário proposto é composto por três componentes principais: os Centros de Distribuição (A e B), responsáveis pela recepção dos pacotes, organização das filas e gerenciamento da frota local de drones; o Mecanismo de Missão, que coordena as etapas de coleta, voo, entrega e retorno dos drones; e o Mecanismo de Compartilhamento de Drones, que realiza a transferência temporária de drones entre CDs conforme o estado do sistema. Cada CD possui filas e uma frota inicial parametrizável, e o compartilhamento é acionado por uma condição baseada na utilização da frota, realocando drones do CD menos demandado para o mais sobrecarregado para reduzir acúmulo e equilibrar o atendimento ao longo do tempo.

Essa organização permite representar, de forma integrada, a formação de filas, a utilização da frota, a execução das missões de entrega e a realocação de recursos como resposta às variações de demanda. O cenário define a base conceitual para a modelagem estocástica apresentada na próxima na Subsessão 3.2, na qual esses componentes e seus fluxos são formalizados por meio de um modelo SPN para viabilizar a análise quantitativa do desempenho do sistema.

3.2. Modelo SPN Proposto

A Figura 2 apresenta a SPN proposta, que representa uma operação com dois CDs e mecanismo de compartilhamento de drones quando há desequilíbrio entre demanda e disponibilidade. A Tabela 1 descreve as condições de guarda utilizadas para controlar as chegadas e as decisões de compartilhamento.

O modelo foi construído e simulado na ferramenta Mercury (versão 5.0.1) [Maciel et al. 2017]. Sua estrutura é organizada em quatro áreas: (i) Centro de Distribuição A (verde), (ii) Centro de Distribuição B (azul), (iii) Compartilhamento de drones entre CDs (vermelho) e (iv) Clock de alternância de modo (laranja). Todas as transições seguem *infinite server semantics*, permitindo disparos simultâneos enquanto habilitadas [Girault and Valk 2013]. Os *tokens* representam recursos e estados do sis-

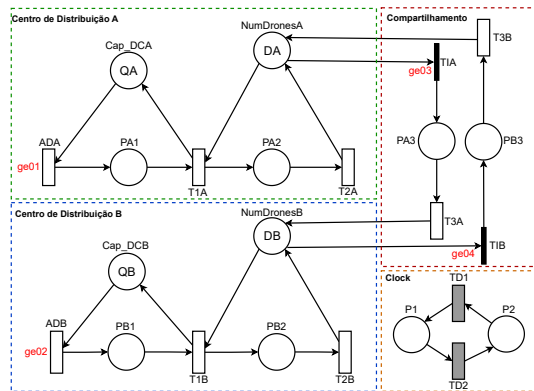


Figura 2. Modelo SPN para avaliar logística de entregas por drones.

Tabela 1. Condições de guarda do modelo SPN proposto.

Guarda	Expressão	Ação
ge01	$(\#P2 = 1)$	ADA
ge02	$(\#P1 = 1)$	ADB
ge03	$(\#PB1 + \#PB2) > (\#DB + \#PA3)$	TIA ($A \rightarrow B$)
ge04	$\wedge (\#NumDronesA > \#PA1)$	TIB ($B \rightarrow A$)
	$(\#PA1 + \#PA2) > (\#DA + \#PB3)$	
	$\wedge (\#NumDronesB > \#PB1)$	

tema, como pacotes em fila, drones disponíveis e drones em transferência, descrevendo a evolução do atendimento ao longo do tempo.

O fluxo de demanda é regulado pelo Clock, que alterna o modo do sistema entre P1 e P2 por meio das transições determinísticas TD1 e TD2. Essa alternância define qual CD recebe chegadas em cada fase. Quando $\#P2 = 1$, a guarda $ge01$ habilita ADA. Quando $\#P1 = 1$, a guarda $ge02$ habilita ADB. Neste trabalho, o símbolo $\#$ denota a quantidade de tokens presentes em um lugar da SPN. Assim, o modelo alterna a pressão de chegada entre A e B, reproduzindo variações temporais de demanda.

Em cada CD, o pacote entra no sistema pelas transições ADA (A) e ADB (B), que representam atrasos entre chegadas. As chegadas alimentam as filas PA1 e PB1. O limite de acúmulo é definido pelas capacidades QA e QB, associadas aos lugares Cap_DCA e Cap_DCB. Ao atingir a capacidade configurada, novas chegadas deixam de ser aceitas, caracterizando perda de pacotes por saturação. Havendo drones disponíveis nos lugares NumDronesA e NumDronesB (com marcações iniciais DA e DB), as transições T1A e T1B modelam o tempo de coleta do pacote e início da missão. Em seguida, o pacote passa aos lugares PA2 e PB2, indicando a associação ao atendimento. As transições T2A e T2B modelam o tempo de missão, abrangendo voo, entrega e retorno à base.

O compartilhamento de drones é acionado quando o acúmulo de pacotes em um CD supera a sua capacidade efetiva de atendimento e o outro CD mantém folga operacional para ceder drones, sendo que, a cada decisão habilitada pelas guardas $ge03$ ou $ge04$, exatamente um drone é transferido, e novas transferências ocorrem sucessivamente enquanto essa condição permanecer verdadeira. A decisão é representada pelas transições imediatas $T1A$ e $T1B$, controladas pelas guardas $ge03$ e $ge04$. Essas expressões comparam o acúmulo de pacotes no CD que solicita apoio com a disponibilidade local, considerando também drones já em transferência, e verificam se o CD de origem pode liberar drones sem comprometer sua própria operação. Como exemplo, quando um galpão passa a concentrar chegadas e sua disponibilidade de drones não acompanha o acúmulo na fila, o modelo pode habilitar a decisão de envio a partir do outro CD. Uma vez tomada a decisão, o drone entra no estado de transferência ($PA3$ ou $PB3$) e completa a troca entre CDs pelas transições $T3A$ e $T3B$, que representam o tempo de deslocamento entre A e B durante o compartilhamento. Em síntese, o modelo captura o ciclo completo de aten-

dimento (chegada, espera em fila, coleta, missão e retorno) e incorpora a transferência de drones como resposta ao desbalanceamento de carga entre os CDs, permitindo avaliar como essa realocação afeta o desempenho do sistema ao longo do tempo.

3.3. Métricas

A estrutura do modelo permite analisar o comportamento do sistema de entregas sob alternância de demanda entre CDs e compartilhamento de drones, a partir de métricas como tempo médio de missão (*TMM*), vazão, utilização, vazão do compartilhamento e probabilidade de cancelamento de envio. Em particular, o *TMM* é obtido por uma formulação baseada na Lei de Little [Jain 1990], na qual o tempo médio no sistema é dado pela razão entre o número médio de elementos e a vazão do sistema: aqui, os elementos correspondem aos pacotes em fila e em atendimento nos dois CDs, enquanto a taxa de saída é a vazão de entregas. Assim, o *TMM* é calculado pela soma dos valores esperados de marcação nos lugares PA1, PA2, PB1 e PB2, dividida pela vazão total do processo de entrega, sendo VOO o tempo associado à missão. Nesta notação, $E\{\cdot\}$ denota o *valor esperado* da variável aleatória associada ao número de tokens. A Equação 1 apresenta a expressão utilizada na ferramenta Mercury [Maciel et al. 2017].

$$TMM = \frac{E\{\#PA1\} + E\{\#PA2\} + E\{\#PB1\} + E\{\#PB2\}}{\left(\frac{E\{\#PA2\}}{VOO}\right) + \left(\frac{E\{\#PB2\}}{VOO}\right)}. \quad (1)$$

A utilização média da frota (*Utilização*) descreve a fração de drones ocupados em relação ao total configurado em cada CD. A expressão considera, para cada CD, a diferença entre a quantidade total de drones e o número esperado de drones disponíveis nos lugares NumDronesA e NumDronesB. Em seguida, calcula-se a média entre os dois CDs e converte-se para porcentagem, como apresentado na Equação 2. Nesta forma, *DA* e *DB* representam, respectivamente, a quantidade total de drones configurada em A e em B.

$$Utilização = \left(\frac{\left(\frac{DA - E\{\#NumDronesA\}}{DA} \right) + \left(\frac{DB - E\{\#NumDronesB\}}{DB} \right)}{2} \right) \times 100. \quad (2)$$

A probabilidade de cancelamento de envio (*Cancellation*) representa a chance de uma chegada não conseguir entrar no sistema por falta de capacidade no instante da chegada. No modelo, essa condição ocorre quando o lugar que representa a capacidade disponível de um CD está sem *tokens*. A Equação 3 expressa essa métrica em porcentagem, utilizando os lugares Cap_DCA e Cap_DCB.

$$Cancellation = P\{(\#Cap_DCA = 0) \text{ OR } (\#Cap_DCB = 0)\} \times 100. \quad (3)$$

A vazão do sistema (*vazão*) indica a taxa média de entregas concluídas por unidade de tempo, considerando a contribuição dos dois centros. Ela é calculada da mesma forma nos dois cenários analisados (sem e com compartilhamento), como a soma das taxas associadas aos lugares de missão, normalizadas pelo parâmetro VOO, conforme a Equação 4.

$$Vazão = \left(\frac{E\{\#PA2\}}{VOO} \right) + \left(\frac{E\{\#PB2\}}{VOO} \right). \quad (4)$$

3.4. Validação

A validação é uma etapa essencial em estudos de avaliação de desempenho, pois permite verificar se os resultados obtidos pelo modelo estão alinhados ao comportamento esperado do sistema. Em termos práticos, esse processo consiste em confrontar as saídas do modelo analítico com resultados provenientes de uma fonte independente, como uma simulação, de modo a aumentar a confiabilidade das conclusões [Jain 1990]. Neste trabalho, a validação foi conduzida comparando os valores estimados pelo modelo SPN (Seção 3) com os resultados produzidos por um simulador específico do mesmo cenário operacional, desenvolvido para reproduzir a lógica de chegadas, filas, execução de missões e o mecanismo de compartilhamento de drones, utilizando as mesmas parametrizações do modelo. O simulador está disponível no repositório *Shared-Drone-Delivery-Sim*¹ e foi implementado em Java. A comparação considera dois cenários: *com compartilhamento* e *sem compartilhamento* de drones. A validação foi realizada sobre a métrica de *tempo médio de missão* (TMM), pois ela sintetiza a dinâmica de atendimento ao incorporar tanto o tempo base de operação (coleta + voo) quanto os efeitos de espera associados à formação de filas quando a capacidade local de drones não acompanha a demanda.

A Figura 3 mostra a série temporal do TMM obtida pelo modelo e pelo simulador, para ambos os cenários. Observa-se que, com compartilhamento, os valores permanecem próximos ao tempo base da missão ao longo do horizonte analisado, enquanto, sem compartilhamento, o TMM apresenta oscilações mais acentuadas, associadas à alternância de demanda entre os CDs e ao acúmulo de pacotes quando a frota permanece fixa em cada galpão. De forma geral, as curvas do modelo acompanham as tendências observadas no simulador, preservando o padrão de variação do TMM nos dois cenários.

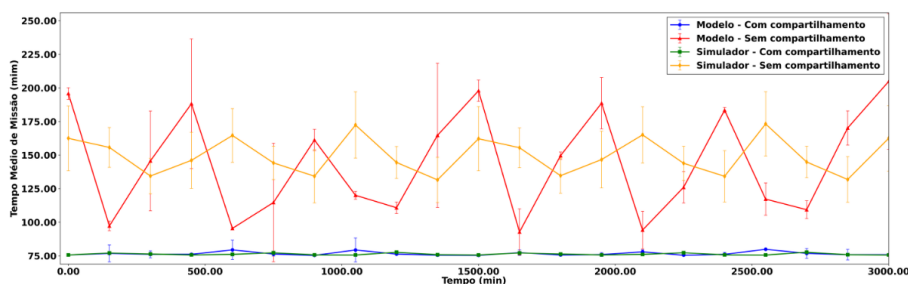


Figura 3. Validação do TMM comparando modelo SPN e simulador, com e sem compartilhamento de drones.

Para quantificar a aderência entre modelo e simulador, aplicou-se o teste t pareado de Student, comparando os valores de TMM obtidos em pares (modelo vs. simulador) sob as mesmas condições experimentais. A Tabela 2 apresenta os resultados do teste para os dois cenários. Em ambos os casos, os *p-values* permaneceram acima de 0,05, indicando que não há evidência estatística de diferença entre as médias estimadas pelo modelo e as observadas no simulador. Além disso, os intervalos de confiança de 95% para a diferença (Modelo–Simulador) contêm o valor zero, reforçando a consistência entre as estimativas. Assim, os resultados sustentam que o modelo SPN representa de forma compatível o comportamento do sistema para o TMM, tanto quando o mecanismo de compartilhamento está habilitado quanto quando a operação ocorre apenas com as frotas locais.

¹<https://gitlab.com/pasid3/shared-drone-delivery-sim>

Tabela 2. Resultados do teste t pareado para validação do TMM.

Cenário	Com compartilhamento	Sem compartilhamento
Número de pares (n)	21	21
Graus de liberdade (df)	20	20
Média (Modelo)	76.6901	144.2298
Média (Simulador)	76.3288	149.7932
Estatística t	-1.0194	0.5721
p -value	0.3202	0.5737
IC 95% da diferença	[-1.1006, 0.3780]	[-14.7233, 25.8501]

4. Estudo de Caso

Este estudo de caso avalia o impacto do compartilhamento de drones entre dois CDs (A e B) em um cenário com alternância de demanda ao longo do tempo. O objetivo é analisar como o deslocamento da demanda entre os CDs influencia a formação de filas, o atendimento das missões e a necessidade de realocação da frota. O estudo busca compreender em que medida o compartilhamento de drones contribui para reduzir picos de congestionamento, equilibrar a utilização dos recursos e evitar cancelamentos de envio quando a demanda se concentra temporariamente em apenas um dos CDs.

4.1. Metodologia

A Tabela 3 resume os parâmetros adotados nas execuções. Ela inclui (i) a capacidade máxima das filas de pacotes (QA e QB), (ii) o número inicial de drones em cada CD (DA e DB), (iii) o tempo de coleta do pacote e início da missão, (iv) o tempo total da missão de voo (ida, entrega e retorno), (v) o tempo de transferência de drones entre os CDs e (vi) a duração de cada fase antes da alternância do modo de entrada (A/B). A alternância de demanda é representada no modelo por um *clock* que alterna o CD ativo por meio de transições determinísticas ($TD1$ e $TD2$): em cada fase, apenas um CD recebe chegadas enquanto o outro permanece sem novas entradas, permitindo reproduzir o deslocamento da pressão de chegada ao longo do tempo.

As análises comparam dois cenários: *sem compartilhamento*, em que a operação ocorre apenas com a frota local de cada CD, e *com compartilhamento*, em que a transferência de drones é habilitada quando há desequilíbrio entre demanda acumulada e disponibilidade de drones. Os resultados apresentados são obtidos a partir do modelo SPN executado no Mercury [Maciel et al. 2017]

Tabela 3. Parâmetros de configuração do cenário de simulação.

Parâmetro	Valor	Descrição
QA, QB	40	Capacidade máxima da fila de pacotes em cada CD.
DA, DB	20	Número inicial de drones disponíveis em cada CD.
TIA, TIB	0.5 (min)	Tempo necessário para o drone coletar o pacote e iniciar a missão.
T2A, T2B	75.0 (min)	Tempo total da missão de voo (ida, entrega e retorno).
T3A, T3B	2.5 (min)	Tempo para transferência de drones entre os CDs.
TD1, TD2	500.0 (min)	Duração de cada fase antes da alternância do modo de entrada (A/B).

4.2. Resultados

Nesta análise, o objetivo é caracterizar o comportamento do sistema ao longo do tempo quando a demanda alterna entre os CDs A e B, conforme definido pelas transições de-

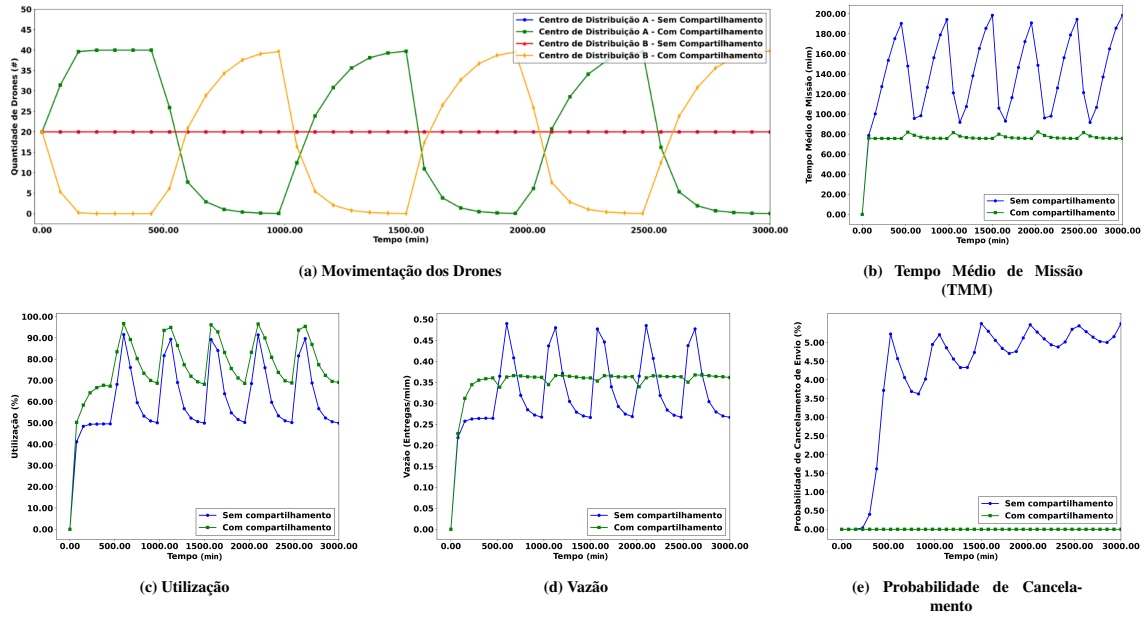


Figura 4. Análise transiente do sistema de entregas.

terminísticas ($TD1$ e $TD2$). Os resultados comparam dois cenários: (i) *sem compartilhamento*, com frota fixa em cada CD, e (ii) *com compartilhamento*, com realocação de drones entre CDs quando há desequilíbrio entre demanda e disponibilidade. As métricas são acompanhadas em uma janela temporal que evidencia o instante de alternância, o período de adaptação da frota e a tendência de estabilização após a realocação.

A Figura 4a apresenta a movimentação da frota entre os CDs A e B. Sem compartilhamento, a alocação permanece constante, com cada CD operando sempre com 20 drones, independentemente da alternância de demanda. Com compartilhamento, a frota se redistribui de forma cíclica ao longo do tempo: quando a demanda se concentra em um CD, o número de drones aumenta nesse local e diminui no outro, invertendo-se na fase seguinte. Esse comportamento indica que o compartilhamento atua como uma realocação dinâmica de capacidade, concentrando drones onde a pressão de atendimento é maior e reduzindo a ociosidade no CD menos demandado.

A Figura 4b apresenta o TMM ao longo do tempo. Sem compartilhamento, o TMM oscila de forma cíclica: em cada fase de concentração de demanda, cresce rapidamente (atingindo valores próximos de 200 min) e reduz após a alternância, devido ao acúmulo de pacotes e ao aumento do tempo de espera com frota fixa (20 drones). Com compartilhamento, o TMM permanece próximo do tempo base da missão, variando em torno de 76–78 min, com pequenos aumentos nas transições de fase. No agregado, o TMM médio caiu de 141.5 min para 76.9 min e o pico de 198.6 min para 82.3 min.

A Figura 4c apresenta a utilização ao longo do tempo. Sem compartilhamento, após o período inicial, a utilização fica em torno de 50% na maior parte de cada fase, pois a demanda se concentra em um CD enquanto o outro permanece parcialmente ocioso; próximo ao fim da fase, ela sobe para picos de 90–92% e reduz após a alternância. Com compartilhamento, a utilização se mantém mais alta e mais estável, com patamares de 69–78% e picos de 96–97%, refletindo a transferência de drones para o CD mais demandado. No agregado, a utilização média aumenta de cerca de 62% para 78%, reduzindo a

ociosidade global.

A Figura 4d mostra a vazão (entregas/min) ao longo do tempo. Sem compartilhamento, a vazão oscila após a fase inicial, alternando entre 0.26–0.30 e picos próximos de 0.49 entregas/min, em função da alternância de demanda e do desbalanceamento de capacidade com frota fixa. Com compartilhamento, a vazão aumenta rapidamente e se mantém mais estável em torno de 0.36–0.37 entregas/min, com pequenas quedas nas transições de fase. No agregado, a vazão média aumenta de 0.331 para 0.356 entregas/min e a variabilidade reduz (0.218–0.490 para 0.228–0.368).

A Figura 4e apresenta a probabilidade de cancelamento de envio ao longo do tempo. Sem compartilhamento, a métrica passa a crescer a partir de $t \approx 225$ min e se estabiliza em regime oscilatório, tipicamente entre 3.63% e 5.51% (média $\approx 4.85\%$ a partir de $t \geq 450$ min). Com compartilhamento, o cancelamento permanece em 0% durante todo o horizonte observado, indicando que a redistribuição de drones evita saturação das filas. As barras de erro refletem a variabilidade das estimativas em cada instante.

5. Conclusão

Este artigo avalia o compartilhamento de drones entre CDs de distribuição sob alternância de demanda por meio de um modelo SPN, focado na análise transiente do atendimento. O modelo representa chegadas, filas com capacidade finita, execução de missões e transferência temporária de drones, sendo analisado por tempo médio de missão (TMM), vazão, utilização e probabilidade de cancelamento de envio. Os resultados indicam que o compartilhamento atua como redistribuição de capacidade, acompanhando a migração da demanda e reduzindo a assimetria entre carga e recursos. No cenário avaliado, o mecanismo manteve o TMM próximo ao tempo base da missão, reduziu oscilações de vazão, elevou a utilização global da frota e evitou perdas por saturação na janela analisada. Como trabalhos futuros, pretende-se: (i) avaliar o caso de uso também em regime estacionário; (ii) realizar análise de sensibilidade para identificar quais componentes têm maior impacto no TMM; e (iii) avaliar um cenário com mais de três galpões, investigando o comportamento do compartilhamento em maior escala.

Referências

- Benarbia, Kyamakya, K. (2021). A literature review of drone-based package delivery logistics systems and their implementation feasibility. *Sustainability*, 14(1):360.
- Bi, Z., Guo, X., Wang, J., Qin, S., and Liu, G. (2024). Truck-drone delivery optimization based on multi-agent reinforcement learning. *Drones*, 8(1):27.
- Bruni, M. E., Khodaparasti, S., and Perboli, G. (2023). Energy efficient uav-based last-mile delivery: A tactical-operational model with shared depots and non-linear energy consumption. *IEEE Access*, 11:18560–18570.
- Dang, S., Liu, Y., Luo, Z., Liu, Z., and Shi, J. (2024). A survey of the routing problem for cooperated trucks and drones. *Drones*, 8(10):550.
- Das, D. N., Sewani, R., Wang, J., and Tiwari, M. K. (2020). Synchronized truck and drone routing in package delivery logistics. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(9):5772–5782.

- Feitosa, L., Barbosa, V., Sabino, A., Lima, L. N., Fé, I., Silva, L. G., Callou, G., Carvalho, J., Leão, E., Nguyen, T. A., et al. (2025). A comprehensive performance evaluation of container migration strategies. *Computing*, 107(2):64.
- Ghelichi, Z., Gentili, M., and Mirchandani, P. (2024). A simulation-based performance evaluation model for decision support on drone location and delivery scheduling. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, 14(3):304–327.
- Girault, C. and Valk, R. (2013). *Petri nets for systems engineering: a guide to modeling, verification, and applications*. Springer Science & Business Media.
- Hana, H. and Kob, Y. D. (2025). Optimal drone delivery scheduling with split deliveries for multiple restaurants using a shared fleet. *Computers & Industrial Engineering*, page 111663.
- Jain, R. (1990). *The art of computer systems performance analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling*. John Wiley & Sons.
- JOUAV (2024). How Much Does A Drone Cost in 2024 Here's a Price Breakdown. <https://www.jouav.com/blog/how-much-does-a-drone--cost.html>. Acessado em: 21 jan. 2026.
- Luo, D., Liang, S., Wang, Y., and Zheng, Y. (2025). Graph-based deep reinforcement learning approach for uav multi-warehouse delivery problem. In *2025 IEEE 14th Data Driven Control and Learning Systems (DDCLS)*, pages 1246–1251. IEEE.
- Maciel, P., Matos, R., Silva, B., Figueiredo, J., Oliveira, D., Fé, I., Maciel, R., and Dantas, J. (2017). Mercury: Performance and dependability evaluation of systems with exponential, expolynomial, and general distributions. In *2017 IEEE 22nd Pacific Rim international symposium on dependable computing (PRDC)*, pages 50–57. IEEE.
- Mirzapour, S. M. J., Hejazi, T.-H., Haghverdizadeh, G., and Shidpour, M. (2024). Optimizing last-mile delivery services: a robust truck-drone cooperation model and hybrid metaheuristic algorithm. *Annals of Operations Research*, pages 1–31.
- Pei, Z., Dai, X., Yuan, Y., Du, R., and Liu, C. (2021). Managing price and fleet size for courier service with shared drones. *Omega*, 104:102482.
- Sawadsitang, S., Niyato, D., Tan, P. S., Wang, P., and Nutanong, S. (2021). Shipper cooperation in stochastic drone delivery: A dynamic bayesian game approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(8):7437–7452.
- Statista Research Department (2026). Global drone delivery market size 2021–2027. Acessado em: 12 jan. 2026.
- Walmart Corporate (2025). Walmart takes flight with drone delivery expansion to five new cities. Acessado em: 12 jan. 2026.
- Wen, J., Wang, F., and Su, Y. (2025). A bi-layer collaborative planning framework for multi-uav delivery tasks in multi-depot urban logistics. *Drones*, 9(7):512.
- Wing (2026). Wing and walmart expand drone delivery coast to coast. Acessado em: 12 jan. 2026.
- Zhang, R., Dou, L., Xin, B., Chen, C., Deng, F., and Chen, J. (2024). A review on the truck and drone cooperative delivery problem. *Unmanned Systems*, 12(05):823–847.