

Cross-docking na distribuição de bebidas: proposta de um modelo de simulação discreta

Cross-docking in beverage distribution: a discrete-event simulation model proposal

Bruno Mendes Cerqueira

Como citar: Mendes Cerqueira, Bruno (2025). *Cross-docking* na distribuição de bebidas: proposta de um modelo de simulação discreta. *Gestão & Produção*, volume(número), elocation, <https://doi.org/...>

Resumo: As atividades de distribuição física, responsáveis por levar os produtos até os clientes, desempenham papel central na geração de receita e na fidelização do consumidor. No setor de bebidas, marcado por alta competitividade e margens reduzidas, estratégias logísticas que promovam eficiência operacional e redução de custos, sem comprometer a qualidade do serviço, tornam-se especialmente relevantes. Nesse contexto, o *cross-docking* se destaca como uma alternativa estratégica, ao reduzir ou eliminar o armazenamento intermediário e transferir os produtos diretamente dos veículos de recebimento para os de expedição. Essa abordagem oferece benefícios como diminuição dos custos de estocagem, redução do tempo de ciclo e maior agilidade no atendimento, embora imponha desafios relacionados à coordenação entre fornecedores e transportadores, integração de sistemas de informação, rigor no controle de tempos e capacidade operacional adequada.

O objetivo deste estudo é propor um modelo de simulação discreta capaz de representar as principais atividades e restrições de operações de *cross-docking* aplicadas ao setor de bebidas. Para tal, foram realizadas entrevistas com gestores da cadeia de suprimentos e desenvolvido um modelo que reproduz diferentes cenários operacionais, incorporando restrições como disponibilidade de produtos, capacidade de docas e veículos, janelas de saída e início das montagens, tempos de rota e manuseio, recursos internos e retorno de ativos. Os resultados demonstram que a simulação, quando ajustada às particularidades do setor, constitui uma ferramenta eficaz para avaliar a viabilidade da estratégia, dimensionar a infraestrutura necessária, definir níveis adequados de equipamentos e orientar decisões estratégicas, como o número de fornecedores e o momento de disponibilização da demanda. Dessa forma, o modelo permite identificar combinações mais eficientes de parâmetros operacionais, contribuindo para a redução de custos e o aumento do desempenho logístico.

Palavras-chave: Distribuição Física; *Just in Time*; Mercado de Bebidas; Simulação; *Cross Docking*;

Abstract: *Physical distribution activities, responsible for delivering products to customers, play a central role in revenue generation and customer loyalty. In the beverage sector, characterized by high competitiveness and narrow margins, logistical strategies that promote operational efficiency and cost reduction—without compromising service quality—become particularly relevant. In this context, cross-docking emerges as a strategic alternative, as it reduces or eliminates intermediate storage by transferring products directly from inbound to outbound vehicles. This approach offers benefits such as lower storage costs, shorter cycle times, and greater agility in customer service, although it also presents challenges related to supplier–carrier coordination, integration of information systems, strict time control, and adequate operational capacity.*

The objective of this study is to propose a discrete-event simulation model capable of representing the main activities and constraints of cross-docking operations applied to the beverage sector. To this end, interviews were conducted with supply chain managers, and a simulation model was developed to reproduce different operational scenarios, incorporating constraints such as product availability, dock and vehicle capacity, outbound windows and start times of loading activities, route and handling times, internal resources, and asset returns. The results demonstrate that simulation, when adjusted to the specific characteristics of the sector, is an effective tool for evaluating the viability of the strategy, sizing the required infrastructure, defining appropriate equipment levels, and supporting strategic decisions—such as the number of suppliers and the timing of demand release. In this way, the model enables the identification of more efficient combinations of operational parameters, contributing to cost reduction and improved logistical performance.

Palavras-chave: *Physical Distribution; Just in Time, Beverage Market; Simulation; Cross Docking*

1 Introdução

A distribuição física é responsável por gerir todas etapas e processos que viabilizam a entrega dos produtos desde sua origem, ao cliente final da companhia. Segundo Bowersox, Closs e Cooper (2006), quando bem administradas, essas atividades possibilitam a geração de receita, redução dos prazos de entrega e custos, além do ganho de market share.

Dentre os diversos ramos produtivos, o setor de bebidas se destaca pela importância dada para a distribuição física de seus produtos. Isso se deve ao elevado número de clientes, que vão desde os pequenos, que requerem abastecimentos frequentes com baixo volume e custo, aos grandes, com menor frequência, mas alto volume por entrega.

Além da alta frequência e pedidos de baixo volume, os clientes pequenos possuem um baixo lead time de atendimento, visto que normalmente fazem pedidos que devem ser atendidos nos próximos dias, comumente no seguinte, estão nos localizados nos centros urbanos e pedem uma alta diversidade de produtos diferentes.

Por conta dessas características, se faz necessário o intermédio de um centro de distribuição avançado para o atendimento desses clientes. Além de oferecerem um melhor nível de serviço, devido a maior proximidade dos clientes, os centros de distribuição avançados possibilitam a consolidação de diferentes *Stock Keeping Units* (SKUs), a montagem de cargas fracionadas em veículos menores, adaptados aos centros urbanos.

Segundo Cervieri (2017), a eficiência no processo de distribuição é uma das principais barreiras que protegem as grandes empresas do setor da competição de com novos entrantes, tanto nacionais quanto internacionais. Portanto, a busca por estratégias que possibilitem uma redução nos custos, sem impactar negativamente o nível de serviço ofertado, é de extrema importância para essas companhias.

Dentre as diversas estratégias que visam aumentar a eficiência da distribuição, Mavi et al. (2020) destacam o *cross-docking* como um modelo capaz de eliminar as atividades de armazenamento e facilitar a separação de pedidos, acelerando o fluxo do ciclo de envio. Já para Apte e Viswanathan (2000) *cross-docking* é capaz de reduzir os custos de transporte sem aumentar estoques, mantendo o nível de serviço ao cliente. Além disso, diminui o tempo do ciclo de pedidos, tornando a rede de distribuição mais flexível e ágil.

O estudo de *cross-dockings* é de grande relevância para o setor produtivo como um todo, uma vez que a aplicação eficaz desses princípios na distribuição de bens, tanto no setor cervejeiro, foco deste estudo, quanto em outros segmentos, pode gerar benefícios expressivos

para as empresas. Entre os principais ganhos esperados, destacam-se: a redução do tamanho dos estoques; a maior facilidade no controle dos ativos presentes no CDA, diminuindo a ocorrência de quebras e descartes por vencimentos; e a redução nos custos para manutenção do CDA, tais como aluguel e energia elétrica.

Já para o meio acadêmico, a realização de estudos com foco na simulação de sistemas produtivos como o *cross-docking* oferece diversas contribuições. Primeiramente, permite aprofundar o conhecimento sobre a representação de sistemas logísticos complexos via modelagem, promovendo a compreensão dos processos sem a obrigatoriedade de investimentos prévios. Além disso, facilita o levantamento de fatores críticos de sucesso, bem como a identificação de vantagens e desvantagens inerentes à adoção da estratégia

Este artigo tem como objetivo geral propor um modelo de simulação discreta, que consiga representar um CDA, operando na estratégia de *cross-docking*, adaptado às particularidades da distribuição física do setor de bebidas. Para atingir esse objetivo foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar, por meio de entrevistas com profissionais da área, as principais características específicas de um CDA que atua na distribuição de bebidas, e devem estar presentes em um modelo que se proponha a avaliá-lo.
- Modelar o *cross-docking* utilizando um software de simulação discreta, permitindo a análise do comportamento da estratégia em diferentes cenários que alterem suas restrições principais. Para isso foi selecionado um CDA regular da companhia, e sua operação adaptada à estratégia de *cross-docking*, levando em conta suas características e restrições.
- Criar cenários modificando os horários em que a demanda do dia é definida, antecipando-a ou postergando-a, o que interfere no horário de início do carregamento de bebidas a serem despachadas ao CDA. Essa análise possibilita verificar de que forma diferentes programações logísticas podem influenciar a eficiência operacional.
- Criar cenários do aumento da quantidade de docas de descarregamento no CDA, de modo a mensurar a relação entre a disponibilidade de infraestrutura e seu impacto no tempo de atravessamento e nível de serviço.
- Desenvolver cenários com número reduzido de fornecedores, de forma a avaliar o impacto que consolidar o fornecimento do CDA em um menor número de fábricas pode promover.

- Por fim, avaliar um cenário misto, que combina a redução do número de fornecedores com o aumento do número de docas, a fim de estimar o impacto dessas mudanças em indicadores escolhidos.

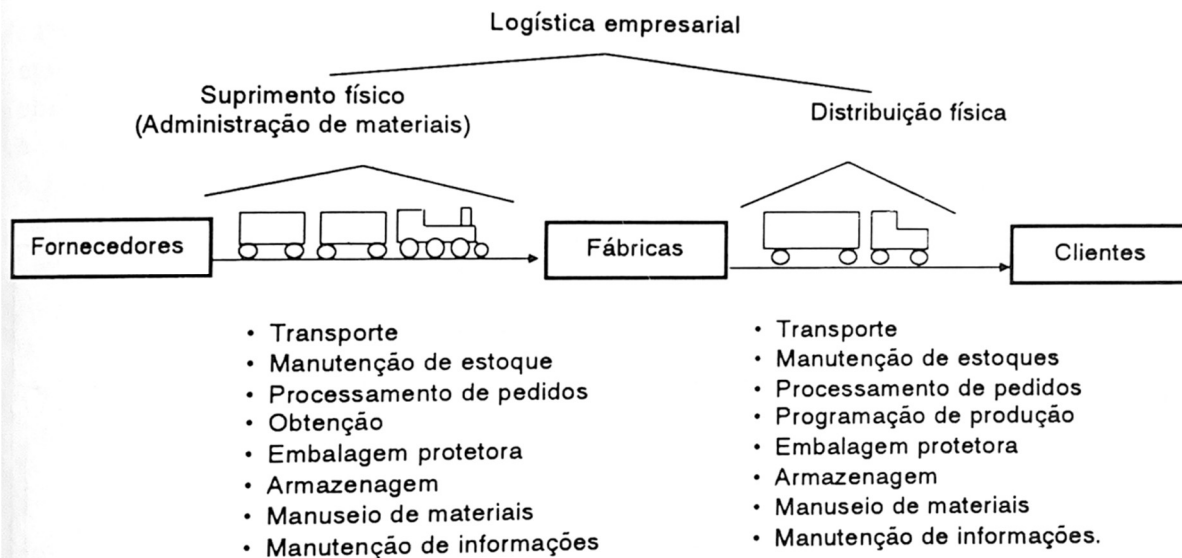
A modelagem da operação de *cross-docking*, foi conduzida utilizando como base dados de uma empresa do setor de bebidas localizada no estado de São Paulo, complementados por questionários e entrevistas com gestores da companhia, com experiência em gestão e abastecimento de CDAs.

2 Revisão da Literatura

A revisão da literatura aborda os principais conceitos e definições relacionados a: distribuição física, suas características, importância, classificações e indicadores; centros de distribuição avançados e *cross-docking*, abrangendo definições, aplicações recomendadas, desafios de implementação, vantagens e layouts mais indicados; além de estudos de caso sobre a aplicação de simulação em operações de *cross-docking*.

2.1 Distribuição Física

Para Ballou (1995) o processo logístico de uma companhia possui 3 atividades primárias, sendo elas: transporte, manutenção de estoques e processamento de pedidos. Além disso, outras 6 atividades de apoio são pontuadas, sendo elas: armazenagem, manuseio de materiais, embalagem de proteção, obtenção, programação de produtos e manutenção de informação. Como evidenciado na figura 1, desenvolvida pelo autor citado, essas diversas atividades primárias e secundárias se combinam e inter-relacionam, de forma que é possível interpretar o processo logístico como a integração de dois de seus escopos de atuação, a administração de matérias, também chamada de suprimento físico, e a distribuição física.



Fonte: Ballou (1995)

Figura 1 - Escopo da logística empresarial

A parte esquerda da figura destaca as atividades voltadas para a administração de materiais, que tem como objetivo adquirir e gerir, de forma mais eficiente possível, os materiais que serão utilizados na companhia. Já a parte direita é dedicada às atividades da distribuição física, que administra os processos responsáveis pela entrega dos bens aos clientes.

Para Novaes (2007, p.123): “Os especialistas em logística denominam distribuição física de produtos ou resumidamente distribuição física os processos operacionais e de controle que permitem transferir os produtos desde o ponto de fabricação até o ponto em que a mercadoria é finalmente entregue ao consumidor”.

Portanto, a gestão da distribuição física requer a gestão eficiente e integrada das atividades de transporte, manutenção de inventário e informações, processamento de pedido, empacotamento, armazenagem e sequenciamento de entregas, a fim de garantir a entrega dos produtos finais aos clientes, provendo o nível de serviço esperado, a um custo atrativo para a companhia.

Novaes (2007) apresenta duas formas de caracterizar um sistema de distribuição física: a primeira forma trata sobre os modais de veículos utilizados pela empresa, e a segunda forma refere-se ao número de entregas, que basicamente diferencia os sistemas que realizam entregas de cargas fechadas de grandes volumes para um único cliente, dos sistemas que se valem de cargas fracionadas, que serão entregues a diversos clientes.

Já Ballou (1995) apresenta três formas básicas de classificar a configuração estratégica da distribuição física de uma companhia, sendo elas: (1) entrega direta a partir de estoques de

fábrica, (2) entrega direta a partir de vendedores ou da linha de produção e (3) entrega feita utilizando um sistema de depósitos.

Segundo Bowersox e Closs (2001), a importância da distribuição física é resultado de sua relação próxima com 3 fatores fundamentais do serviço ao cliente: a disponibilidade, o desempenho e a confiabilidade. Para Almeida e Marcondes (2014, p.5), esses fatores podem ser traduzidos, no contexto da distribuição física, como: “A disponibilidade refere-se à capacidade de ter o produto em estoque no momento em que ele é desejado pelo cliente. O desempenho operacional diz respeito ao ciclo de atividades quanto a velocidade, consistência, flexibilidade e recuperação de falhas. A confiabilidade concerne à qualidade, isto é, determina a capacidade de manter níveis de disponibilidade de estoque e desempenho operacional planejado.”

Portanto, segundo Shyncon e Krenn (1983), a distribuição física pode levar a um aumento das vendas e da participação de mercado e, finalmente, a uma crescente contribuição para os lucros. Ou seja, a capacidade de uma empresa de entregar produtos de forma rápida e eficiente tem um impacto direto em sua competitividade no mercado, destacando-se em um ambiente cada vez mais exigente. Empresas que conseguem oferecer entregas rápidas e de alta qualidade ganham vantagem, atraindo consumidores e construindo uma base fiel.

Para que a empresa maximize os benefícios da distribuição física, é fundamental estabelecer uma série de indicadores de desempenho. Maric, Đuranovic e Nuseva (2017) identificaram os principais grupos de indicadores utilizados pelas empresas, que incluem: custo de transporte, com métricas como custo total de transporte, custo por quilômetro percorrido, gastos com manutenções e seguros, quilometragem por litro de combustível e custo de processamento; qualidade das entregas, avaliando indicadores como número de devoluções, *OTIF (On Time In Full)*, pontualidade (*On Time*), *lead time* de entrega e utilização da capacidade do veículo; condição da frota, que engloba fatores como manutenção e reparos dos veículos, idade da frota, defeitos nos veículos e investimentos em novos veículos; e, por fim, relacionamento com os clientes, medido por indicadores como *Net Promoter Score (NPS)*, porcentagem de clientes fidelizados e número de vendas perdidas devido a atrasos e rupturas.

Rodrigues e Colmero (2009) diagnosticaram que uma das principais características do mercado de bebidas é a multiplicidade de níveis que sua cadeia pode assumir, em decorrência da diversidade de perfis de clientes atendidos. Grandes clientes, como distribuidores terceirizados, atacadistas e redes varejistas de grande porte, são usualmente abastecidos por cargas fechadas, permitindo um atendimento direto a partir da fábrica. Por se tratarem de contas

estratégicas, esses clientes apresentam um nível elevado de colaboração com a empresa, o que facilita a previsão da demanda e possibilita *lead times* de entrega mais flexíveis.

Por outro lado, clientes de pequeno e médio porte possuem uma relação menos estreita com os fornecedores, o que torna o processo de previsão de demanda mais desafiador. Além disso, a limitação de espaço para armazenamento exige entregas mais frequentes, com prazos reduzidos e volumes menores, de *SKUs (Stock Keeping Units)* diversificados. Essas particularidades geralmente demandam a intermediação de um Centro de Distribuição Avançado (CDA), adicionando um nível à estrutura logística da distribuição.

No estudo de Silva Filho (2012), o funcionamento de um centro de distribuição e armazenagem no setor de bebidas é detalhado, destacando características específicas desse segmento. Entre os aspectos mais relevantes, ressalta-se a ampla variedade de SKUs, os riscos de avarias e a necessidade de gerenciamento de prazos de validade. Além disso, é importante destacar a presença de operações de logística reversa que podem abranger tanto a devolução de produtos por problemas durante a entrega, quanto o retorno de vasilhames e garrafas, que estavam armazenados nos clientes. Esses aspectos são fundamentais para a eficiência operacional e a sustentabilidade da cadeia de suprimentos no setor.

2.2 Centros de Distribuição Avançada e *Cross-Docking*

Lacerda (2011) caracteriza os CDAs pela proximidade com os clientes, o que possibilita um atendimento mais ágil e proporciona economias significativas no transporte. Esses centros atuam como consolidadores de carga, permitindo o recebimento de grandes carregamentos ao invés de atender diretamente os clientes a partir da fábrica ou de armazéns centrais, o que resultaria no transporte de cargas fracionadas por longas distâncias. Como resultado, os custos de transporte são reduzidos, e a distribuição final ao cliente ocorre em cargas fracionadas, porém em trajetos de curta distância.

Bujis, Danhof e Wortmann (2016) destacam que, nos centros de distribuição tradicionais, os produtos são armazenados para amortecer a variabilidade da demanda e permitir a consolidação para o transporte, com os níveis de estoque controlados com base em previsões de demanda. Assim, setores com demanda pouco previsível tendem a manter estoques elevados nos CDAs, a fim de evitar rupturas e garantir o nível de serviço desejado.

Entretanto, Novaes, Takebayashi e Briesemeister (2015) apontam que a parcela dos CDAs que opera sob o sistema de *cross-docking* busca minimizar a formação de estoques. Nesse contexto, Van Belle (2012, p.2) define o *cross-docking* como: “processo de consolidação

de cargas com o mesmo destino, que podem ser provenientes de várias origens, com manuseio mínimo e com pouco ou nenhum armazenamento entre o descarregamento e o carregamento das mercadorias.” Além disso, o autor afirma que em caso de ocorrência de estoques, este não deve permanecer mais de 24h nas instalações da companhia.

Novaes, Takebayashi e Briesemeister (2015, p. 3), detalharam o funcionamento de um armazém *cross-docking* através dos seguintes passos: “...um veículo do primeiro tipo chega ao terminal e não há fila de espera, é direcionado a uma posição na doca de recepção, onde é imediatamente descarregado. As peças que formam o lote são verificadas de forma a identificar seus destinos, representados usualmente por zonas ou distritos de entrega. As unidades assim identificadas são triadas e transferidas para os veículos de distribuição local, para serem imediatamente deslocados para os diversos pontos de entrega.”

Apte e Viswanathan (2000) identificaram os fatores que influenciam a operação do *cross-docking*, concluindo que sua implementação é mais viável em mercados de demanda estável. Além disso, devido à maior suscetibilidade a rupturas, esse sistema é mais eficiente em mercados cujos produtos possuem baixo valor unitário, uma vez que a perda de vendas de um SKU específico tem impacto reduzido.

Já Mavi et al. (2020) destacam diversas vantagens do *cross-docking*, incluindo a redução dos custos de armazenagem, manutenção de estoques, manuseio, mão de obra e transporte. Além disso, a estratégia contribui para a diminuição do tempo de entrega, da necessidade de espaço de armazenagem e dos riscos de avaria e obsolescência dos produtos. Outros benefícios incluem a consolidação de remessas, melhor utilização de recursos, controle aprimorado sobre prazos de entrega, redução de excesso de estoque, aumento do fluxo de inventário e maior giro de vendas, resultando em um nível de serviço mais elevado.

Zaluga (2016) analisa o *cross-docking* sob a ótica da logística reversa, demonstrando sua aplicabilidade nesse contexto e propondo um modelo de programação linear correspondente. Os resultados do estudo indicam que a utilização do *cross-docking* na logística reversa pode aumentar a eficiência operacional, promovendo a redução de custos, a otimização do tempo e a melhoria na gestão da informação nos processos de devolução.

2.3 Simulação de sistemas de distribuição física via *cross-docking*

Rohrer (1995) destaca a simulação como uma ferramenta fundamental no planejamento da implementação do *cross-docking*, pois, além de permitir a avaliação da viabilidade do sistema com alto grau de confiança, proporciona aos membros da equipe do projeto uma

compreensão mais clara das operações atuais e futuras. Schunk e Plot (2000) reforçam essa perspectiva, argumentando que a simulação é uma das ferramentas mais eficazes para analisar e gerenciar a dinâmica complexa das cadeias de suprimentos.

Magableh, Mason e Rossetti (2005) apresentam um modelo genérico de simulação de operações de *cross-docking*, com foco na consolidação de cargas provenientes de múltiplos fornecedores e destinadas a centros de distribuição. A análise de cenários com aumento de demanda revelou um crescimento na utilização das docas e baias, além da redução no tempo de espera dos veículos responsáveis pelo transporte das cargas consolidadas. Esse último efeito decorre de uma restrição do modelo, que estabelece uma taxa mínima de ocupação, ou um tempo máximo de espera, para a liberação dos caminhões. Os resultados sugerem que a priorização da eficiência dos veículos *outbound* pode impactar negativamente o nível de serviço oferecido.

Arnout et al. (2010) propõem um modelo de simulação por eventos discretos para operações de *cross-docking* em uma em uma cadeia de suprimentos composta por cinco clientes, cujas demandas podem ser atendidas diretamente por três armazéns ou, quando o volume não é suficiente para preencher uma carreta, por meio da intermediação de *cross-docking*. Os cenários demonstram que a adoção do *cross-docking* pode melhorar os níveis de serviço, desde que um fator de segurança adequado seja definido. O fator de segurança corresponde ao tempo máximo que uma carreta pode aguardar no *cross-docking* antes de partir para o cliente.

Bujis, Danhof e Wortmann (2016) conduziram um estudo de caso detalhado que explora uma abordagem holística para o gerenciamento de operações de *cross-docking* para distribuição no varejo. Para isso, desenvolveram um modelo de simulação por eventos discretos, representando a cadeia logística de uma grande varejista de alimentos nos Países Baixos. O modelo proposto permitiu a avaliação do impacto de dois cenários: a implementação de uma nova política de atribuição de docas e a realocação das atividades preparatórias de *cross-docking*. Além disso, a simulação auxiliou na definição de indicadores-chave de desempenho (KPIs) capazes de refletir variações no desempenho do sistema de *cross-docking*.

Navim, Nithin e Ajimshad (2015) desenvolveram um estudo de simulação, com o objetivo de analisar o desempenho de uma rede de distribuição composta por três armazéns, cinco clientes finais e, inicialmente, um Centro de Distribuição (CD). Após a validação do modelo, os autores propuseram 24 cenários distintos, nos quais variaram parâmetros como o número e o porte dos veículos, a quantidade de centros de distribuição e as regras de expedição.

Para a avaliação dos resultados, foram adotados como indicadores de desempenho a taxa de utilização dos veículos, o nível de serviço, o *lead time* e o índice de atendimento da demanda.

3 Metodologia

3.1 Caracterização Metodológica

A classificação da pesquisa seguiu a abordagem clássica abordada por Turrioni e Mello (2000), que caracteriza os estudos com base em sua natureza, objetivos, abordagem e métodos.

Com relação à natureza, esta pesquisa pode ser classificada como aplicada, uma vez que seus resultados possuem aplicação direta na solução de problemas reais do setor.

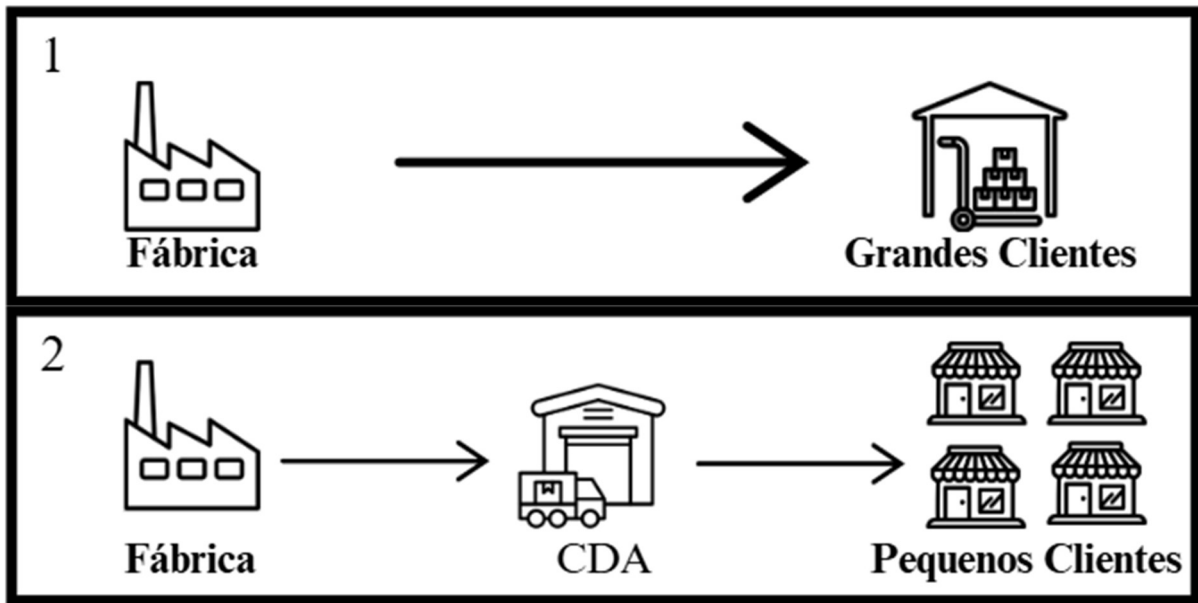
O objetivo do estudo enquadra-se na categoria exploratória, pois, conforme Turrioni e Mello (2000, p. 81), esse tipo de pesquisa “visa proporcionar maior familiaridade com o problema com vistas a torná-lo explícito ou a construir hipóteses”.

Quanto aos métodos utilizados, foram aplicados entrevistas e questionários para a coleta de dados e, posteriormente, validação do modelo e seus resultados, enquanto a simulação discreta foi empregada para a modelagem e representação do sistema de distribuição proposto.

A abordagem adotada é combinada (quanti-quali), pois integra elementos qualitativos, como entrevistas e questionários, e elementos quantitativos, por meio da simulação. Segundo Cauchick-Miguel (2010), essa abordagem apresenta diversas vantagens, incluindo: compensação das limitações inerentes a cada método, ampliação das evidências disponíveis para a pesquisa, solução de questões que uma única abordagem não poderia responder e estímulo à colaboração entre pesquisadores de diferentes áreas metodológicas.

3.2 Descrição do objeto de estudo

A organização estudada, pertencente ao setor de bebidas, atua na produção de bebidas alcoólicas, especificamente cerveja, e não alcoólicas como sucos, refrigerantes e água. Com unidades produtivas e centros de distribuição estrategicamente localizados em diferentes regiões do país, enfrenta desafios inerentes à logística em um território de grande extensão e diversidade geográfica. Conforme ilustrado na Figura 2, a distribuição física da empresa analisada ocorre por meio de dois canais distintos.



Fonte: elaboração própria

Figura 2 - Canais de distribuição

O primeiro canal, denominado distribuição primária, destina-se a clientes cujo volume de compras viabiliza o atendimento por caminhões de cargas completas, como grandes redes atacadistas e distribuidores. Devido a essa característica, esses clientes são abastecidos diretamente pelas fábricas.

Já o segundo canal, foco deste estudo, é utilizado para o atendimento de clientes de menor porte, como bares, adegas e restaurantes. Devido ao baixo volume de pedidos, não é possível realizar a entrega diretamente da fábrica, pois não se forma uma carga completa. Assim, torna-se necessário o uso de um centro de distribuição avançado (CDA), onde diferentes *SKUs* são consolidados para compor cargas destinadas a múltiplos clientes dentro de uma mesma rota, em veículos de menor porte, mais indicados para perímetros urbanos. Esse canal é denominado distribuição secundária.

O Centro de Distribuição Avançada (CDA) escolhido como objeto de estudo está localizado na cidade de Sumaré, sendo majoritariamente abastecido por quatro fábricas situadas em Ponta Grossa, Itu, Araraquara e Jacareí. Atualmente este CDA não se trata de um *cross-docking*, visto que se utiliza de estoque para atendimento de seus clientes, por conta disso sua operação foi adaptada às condições do *cross-docking*, considerando as seguintes restrições iniciais:

A **demand**a dos clientes só é **disponibilizada** ao CDA, e seus fornecedores, uma hora da manhã. Essa restrição é importante pois impacta diretamente no início da montagem das

cargas nos fornecedores, além de possibilitar avaliar como a agilidade na consolidação da demanda pode impactar nos resultados.

Após o disparo da demanda, as fábricas iniciam o carregamento dos caminhões que atenderão o CDA. Esse **carregamento** foi modelado através de um tempo fixo por caminhão acrescido de um tempo variável, de acordo com o número de pallets carregados. Além disso, o carregamento é realizado em **docas disponíveis na origem**, no modelo foram disponibilizadas duas docas em todas as origens (número inferior ao real, escolhido já que seria inviável considerar que demanda do CDA pudesse ocupar todas as docas)

Como a etapa de produção não faz parte do escopo deste estudo, a capacidade produtiva dessas fábricas foram desconsideradas. Para viabilizar a simulação, assumiu-se que cada fábrica dispõe de estoques suficientemente elevados para despacho dos **produtos de seu portfólio**. Nessas condições, e pela ausência de restrições de capacidade, o software passou a priorizar o atendimento da demanda do CDA a partir da fábrica mais próxima, mesmo quando o determinado produto estivesse disponível em duas ou mais origens.

O transporte entre fábricas e CDA é realizado por **caminhões com capacidade de 26** pallets. Ressalta-se que a taxa de ocupação de cada pallet varia conforme o tipo de embalagem: produtos envasados em latas, por exemplo, permitem maior aproveitamento do espaço em comparação a garrafas ou barris, devido às suas características físicas.

Ao chegar no CDA os caminhões *inbound*, devem ser descarregados em **uma única doca disponibilizada**. O processo de **descarregamento** também é composto por um tempo fixo e outro variável, de acordo com o número de pallets. Feito o descarregamento esses **caminhões devem retornar** às suas fábricas de origem, levando os ativos retornantes, como vasilhames e garrafas.

Após descarregados, os pallets devem ser transportados até a área de picking. No modelo esse processo é realizado por 4 **empilhadeiras, com capacidades para um pallet cada**. Elas possuem um tempo **fixo para manuseio inicial do pallet, se movem a 2 km/h**, e devem atravessar uma **distância de 10 metros** até o local de picking, onde auxiliarão na montagem dos caminhões outbound, o que requer o **novo tempo fixo de manuseio**.

Devido os diferentes perfis de clientes, foram modeladas diferentes **janelas de saída** para os caminhões outbound: manhã (08h30), tarde (14h00) e noite (19h00). Os horários apresentados correspondem às janelas de partida dos caminhões outbound. No modelo a janela matutina concentra aproximadamente 64% da demanda diária, ao passo que a janela vespertina representa cerca de 27% e a janela noturna 9%.

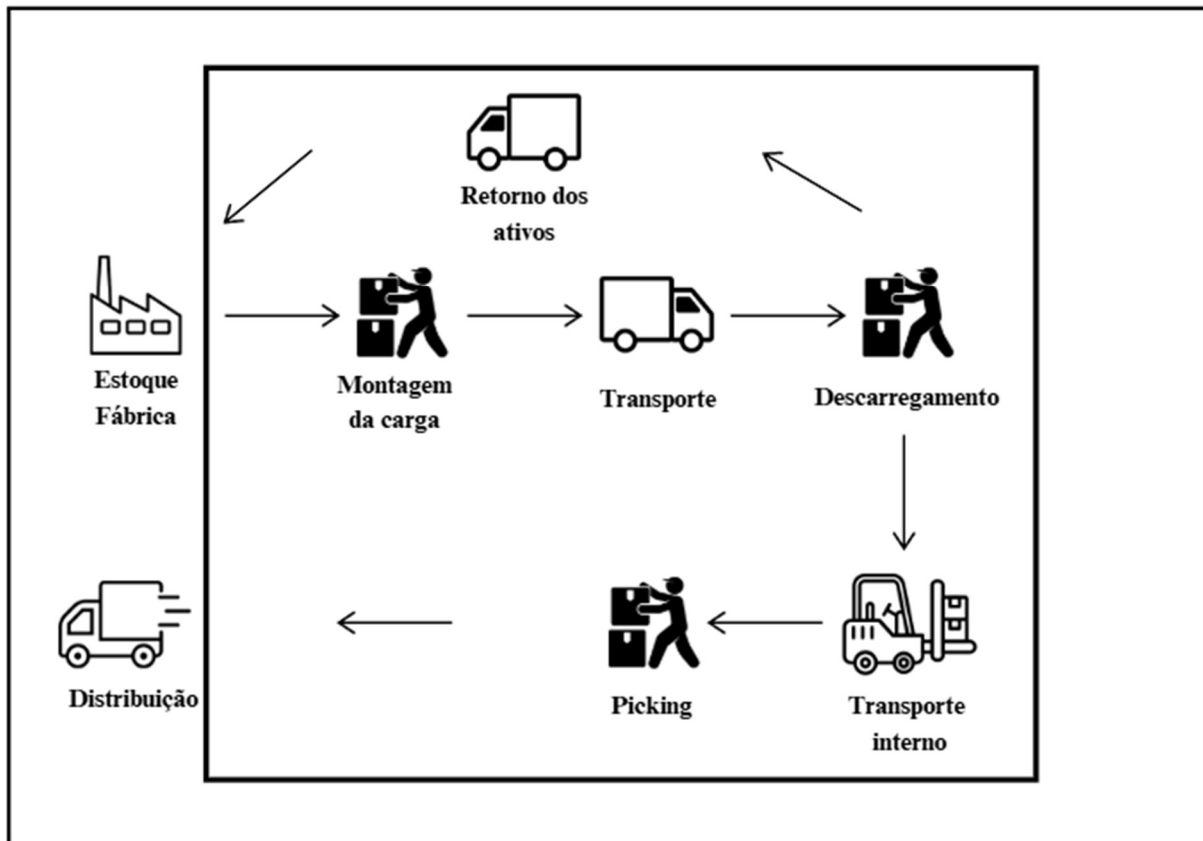
Essa restrição é fundamental para avaliar o desempenho do *cross-docking* em relação ao nível de serviço prestado e para compreender como sua implementação, aliada às demais restrições estratégicas e operacionais, pode afetar o atendimento ao cliente final. Isso ocorre porque todas as entregas só podem ser despachadas quando o veículo estiver completamente carregado com o volume total previsto para a rota, uma vez que os clientes devem receber integralmente a quantidade demandada. Além disso, esse atendimento deve ocorrer exclusivamente dentro de uma única janela de entrega.

Por fim, a simulação abrangeu um horizonte de três meses, escolhidos de forma a representar **diferentes níveis de demanda**: baixa, média e alta. Essa variação permitiu avaliar o comportamento do sistema nos extremos e em um cenário intermediário. A demanda foi configurada como elemento central da modelagem, especialmente no CDA, que foi configurado como site *demand flow*, indicando ao software que a demanda dos seus clientes deve ser puxada dos fornecedores, e não atendida pelo estoque.

De forma geral, o modelo possibilitou representar as restrições de momento de disparo da demanda, disponibilidade de produto nas fábricas, números de docas nas fábricas e CDA, capacidade dos caminhões inbound, tempo de rota a depender da origem, tempos de carregamento/descarregamento, distância de atravessamento interna, número de empilhadeiras disponíveis, tempo de manuseio e velocidade de transporte das empilhadeiras, janelas de saída e volume demandado.

3.3 Descrição de procedimentos

Para a construção do modelo, seguiram-se quatro etapas principais. Primeiro, coletaram-se os dados quantitativos necessários por meio de consultas ao banco de dados da companhia. Em seguida, elaborou-se uma modelagem preliminar do sistema proposto no software Supply Chain Guru X. A terceira etapa consistiu na obtenção de informações adicionais junto aos gestores da área, permitindo ajustar e refinar a estrutura inicial. Por fim, foi desenvolvida a modelagem final, a qual passou por processos de verificação e validação para assegurar sua consistência com a operação real. Com essas informações foi possível representar as seguintes atividades do *cross-docking* proposto, conforme figura 3.



Fonte: elaboração própria

Figura 3 – Escopo de atividades simuladas

Como visto na figura acima, o atendimento do cliente está fora do escopo das atividades simuladas, visto que esse processo não é impactado pelo *cross-docking*, contanto que as janelas de saídas sejam respeitadas.

Após validar o cenário padrão com o auxílio dos gestores, foram propostos os seguintes cenários alternativos, com o objetivo de entender como as restrições modeladas impactam nos resultados:

No **primeiro cenário**, foram realizadas variações no momento de disponibilização da demanda diária, o primeiro caso representa um cenário otimista, em que a demanda passa a ser disponibilizada às 00:00, já o segundo representa um cenário comum em momentos de pico, em que vendas são realizadas até a virada do dia, com a consolidação sendo realizada somente 02:30h. Essa abordagem permitiu mensurar os impactos das alterações temporais sobre o fluxo operacional, a utilização dos recursos e o balanceamento das atividades de recebimento e expedição. O objetivo foi identificar em que medida a sincronização entre a chegada das cargas e o processamento interno afeta a eficiência global do sistema.

O **segundo cenário** envolveu o aumento do número de docas de descarregamento disponíveis no centro de distribuição. Na primeira versão, foi adicionado uma doca e quatro empilhadeiras ao CDA, já na segunda, foram acrescentadas 3 docas e 12 empilhadeiras. Essa modificação buscou analisar a influência da capacidade de infraestrutura sobre o desempenho operacional, especialmente em termos de tempo de atravessamento das cargas, nível de congestionamento interno e taxa de utilização dos recursos, além de possibilitar avaliar o desempenho do *cross-docking* livre de restrições de descarga. Dessa forma, foi possível avaliar a relação direta entre investimentos em infraestrutura física e a melhoria dos indicadores de serviço e produtividade.

No **terceiro cenário**, a disponibilidade de produtos das fabricas foram alteradas, o que possibilitou alterar quais fábricas atendem o CDA. Essa configuração teve como objetivo investigar os efeitos da consolidação em um menor número de origens, bem como da redução da distância entre o CDA e seus fornecedores. Para isso, na primeira versão, os produtos fornecidos por Ponta Grossa, passaram a ser atendidos por Jacareí. Já na segunda, todo volume passou a ser atendido através de um HUB localizado em Caçapava.

Por fim, o **quarto cenário** consistiu em uma configuração combinada, que integrou simultaneamente a redução do número de fornecedores e o aumento do número de docas de descarregamento. Esse cenário misto foi concebido para analisar o efeito conjunto das modificações estruturais e estratégicas, possibilitando avaliar sinergias ou compensações entre os fatores analisados e seu impacto global sobre os indicadores.

3.4 Forma de coleta de dados e análise de resultados

Os dados quantitativos utilizados na elaboração do modelo, como tempo de descarregamento, percentual de quebras e tempo médio das rotas, foram extraídos dos bancos de dados da empresa, que utiliza o software SAP. Já as informações qualitativas do processo, incluindo características específicas da distribuição, ordem das atividades e percepção sobre a estratégia, foram obtidas por meio de entrevistas com 3 colaboradores, listados no Quadro 1, cujas perguntas e respostas são detalhadas no APENDICE A.

Quadro 1 – Perfil dos gestores entrevistados

Entrevistado	Experiência	Função
A	<ul style="list-style-type: none"> • 6 anos como especialista em <i>network design</i> (atual) • 4 anos como gerente logístico • 2 anos como engenheiro industrial 	Especialista de Network Design - Responsável pela modelagem da malha logística da primária, plano estratégico (longo prazo) de <i>supplychain</i> , desenvolvimento técnico da equipe e suporte ao plano tático (médio prazo).
B	<ul style="list-style-type: none"> • 2 anos como gerente de planejamento de distribuição (atual) • 7 anos como coordenadora de planejamento logístico • 4 anos como analista logístico 	Gerente DRP - Responsável pelo gerenciamento e planejamento do abastecimento dos CDAs, garantindo que as políticas de estoque sejam respeitadas ao menor custo possível
C	<ul style="list-style-type: none"> • 3 anos como gerente de CDA (atual) • 3 anos como coordenador de desenvolvimento comercial • 11 anos como analista logístico 	Gerente de CDA – Principal tomador de decisão da operação, é responsável por auxiliar as equipes de distribuição, armazenamento e apoio a atuarem conforme as diretrizes da companhia

Fonte: elaboração própria

Além de validar os parâmetros utilizados, as entrevistas tiveram o objetivo de captar a visão prévia desses colaboradores em relação ao *cross-docking*, aplicado à logística secundária do setor; analisar os resultados encontrados; e trazer conclusões quanto a sua viabilidade da utilização.

Por fim, em consonância com os resultados de Radenko e Dragan (2017), as seguintes métricas e indicadores foram utilizados para avaliar os diferentes cenários e seus respectivos resultados: número médio de veículos utilizados por dia; média diária de distância percorrida, considerando o retorno dos caminhões inbound (em quilômetros); taxa de ocupação dos veículos inbound (em porcentagem); média de estoques diários dos produtos retornantes (em pallets); taxa de expedição correta, medido pela porcentagem de hectolitros expedidos dentro do horário previsto; tempo de atravessamento médio e máximo dos produtos, do início da descarga até a alocação dos produtos no *truck* de *outbound* (em minutos); e emissão média de CO₂ (em toneladas), calculada utilizando o fator 57 g CO₂/t-km, indicados por Ragon e Rodriguez (2021), para carretas de reboque em longas distâncias.

4 Resultados

Após a validação final realizada junto ao gestor (C) do Centro de Distribuição Avançada (CDA), foi possível consolidar um modelo padrão, capaz de representar o funcionamento da

adaptação do CDA, sob a lógica do *cross-docking*, considerando suas limitações operacionais e necessidades específicas. Esse modelo, denominado cenário padrão, foi adotado como referência para a comparação com os demais cenários simulados.

4.1 Cenário padrão

Este cenário busca representar de forma aproximada as restrições físicas, operacionais e técnicas, citadas anteriormente, do CDA escolhido. Sendo elas, de forma resumida: atendimento a partir das quatro fábricas, cada uma contando com duas docas; demanda disponibilizada as 1h da manhã e uma doca e quatro empilhadeiras no CDA.

A Tabela 1 apresenta as médias dos indicadores consolidados ao longo dos três meses simulados, enquanto a Tabela 2 detalha esses mesmos indicadores para três dias específicos: o de menor demanda, o correspondente à média e o de maior demanda.

Tabela 1 – Resultados do cenário por mês – cenário padrão

Dia	Emissão média (t)	Ocupação média (%)	Expedição correta (%)	Média de veículos (unidades)	Estoque médio (pallets)	Atravess^{to} médio (min)	Distância média (km)
Baixa	12,82	74%	89%	5,82	59,74	76,54	2.514
Média	17,09	75%	88%	7,67	79,66	84,98	3.371
Alta	23,79	80%	75%	9,95	110,90	122,04	4.329
Total	17,87	77%	83%	7,81	83,32	94,24	3.404

Fonte: elaboração própria

Tabela 2 – Resultados do cenário padrão por dia – cenário padrão

Dia	Emissão média (t)	Ocupação média (%)	Expedição correta (%)	Média de veículos (unidades)	Estoque médio (pallets)	Atravess^{to} médio (min)	Distância média (km)
Baixa	6,33	43%	89%	5,00	29,46	56,11	2.184
Média	18,27	68%	90%	9,00	85,16	85,72	4.036
Alta	40,47	85%	56%	16,00	188,66	254,45	6.864

Fonte: elaboração própria

Os resultados corroboram a análise de Magableh, Mason e Rossetti (2005), evidenciando que o aumento da demanda tem como consequência direta o maior número de caminhões utilizados e à maior distância total percorrida, intensificada ao considerarmos as distancias de retorno. Esses fatores, resultam em elevação significativa das emissões de CO₂ em períodos de maior demanda.

Outro aspecto relevante do retorno de ativos diz respeito ao volume de pallets armazenados no dia de pico, o que evidencia a necessidade de dimensionar a operação de *cross-docking* para comportar, no mínimo, essa quantidade, o que poderia causar ociosidade nos demais períodos. Esse volume, composto por vasilhames e produtos retornados dos clientes, permanece estocado até o dia seguinte, quando é reenviado às respectivas fábricas de origem.

Por fim, observou-se que a taxa de expedição correta apresenta melhor desempenho em períodos de menor demanda, o que pode ser explicado pela menor quantidade de movimentações, filas e, conseqüentemente, maior utilização das equipes de carregamento e transporte. Entretanto, mesmo no dia de menor movimentação, não foi possível atender integralmente a demanda dentro das janelas de tempo estabelecidas, evidenciando a existência de limitações estruturais, e não somente falta de capacidade do CDA.

Com o objetivo de compreender as causas da baixa taxa de expedição correta observada, foi elaborada a Tabela 3, que apresenta as distâncias entre cada fábrica e o CDA, bem como o desempenho do nível de serviço registrado no mês de baixa demanda. Essa análise permite relacionar a localização das unidades produtivas com as restrições operacionais do sistema, possibilitando a identificação dos principais fatores que impactam o cumprimento dos prazos de entrega.

Tabela 3 – Nível de Serviço por origem

Mês	Distância (km)	Tempo da rota (min)	Expedição correta (%)
Araraquara	161	129	100%
Itu	75	60	100%
Jacareí	166	133	100%
Ponta Grossa	529	423	37%

Fonte: elaboração própria

A análise dos resultados apresentados na Tabela 3 revela que os atrasos observados estão fortemente relacionados ao fluxo logístico proveniente da fábrica de Ponta Grossa. Apesar de o tempo de percurso entre a origem e o Centro de Distribuição Avançado (CDA) ser inferior a 7h30, intervalo compreendido entre a disponibilização da demanda e a saída dos primeiros veículos de *outbound*, os demais processos operacionais subseqüentes se mostram limitantes. As etapas de carregamento e descarregamento, associadas à formação de filas na chegada ao CDA, resultam em um acréscimo significativo no tempo total de atendimento. Em consequência, torna-se inviável cumprir o cronograma previsto, permitindo que apenas 37% do volume demandado seja atendido dentro do prazo no período de baixa demanda, podendo piorar significativamente em períodos de maior demanda.

Esse comportamento evidencia que, no cenário padrão, a restrição de disponibilidade de produtos nas fábricas, em conjunto com os tempos de rota e de manuseio, constitui os principais gargalos da operação. A limitação de disponibilidade obriga que parte do volume seja atendida a partir de Ponta Grossa, enquanto os tempos adicionais associados ao transporte e ao manuseio resultam em uma redução significativa no desempenho desse volume dentro da estratégia de *cross-docking*.

4.2 Mudança no horário de saída

Com o objetivo de avaliar o impacto do horário de disponibilização da demanda, foram formulados dois cenários adicionais. No primeiro, a demanda do dia é liberada à meia-noite, ou seja, com uma hora de antecedência se comparado ao cenário padrão, cuja demanda originalmente é disponibilizada somente após 1 hora da manhã. No segundo cenário, o horário de disponibilização da demanda foi postergado para as 2h30.

A alteração impactou exclusivamente na quantidade de volume despachado corretamente, cujos resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Taxa de expedição correta por mês

Mês	Cenário Padrão	Saída Antecipada (00h00)	Saída postergada (02h30)
Baixa	89%	91%	87%
Média	88%	91%	79%
Alta	75%	82%	63%
Total	83%	87%	74%

Fonte: elaboração própria

Observa-se que o horário de disparo da demanda exerce influência significativa sobre esse indicador, sobretudo em períodos de maior volume de pedidos. A Tabela 5, que detalha os resultados para os dias de baixa, média e alta demanda, reforça essa constatação.

Tabela 5 – Taxa de expedição correta por dia

Dia	Cenário Padrão	Saída Antecipada (00h00)	Saída postergada (02h30)
Baixa	89%	100%	89%
Média	90%	91%	78%
Alta	56%	65%	45%

Fonte: elaboração própria

O cenário com disponibilização antecipada (00h00) apresentou desempenho superior, com um aumento de 5% no respeito das janelas de expedição, eliminando atrasos no dia de

menor demanda e reduzindo de forma expressiva (9%) os atrasos no pico de movimentação. Em contraste, o cenário com demanda postergada (02h30) resultou em quedas acentuadas na taxa de expedição, chegando a até 55% de pedidos atendidos com atraso no dia de maior demanda.

Embora eficiente, a antecipação da disponibilização da demanda exige maior agilidade no processo de faturamento dos pedidos, uma vez que é necessário consolidar a demanda diária em tempo hábil para a emissão das ordens de carregamento. Essa exigência torna-se especialmente desafiadora em dias de pico, como no fechamento do mês ou em períodos festivos, podendo, inclusive, levar ao adiamento do faturamento para o dia seguinte.

Dessa forma, torna-se essencial refletir essa restrição no modelo, pois ela permite testar diferentes níveis de maturidade do processo de consolidação da demanda e avaliar a adoção de fatores de segurança que forcem uma consolidação mais acelerada, que promovam disponibilizações antecipadas da demanda.

4.3 Mudança na quantidade de docas

Na sequência, foram propostos dois novos cenários, nos quais a quantidade de docas do CDA foi alterada para estimar o impacto dessa mudança estrutural. No primeiro, o CDA operou com duas docas e oito empilhadeiras, ou seja, uma doca e quatro empilhadeiras a mais que o cenário padrão. Já no segundo cenário, foi considerada uma estrutura com quatro docas e dezesseis empilhadeiras. A tabela 6 apresenta os resultados dos indicadores que sofreram alterações para ambos os cenários, nos 3 períodos avaliados.

Tabela 6 – Resultados da expansão de docas/empilhadeiras por mês

Mês	Duas Docas			Quatro Docas		
	Expedição correta (%)	Atravess ^{to} médio (min)	Atravess ^{to} máximo (min)	Expedição correta (%)	Atravess ^{to} médio (min)	Atravess ^{to} máximo (min)
Baixa	89%	63,13	113	89%	59,37	107
Média	89%	65,04	159	89%	59,61	142
Alta	89%	75,27	223	89%	62,05	178
Total	89%	67,73	223	89%	60,32	178

Fonte: elaboração própria

A análise dos resultados evidencia uma melhora significativa no indicador de taxa de expedição correta, que alcançou 89% de atendimento em ambos os cenários ao longo dos três meses simulados, o que representa um aumento de 14%, em relação ao mês de alta demanda. O

aumento no número de docas, entretanto, não foi suficiente para elevar esse indicador além desse patamar, uma vez que os atrasos permanecem fortemente associados à distância da fábrica de Ponta Grossa, caracterizando um gargalo estrutural que não é mitigado pela expansão da infraestrutura do CDA.

O indicador mais beneficiado pela ampliação do número de docas foi o tempo de atravessamento, que no mês de alta demanda apresentou uma redução de 39% em relação ao cenário padrão, ao optar por duas docas, e 49% ao utilizar quatro docas. Essa redução está diretamente relacionada à diminuição do tempo de espera em filas, permitindo que o tempo total de atravessamento se aproxime mais do somatório das etapas de descarregamento e transporte interno até o caminhão de *outbound*. Esses resultados podem ser melhor observados na tabela 7, que apresenta os indicadores nos dias de maior, média e baixa demandas.

Tabela 7 – Resultados da expansão de docas/empilhadeiras por dia

Dia	Duas Docas			Quatro Docas		
	Expedição correta (%)	Atravess ^{to} médio (min)	Atravess ^{to} máximo (min)	Expedição correta (%)	Atravess ^{to} médio (min)	Atravess ^{to} máximo (min)
Baixa	89%	49,14	95,00	89%	47,07	90,00
Média	89%	66,76	153,00	89%	62,54	142,00
Alta	87%	107,63	223,00	89%	65,89	178,00

Fonte: elaboração própria

A Tabela 7 complementa essa análise ao detalhar os resultados para dias de baixa, média e alta demanda. Nesses três dias, observou-se a mesma tendência identificada nas análises mensais: reduções expressivas no tempo de atravessamento e ganhos no nível de serviço. Contudo, tais melhorias ainda não foram suficientes para atingir 100% de atendimento dentro das janelas de tempo estabelecidas.

Entretanto, é importante destacar que, embora a ampliação do número de docas possa trazer benefícios operacionais, ela também implica um aumento nos custos financeiros por conta das despesas com aluguel, mão de obra, aquisição de equipamentos e demanda por espaço físico adicional.

Portanto, um modelo capaz de representar as restrições estruturais do CDA pode auxiliar nas tomadas de decisão, ao facilitar o dimensionamento da estrutura necessária, levando em consideração as demais restrições técnicas e operacionais.

4.4 Mudança na disponibilidade de produtos nas fábricas

No primeiro cenário desse grupo, os produtos atendidos por Ponta Grossa passaram a serem disponibilizados em Jacareí, essa mudança cessa o atendimento por Ponta Grossa, já que o software sempre opta pela origem mais próxima. Já no segundo, todo o abastecimento do CDA foi centralizado em um único ponto, um HUB de consolidação da companhia localizado em Caçapava, próximo à fábrica de Jacareí. Os resultados referentes ao primeiro cenário estão apresentados na Tabela 8, que apresenta somente os indicadores que sofreram alterações.

Tabela 8 – Resultados da substituição do suprimento de Ponta Grossa por Jacareí - mês

Mês	Emissão média (t)	Ocupação (%)	Expedição correta (%)	Média de veículos (unidades)	Atravess ^{to} médio (min)	Distância média (km)
Baixa	9,64	78%	100%	5,55	92,08	1.631
Média	12,85	80%	91%	7,21	108,28	2.070
Alta	17,90	85%	77%	9,45	153,73	2.744
Total	13,45	81%	87%	7,40	117,74	2.146

Fonte: elaboração própria

Embora a redução no número de caminhões utilizados tenha sido modesta, o cenário apresentou uma redução total de aproximadamente 27,4% na emissão média de CO₂, explicada principalmente pela diminuição da distância percorrida. Adicionalmente, a menor quantidade de veículos empregados resultou em um aumento de 3 pontos percentuais na ocupação total, considerando os 3 meses, evidenciando ganhos na eficiência do uso dos ativos de transporte.

O nível de serviço também apresentou um aumento total de 5 pontos percentuais, considerando todo o horizonte, com destaque especial para o mês de baixa demanda, que atingiu 100% de nível de serviço. Por outro lado, observou-se aumento total nos tempos de atravessamento, de aproximadamente 25,5%, o que indica que a concentração do fornecimento em menos fábricas gerou maior acúmulo de filas no CDA.

Em seguida, foi proposto um segundo cenário, no qual o CDA passa a ser abastecido exclusivamente por um HUB de consolidação da companhia, localizado na cidade Caçapava. Os resultados desse cenário estão presentes na tabela 9.

Tabela 9 – Resultados da substituição do suprimento de todas as fábricas pelo HUB Caçapava

Mês	Emissão média (t)	Ocupação (%)	Expedição correta (%)	Média de veículos (unidades)	Atravess ^{to} médio (min)	Distância média (km)
Baixa	13,36	91%	94%	4,73	166,41	1.909
Média	17,81	91%	83%	6,29	206,33	2.541
Alta	24,80	94%	65%	8,55	212,84	3.452
Total	18,63	92%	78%	6,51	195,52	2.631

Fonte: elaboração própria

Por estar mais distante que as 3 fábricas do cenário anterior, a consolidação do atendimento no HUB promoveu um aumento na distância média percorrida de 22,6% em relação ao cenário anterior, impactando negativamente no indicador de emissões de CO₂. Por outro lado, ao consolidar todo abastecimento em um único fornecedor, foi possível promover uma redução de 16% no número total de veículos usados, e consequentemente, aumento de 15 pontos percentuais na ocupação total.

Em relação ao nível de serviço, observou-se um aumento de 5 pontos percentuais no mês de baixa demanda. Porém, no mês de alta demanda o desempenho caiu significativamente, ficando 9 pontos percentuais abaixo do cenário padrão. Essa diferença pode ser atribuída à limitação operacional do HUB, que, assim como as fábricas, só é capaz de montar simultaneamente duas cargas. Tal restrição gera filas no processo de montagem e, consequentemente, atrasos nas entregas destinadas ao CDA.

Por fim, o tempo de atravessamento total aumentou 111%, como resultado da combinação entre o elevado volume de recebimentos simultâneos, visto que as carretas partem da mesma origem, com a restrição de apenas uma doca disponível no CDA. Esse gargalo operacional intensificou as filas no descarregamento, comprometendo a agilidade da operação.

Estes cenários reforçam as conclusões obtidas no cenário padrão, evidenciando que o atendimento realizado por Ponta Grossa se mantém como o principal fator de impacto negativo no indicador de expedição correta. Esses cenários permitem avaliar de forma mais abrangente como a restrição disponibilidade de produtos nas fábricas, bem como o número e a localização delas, podem influenciar significativamente os resultados operacionais da estratégia de *cross-docking*.

Por fim, o último cenário ressalta a importância das restrições de capacidade operacional das origens, no modelo, representadas pelo número de docas disponíveis para a montagem dos carregamentos, evidenciando seu papel no correto dimensionamento da infraestrutura. A

análise demonstra que limitações na capacidade de expedição podem se tornar gargalos significativos, afetando diretamente o cumprimento das janelas de entrega e o nível de serviço. Assim, a consideração explícita dessas restrições no modelo permite avaliar diferentes configurações operacionais, identificar necessidades de expansão e evitar investimentos excessivos ou insuficientes na infraestrutura do CDA e de seus fornecedores.

4.5 Cenário Misto

O último cenário consiste na junção do primeiro cenário de redução de fornecedores, em que os produtos de Ponta Grossa são entregues por Jacareí, com o acréscimo de uma doca e quatro empilhadeiras no CDA. Os resultados desse cenário estão presentes na tabela 10.

Tabela 10 – Resultados da substituição de Ponta Grossa aliada a duas docas

Mês	Emissão média (t)	Ocupação (%)	Expedição correta (%)	Média de veículos (unidades)	Atravess^{to} médio (min)	Distância média (km)
Baixa	9,64	78%	100%	5,55	68,39	1.631
Média	12,85	80%	100%	7,21	74,69	2.070
Alta	17,90	85%	84%	9,45	89,88	2.744
Total	13,45	81%	90%	7,40	77,57	2.146

Fonte: elaboração própria

Os resultados desse cenário evidenciam que a combinação das duas estratégias propostas resultou em melhorias expressivas quando comparadas tanto ao cenário padrão quanto aos cenários individuais que o geraram. A substituição de Ponta Grossa por Jacareí como ponto de atendimento contribuiu para encurtar as distâncias percorridas, refletindo em uma redução total de 27,4% nas emissões de CO₂, semelhante ao cenário de substituição de Ponta Grossa, além de um tempo menor para que as cargas cheguem ao CDA.

Como visto no cenário anterior, consolidar o fornecimento em uma quantidade menor de fornecedores pode promover o aumento de filas, devido a maior quantidade de recebimentos simultâneos. Porém, a ampliação da infraestrutura do CDA, com a utilização de duas docas e quatro empilhadeira, aumentou a agilidade no processo de descarga e transporte interno, possibilitando uma redução geral de 34% em relação ao cenário com substituição de Ponta Grossa, e 17,7% em relação ao cenário padrão.

Em função dessas características, o cenário foi capaz de alcançar o nível de serviço ideal, com 100% dos produtos carregados nas janelas de tempo estipuladas, nos períodos de

baixa e média demanda, além de promover um aumento de 9 pontos percentuais no nível de serviço durante o mês de alta demanda.

Este cenário evidencia a capacidade do modelo em avaliar o impacto de alterações em múltiplas restrições de forma simultânea, permitindo identificar a combinação mais adequada entre infraestrutura e estratégias operacionais para o funcionamento eficiente do sistema.

4.6 Visão dos Especialistas

As entrevistas realizadas com colaboradores do setor de bebidas indicam que, embora a empresa não possua uma operação estruturada de *cross-docking* na distribuição secundária, existem práticas similares em algumas regiões, como operações de *transit point* e pontos de redistribuição no Vale do Paraíba e em Sobral. Essas experiências mostram que elementos do *cross-docking* já são utilizados de forma localizada, sugerindo um ambiente minimamente familiarizado com os princípios da estratégia.

No que diz respeito às dificuldades específicas do setor, os entrevistados destacaram três fatores principais: a alta diversidade do mix de produtos, o elevado volume movimentado, intensificado pela necessidade de retorno de vasilhames, e os lead times muito curtos, que frequentemente exigem entregas para o dia seguinte. Esses elementos aumentam a complexidade da operação e dificultam a sincronização necessária ao *cross-docking*, além de levantarem questões de segurança devido ao fluxo intenso e às atividades físicas exigidas.

Ao avaliar os resultados da simulação, os colaboradores consideraram os achados coerentes com a realidade operacional. A distância entre o CDA e os fornecedores, especialmente Ponta Grossa, foi apontada como uma limitação relevante, potencialmente comprometendo o nível de serviço. Também foi mencionada a baixa ocupação dos veículos como um resultado esperado, dada a diversidade de fábricas e produtos envolvidos, o que tende a gerar cargas mais fragmentadas.

Sobre os cenários em que o *cross-docking* poderia ser vantajoso, os entrevistados indicaram que sua aplicação é mais adequada para operações de menor complexidade, caracterizadas por volumes reduzidos, poucos fornecedores e clientes com pedidos menos variados. Um dos colaboradores, entretanto, observou que a estratégia também poderia ser útil em períodos de alta demanda, desde que bem estruturada, pois nesses momentos os custos e a complexidade operacional aumentam significativamente.

Por fim, os colaboradores destacaram aspectos não contemplados no estudo e que poderiam enriquecer análises futuras. Entre eles estão a inclusão de indicadores financeiros para

comparação entre cenários, a avaliação de diferentes perfis de clientes e da capacidade operacional variável conforme a sazonalidade, além da sugestão de testar formalmente a estratégia de *transit point*, dada sua proximidade com práticas já utilizadas pela empresa.

5 Conclusões

Ao propor um modelo de simulação capaz de representar o *cross-docking* adaptado às particularidades da distribuição física no setor cervejeiro, este estudo permitiu avaliar o desempenho logístico em diferentes cenários de simulação. A partir dos resultados obtidos, destacam-se as seguintes conclusões:

- O baixo lead time entre venda e entrega, requisito importante na distribuição física de bebidas, deve ser considerado durante a modelagem de um *cross-docking*. Restrições relacionadas ao momento de disponibilização da demanda e as diferentes janelas de despacho dos pedidos tornam-se essenciais para assegurar que o modelo represente adequadamente as exigências operacionais do setor.
- Devido ao elevado índice de retorno de ativos, uma característica marcante do setor de bebidas, modelos que representem CDAs operando sob a lógica de *cross-docking* devem considerar não apenas o fluxo de retorno desses ativos, mas também a necessidade de áreas de armazenagem desses materiais, ainda que reduzidas em comparação a modelos tradicionais. Uma alternativa à criação dessas áreas seria permitir que os caminhões de abastecimento aguardem o retorno dos ativos (conforme indicado na pergunta 1 do APÊNDICE A); entretanto, essa solução ainda requer a disponibilização de espaço adequado para acomodação dos veículos.
- A consolidação do fornecimento em um número reduzidos de fábricas pode gerar ganhos significativos, especialmente pela redução do número de veículos utilizados e, conseqüentemente, das emissões (pergunta 4 do APÊNDICE A). Por esse motivo, é fundamental que os modelos representem adequadamente as restrições desses fornecedores, como a disponibilidade de produtos e a quantidade de docas para despacho, ambas consideradas no modelo proposto.
- A ampliação do número de docas e empilhadeiras demonstrou ser uma alternativa eficaz para mitigar atrasos operacionais; entretanto, envolve investimentos financeiros e demanda adicional de espaço físico, o que pode comprometer a viabilidade da operação. Ademais, seus benefícios se limitam aos cenários em que a etapa de descarga constitui, de fato, o principal gargalo do sistema, não sendo uma solução aplicável a restrições

relacionadas ao tempo de saída ou à distância dos fornecedores. Assim, ao incorporar essa restrição estrutural no modelo, torna-se possível avaliar a infraestrutura mais adequada à demanda projetada do CDA, evitando tanto atrasos quanto dispêndios desnecessários com expansões não justificadas.

- É essencial que o modelo proposto seja responsivo à demanda e que essa informação seja fornecida ao modelo considerando, ao máximo, sua variabilidade diária real. Isso possibilita projetar o desempenho das estratégias tanto em dias de pico quanto em períodos de baixa, auxiliando no correto dimensionamento estrutural e na escolha das estratégias operacionais. Dessa forma, torna-se possível identificar combinações que viabilizem o atendimento integral da demanda diária.

Entre as principais contribuições deste trabalho, destaca-se a proposição de um modelo de *cross-docking* adaptado ao setor cervejeiro, capaz de incorporar suas especificidades operacionais e os efeitos sobre indicadores logísticos e ambientais. Os resultados obtidos reforçam o potencial da simulação como ferramenta de análise do *cross-docking*, desde que devidamente ajustada às particularidades do setor. A aplicação desse tipo de modelo auxilia não apenas na avaliação da viabilidade da estratégia de *cross-docking*, mas também no dimensionamento de sua infraestrutura física, na determinação da disponibilidade ideal de equipamentos e na definição de estratégias adequadas, como o número de fornecedores e o momento de disponibilização da demanda. De modo geral, tais contribuições permitem que os tomadores de decisão identifiquem a combinação mais eficiente de características para alcançar baixos custos e elevado desempenho operacional, alinhados à demanda projetada para o CDA.

Dentre as limitações deste estudo, destaca-se principalmente o seu escopo, que não contempla certos riscos operacionais, como atrasos de rotas extremos, devido a acidentes por exemplo, ou quebras de produtos durante o descarregamento/manuseio. Além disso, não foram considerados indicadores financeiros, o que pode restringir a análise de viabilidade prática, os diferentes cenários avaliados.

Outro ponto importante refere-se à ausência da análise de competitividade logística. Seria fundamental investigar como os modelos de *cross-docking* se comportariam em cenários de concorrência entre múltiplos CDAs ou frente a diferentes clientes disputando os mesmos volumes provenientes de uma mesma fábrica.

Quanto a estudos futuros, diversas estratégias poderiam ser modeladas e simuladas para aprimorar ou baratear a operação de *cross-docking*, como a adoção de *milk run* para coleta de cargas, bem como a utilização de pequenos estoques de segurança para absorver variações de

demanda e reduzir atrasos. A modelagem dessas alternativas poderia oferecer informações valiosas sobre a resiliência e a flexibilidade do sistema.

Referências

ALMEIDA, Marcio V.; MARCONDE, Reynaldo C. A distribuição física como recurso estratégico de fabricantes de bens de consumo para a obtenção da vantagem competitiva. *Revista de Administração*, 2014, p. 656–670.

APTE, U. M.; VISWANATHAN, S. Effective cross docking for improving distribution efficiencies. *International Journal of Logistics: Research and Applications*, v. 3, n. 3, p. 291–302, 2000.

ARNAOUT, G.; RODRIGUEZ-VELASQUEZ, E.; RABADI, G.; MUSA, R. Modeling cross-docking operations using discrete event simulation. In: *EOMAS'10 Proceedings of the 6th International Workshop on Enterprise & Organizational Modeling and Simulation*, Aachen, Alemanha, 2010. p. 113–120.

BALLOU, Ronald H. *Logística empresarial: transportes, administração de materiais, e distribuição física*. São Paulo: Atlas, 1995.

BARTHOLDI III; GUE, K. R. The best shape for a crossdock. *Transportation Science*, v. 38, n. 2, p. 235–244, 2004.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J. *Logística empresarial*. São Paulo: Atlas, 2001.

BUIJS, Paul et al. Just-in-time retail distribution: a systems perspective on cross-docking. *Journal of Business Logistics*, v. 37, n. 3, p. 213–230, 2016.

CERVIERI JÚNIOR, Osmar. Panoramas setoriais 2030: bebidas. In: *Panoramas setoriais 2030: desafios e oportunidades para o Brasil*. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2017. p. 69–78.

COLMERO, I. M. R. J. Diagnóstico da estrutura de distribuição da indústria cervejeira. In: *Encontro Nacional de Engenharia de Produção, XXIX*, 2009.

FILHO, S. *Gestão da logística em um centro de armazenagem e distribuição de bebidas*. 2012.

KIANI MAVI, Reza et al. Cross-docking: a systematic literature review. *Sustainability*, v. 12, n. 11, p. 4789, 2020.

MAGABLEH, Ghazi et al. *Modeling and analysis of a generic cross-docking facility*. 2014.

MARIC, R. M.; ĐURANOVIĆ, D.; NUŠEVA, D. Key indicators of physical distribution of goods: a case study of the Western Balkans. *PROMET - Traffic & Transportation*, 2018.

MÁRCIA RODRIGUES, I.; COLMENERO, J. O. Diagnóstico da estrutura de distribuição da indústria cervejeira. In: *XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção: A Engenharia de Produção e o Desenvolvimento Sustentável: Integrando Tecnologia e Gestão*, 2009.

MIGUEL, Paulo C. M. *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

NOVAES, Antonio G. *Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

NOVAES, Antonio G. N. et al. Cross-docking em centros logísticos de distribuição urbana: considerações sobre operação e modelagem. *Transportes*, v. 23, n. 1, p. 47, 2015.

SHYNCON, H. N.; KRENN, J. M. Modeling sales response of customer service for more effective distribution. In: *Proceedings of National Council of Physical Distribution Management*, New Orleans, LA, USA, 1983.

TURRONI, João B.; MELLO, Calos H. P. Metodologia de pesquisa em engenharia de produção. 2012.

VAN BELLE, J.; VALCKENAERS, P.; CATTRYSSE, D. Cross-docking: state of the art. Omega, v. 40, p. 827–846, 2012.

ZULUAGA, Juan Pablo S. et al. Reverse cross-docking. Omega, v. 66, p. 48–57, jan. 2017.

APÊNDICE A

Pergunta 1: Você já viu alguma aplicação de cross-docking no setor cervejeiro, em especial na distribuição secundária?

Colaborador A: “No meu cargo atual não tenho muito contato com a distribuição secundária, porém acredito que um dos nossos novos CDAs, na cidade de Sobral irá funcionar em um sistema muito parecido ao cross-docking. Lembro também que na minha empresa anterior algumas operações muito parecidas com o transit point ocorriam”

Colaborador B: “Não conheço nenhuma experiência grande aqui na companhia, mas na minha empresa anterior (bens de consumo e alimentos) existiam alguns usos da estratégia. Lembro que era muito comum para a distribuição de sorvetes. Tínhamos alguns pontos no interior onde as carretas abasteciam, e de lá os trucks já partiam para os clientes.”

Colaborador C: “No Vale do Paraíba temos uma estratégia muito semelhante ao cross-docking, em que enviamos uma carreta do nosso CDA de Caçapava até o litoral, lá temos um galpão em que carreta descarrega e seu conteúdo é dividido entre veículos menores. Ela espera lá até o final o dia, para retornar com os ativos.”

Pergunta 2: Quais características específicas do setor podem dificultar ou inviabilizar a utilização de um *cross-docking*?

Colaborador A: “Por estar distante da secundária não consigo ter muita precisão, mas acredito que o nosso mix de produtos pode ser um problema, devido à alta diversidade. Além disso acho que a dificuldade da operação pode causar alguns problemas de segurança (dos trabalhadores) podem ocorrer”

Colaborador B: “Acredito que a maior dificuldade seja o alto volume, por conta da grande quantidade de pedidos e as características dos produtos como a necessidade de vasilhames.”

Colaborador C: “Temos um lead time bem curto para trabalhar, boa parte dos pedidos são feitos para entregar já no dia seguinte. Por conta disso acho bem complexo manter o nível de serviço. Acho que se ele for projetado para um local distante de fornecedores ou um estoque auxiliar, podemos ter problemas.

Pergunta 3: Os resultados encontrados vão de acordo com a sua visão prévia sobre a utilização de um *crossdocking*?

Colaborador A: “Sim, ao entender os parâmetros e características do CDA e seus fornecedores imaginei que a distância de Ponta Grossa poderia dificultar a operação. Outro ponto que já esperava é um desempenho complicado nas ocupações dos veículos, justamente pelo mix de produtos vindos das 4 fábricas”

Colaborador B: “Sim, na minha visão as principais atividades de um *cross-docking* foram representadas. Já esperava uma dificuldade com a ocupação e nível de serviço”

Colaborador C: “Por gerenciar esse CDA, imaginei que o fornecimento por Ponta Grossa poderia inviabilizar a estratégia.”

Pergunta 4: Dado esses resultados, em que casos o *cross-docking* se tornaria uma opção interessante?

Colaborador A: “Acredito que o *cross-docking* pode ser muito interessante para lidar com baixos volumes, combinado a poucos fornecedores, de preferência um. Assim é possível combinar os ganhos econômicos do *cross-docking* com uma maior eficiência na operação”

Colaborador B: “Acho que ele pode ser muito interessante se o perfil dos clientes for adequado. Volume baixo o suficiente para não ser atendido direto da fábrica, e um mix de marcas menor, para não necessitar muitos fornecedores diferentes”

Colaborador C: “Os resultados apontam que seria mais indicado pra baixas demandas, de fato seria mais simples de utilizar. Porém acredito que nossa maior oportunidade está nos períodos de alta. Nossa complexidade e custos aumentam muito, caso uma operação de *cross-docking* fosse madura o suficiente para operar teríamos ganhos consideráveis.”

Pergunta 5: Quais outras características ou oportunidades não foram consideradas no estudo?

Colaborador A: “Senti falta de algum indicador financeiro. Seria interessante comparar o custo de aluguel, transporte, abertura de docas e etc. Tanto em relação aos cenários, quanto a um CDA que não opera em *cross-docking*”

Colaborador B: “Seria interessante um cenário com perfis de clientes diferentes, mudando o mix de pedidos para mais simples ou complexos. Outro ponto interessante seria um cenário em que as capacidades mudem de acordo com a demanda, o que é algo que já fazemos, em momentos de picos temos mais equipes para auxiliar.”

Colaborador C: “Acredito deveria ter algum indicador financeiro para podermos comparar com um CDA normal, e até entre os cenários mesmo. Além disso, seria interessante testar a estratégia de transit point”