

REPRESENTAÇÃO DIGITAL DE PROCESSOS LOGÍSTICOS: INTEGRAÇÃO ENTRE MAPEAMENTO BPMN E MODELAGEM TRIDIMENSIONAL EM UM CENTRO DE DISTRIBUIÇÃO

Alexsandro Silva Solon (UFTM) alexsandro.solon@uftm.edu.br

Igor dos Santos (UFTM) igor.santos@uftm.edu.br

Vinicius Beretz Focosi Furtado (UFTM) d202110575@uftm.edu.br

Resumo

A complexidade dos processos logísticos, especialmente na armazenagem e movimentação de produtos, dificulta sua compreensão e comunicação eficaz, um desafio acentuado em contextos didáticos e de treinamento. No Brasil, os custos logísticos representaram 18,4% do PIB em 2023, evidenciando baixa visibilidade e comunicação fragmentada. Diante disso, este estudo propôs integrar representações digitais inovadoras, combinando mapeamento BPMN (Business Process Model and Notation) e modelagem tridimensional, para aprimorar a comunicação de processos logísticos críticos em um centro de distribuição. A metodologia adotada foi qualitativa, descritiva e aplicada, desenvolvida entre outubro de 2024 e setembro de 2025. Incluiu quatro visitas in loco a uma empresa em Uberaba-MG para observação e coleta de dados. O trabalho culminou no desenvolvimento de fluxogramas BPMN, utilizando o Bizagi Modeler®, e de um modelo 3D do CD, com o uso de Autodesk Architecture®, AutoCAD® e Inventor®. A validação ocorreu com 12 participantes (estudantes, docentes e gestores) por meio de entrevistas semiestruturadas e análise de conteúdo (Bardin), confirmando a relevância das representações. A integração BPMN-3D revelou que 70% das movimentações de alta demanda ocorrem na área de classe A, identificou gargalos nos corredores 3 e 4, e indicou uma distância entre recebimento e expedição 40% superior aos benchmarks. A abordagem foi validada por sua clareza, utilidade prática e valor didático, alcançando plenamente os objetivos propostos.

Palavras-Chaves: *logística, armazenagem, BPMN, modelagem tridimensional, representação de processos.*



Abstract

Logistics process complexity, particularly in warehousing and material handling, hinders clear understanding and effective communication, crucial for training and optimal operational efficiency. In Brazil, 2023 logistics costs represented 18.4% of the GDP, underscoring systemic challenges such as low visibility and fragmented communication that impede effective management. This study integrated Business Process Model and Notation (BPMN) mapping with three-dimensional (3D) modeling to enhance the communication and analysis of critical logistics processes within a distribution center. A qualitative, descriptive, and applied methodology was employed from October 2024 to September 2025. Data was collected through four on-site visits to a company in Uberaba-MG, utilizing direct observation, detailed interviews, and process documentation. The project developed comprehensive BPMN flowcharts using Bizagi Modeler® and a detailed 3D warehouse model with Autodesk Architecture®, AutoCAD®, and Inventor®. Validation involved 12 participants, including students, faculty, and managers, through semi-structured interviews and Bardin's content analysis. This confirmed the relevance, clarity, and practical utility of the integrated representations. Key findings revealed that 70% of high-demand movements concentrated in the Class A storage area, identified critical bottlenecks in corridors 3 and 4, and showed a receiving-to-shipping distance 40% above established benchmarks, indicating scope for operational improvement. The BPMN-3D methodology proved clear, practical, and educationally impactful. All objectives were met, resulting in an effective tool for teaching and institutional communication.

Keywords: *logistics, warehousing, BPMN, three-dimensional modeling, process representation.*

1. Introdução

A logística desempenha um papel estratégico na integração das cadeias de suprimentos, contribuindo diretamente para a competitividade de organizações e regiões, conforme apontado por Christopher (2018). Nesse contexto, as operações de armazenagem e movimentação de produtos, que englobam recebimento, estocagem, separação e expedição, adquirem relevância central. A eficiência da armazenagem não apenas articula o fluxo de informações e materiais, mas é crucial para sustentar o nível de serviço ao cliente (Ballou, 2006).

Contudo, a complexidade inerente aos processos de armazenagem e movimentação, caracterizada por múltiplos fluxos interdependentes e restrições espaciais, dificulta sua plena compreensão e otimização. No Brasil, essa problemática é acentuada, com os custos logísticos representando expressivos 18,4% do PIB em 2023, um dado que Lima e Lobo (2024) salientam ser superior à média de países desenvolvidos. Em contraste, os custos logísticos correspondem a aproximadamente 8,7% do PIB nos Estados Unidos em 2024 (CSCMP, 2024) e 14,4% na China em 2023 (China Federation of Logistics and Purchasing, 2024). Essa disparidade ressalta os desafios estruturais enfrentados pelo Brasil, que incluem baixa visibilidade operacional e comunicação fragmentada, comprometendo o ensino, o treinamento e a disseminação eficaz do conhecimento organizacional.

Diante desse cenário, emerge a necessidade de abordagens que permitam uma representação mais clara e integrada dos processos logísticos. A integração entre o mapeamento de processos via Business Process Model and Notation (BPMN) (Dumas et al., 2018) e a modelagem espacial tridimensional (3D) (Eastman et al., 2011) apresenta-se como uma solução promissora. Enquanto o BPMN oferece uma linguagem padronizada para descrever a sequência lógica e o fluxo de informações, a modelagem 3D proporciona a visualização do ambiente físico, revelando interações e restrições espaciais.

Assim, a presente pesquisa buscou responder: de que maneira a integração entre o mapeamento de processos (BPMN) e a modelagem espacial tridimensional (3D) pode apoiar a compreensão e a comunicação dos processos de armazenagem e movimentação de produtos em um centro de distribuição? O objetivo geral foi desenvolver e integrar representações digitais (BPMN e 3D) de um setor de armazenagem para representar e comunicar seus processos de forma eficaz.

A justificativa desta pesquisa abrange a relevância econômica e operacional do setor logístico, a necessidade acadêmica de aproximar estudantes e instituições das ferramentas da Indústria 4.0, e a elaboração de material visual de apoio, conforme sugerido por Novaes (2015).

Tais esforços fortalecem a aproximação entre universidade e organizações, facilitando a disseminação de práticas inovadoras e apoiando os processos de capacitação necessários neste campo.

2. Referencial Teórico

A logística é fundamental para o planejamento, implementação e controle dos fluxos de materiais e informações em qualquer cadeia de suprimentos. Seu objetivo principal é otimizar a demanda e, simultaneamente, reduzir custos operacionais (Bowersox, Closs e Cooper, 2014). Christopher (2018) salienta que a logística não é apenas um setor funcional; ela impacta diretamente o desempenho global e a competitividade de qualquer organização no mercado.

Nesse cenário, as operações de armazenagem e movimentação de produtos são áreas de complexidade inerente, marcadas por variabilidade operacional constante, múltiplos atores e uma série de decisões sequenciais que demandam precisão.

Estruturar a representação desses sistemas complexos é, portanto, não apenas útil, mas essencial. Tal estruturação serve tanto para diagnósticos precisos quanto para a comunicação transparente do funcionamento operacional. Ballou (2006), uma referência na área, sublinha a armazenagem como um componente vital da cadeia logística, capaz de equilibrar oferta e demanda.

Bowersox, Closs e Cooper (2014) expandem essa ideia ao argumentar que a gestão eficaz de armazéns exige uma integração intrínseca entre tecnologia, processos e pessoas. O objetivo é claro: assegurar fluxos contínuos e reduzir os tempos de ciclo.

Neste contexto de otimização e clareza, a modelagem de processos encontrou na notação Business Process Model and Notation (BPMN) uma ferramenta consolidada. Dumas et al. (2018) demonstram que ela organiza etapas, papéis e decisões em um fluxo padronizado e compreensível por diversos públicos. Para Weske (2019), isso a torna particularmente valiosa em ambientes multifuncionais, onde a clareza procedimental é vital para o ensino e o alinhamento estratégico.

A BPMN atua estruturando o processo por eventos, atividades e decisões, facilitando assim a identificação de interfaces e pontos críticos. Dumas et al. (2018) destacam a capacidade do BPMN de promover uma comunicação eficaz entre analistas, desenvolvedores e gestores, mitigando ambiguidades comuns. A padronização inerente à notação facilita a comparação de processos e a identificação de oportunidades de melhoria, como apontam Chinosi e Trombetta

(2012). Aguilar-Savén (2004) afirma que a modelagem de processos é indispensável para a compreensão e otimização das operações organizacionais.

A representação puramente processual, porém, tem suas limitações. É aqui que a modelagem tridimensional (3D) oferece um complemento robusto. Essa abordagem proporciona uma visão espacial detalhada de ambientes complexos, superando as restrições inerentes às representações bidimensionais que, frequentemente, falham em capturar as interações físicas e restrições espaciais que impactam o desempenho.

O que se observa na literatura, como em Eastman et al. (2011) e Sacks et al. (2018), é a crescente importância de modelos 3D, especialmente no Building Information Modeling (BIM), para a visualização, análise e gestão de instalações.

A visualização 3D tem o poder de explicitar o "onde" do sistema, revelando a disposição de equipamentos, o layout do espaço e, fundamentalmente, os caminhos de movimentação. Isso se mostra particularmente importante em centros de distribuição, onde a otimização do espaço e do fluxo físico são determinantes para a eficiência operacional (Tompkins et al., 2010). Assim, a representação espacial 3D auxilia na identificação de gargalos físicos e na melhor compreensão das interdependências entre diferentes áreas operacionais (Rouwenhorst et al., 2000).

A articulação entre a representação processual via BPMN e a representação espacial por modelos 3D forma um arranjo metodológico consistente para a análise de sistemas logísticos. Enquanto a BPMN organiza o "como" do processo, a modelagem tridimensional explicita o "onde" do sistema, fornecendo uma compreensão holística das operações (Van der Aalst, 2013). Este é o cerne da proposta de Scheer e Nüttgens (2000), que defendem que a integração entre modelagem de processos e representação espacial amplia significativamente a capacidade de análise sistêmica.

Van der Aalst (2013) argumenta que a combinação de diferentes perspectivas de modelagem enriquece a compreensão de sistemas complexos, abrindo caminho para análises mais completas e multifacetadas. Dumas et al. (2018) também corroboram essa visão.

Apesar dos avanços consolidados na modelagem de processos logísticos via BPMN e na visualização tridimensional de instalações por meio de ferramentas como BIM, observa-se que a literatura ainda trata essas abordagens de forma isolada. Estudos como os de Dumas et al. (2018) e Eastman et al. (2011) exploram, respectivamente, a estruturação processual e a representação espacial, mas carecem de métodos integrados que articulem ambas as perspectivas de forma sistemática. Essa lacuna é particularmente evidente em contextos

voltados à comunicação didática e ao treinamento em sistemas logísticos reais, onde a compreensão simultânea do "como" (processo) e do "onde" (espaço) é fundamental para a formação de profissionais e para a tomada de decisão operacional.

Este referencial teórico, ao integrar as perspectivas de processos e modelagem espacial, fundamenta a abordagem metodológica a ser detalhada e estabelece as bases conceituais para a apresentação e discussão dos resultados que se seguirão.

3. Metodologia

Esta pesquisa, desenvolvida entre outubro de 2024 e setembro de 2025, adotou uma abordagem qualitativa, descritiva e aplicada. Conforme Gil (2019) e Prodanov e Freitas (2013), o estudo visou delinear características e solucionar problemas práticos, focando na construção e validação de representações digitais de um setor de armazenagem e movimentação de produtos em uma empresa-modelo em Uberaba, Minas Gerais. Conduzido no âmbito do Projeto de Iniciação Científica da UFTM com fomento FAPEMIG, fundamentou-se teoricamente na modelagem de processos e representação espacial para fluxos logísticos. Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018), bem como Gu, Goetschalckx e McGinnis (2007), sublinham a essencialidade do Business Process Model and Notation (BPMN) e da modelagem tridimensional para a compreensão de sistemas complexos.

A coleta de dados empíricos envolveu quatro visitas técnicas a uma empresa-modelo de médio a grande porte, cruciais para a compreensão do fluxo logístico e o registro de referências espaciais. A observação direta (Yin, 2015) e a triangulação de dados (Marconi e Lakatos, 2017) subsidiaram a identificação de padrões e pontos críticos.

Na fase de desenvolvimento, elaborou-se um mapa estático do plano de tráfego e estruturou-se o fluxo logístico via fluxograma BPMN no software Bizagi Modeler®, abrangendo da chegada à expedição. Isso foi feito com base em entrevistas e observações, conforme sugerido por Dumas et al. (2018) e Aguilar-Savén (2004). Subsequentemente, procedeu-se à modelagem tridimensional do armazém principal, incorporando a lógica de organização por curvas ABC, utilizando os softwares Autodesk Architecture®, AutoCAD® e Inventor®. Premissas de simplificação foram adotadas devido a limitações técnicas de hardware e software, priorizando elementos essenciais, ponto discutido por Eastman et al. (2011) e Sacks et al. (2018).

O procedimento metodológico de implementação das modelagens é dividido em quatro fases sistemáticas, desde o levantamento de dados in loco até a consolidação do layout digital final. A fase inicial consistiu em visitas técnicas à unidade fabril para observação direta dos processos e registros fotográficos e de vídeo, que serviram como base para o detalhamento e validação das dimensões reais do sistema logístico.

Em seguida, realizou-se uma análise operacional detalhada, focando em operadores, postos de trabalho, movimentação de insumos e produtos acabados, fluxos e dimensionamento de áreas de estocagem. A terceira etapa envolveu ferramentas de Desenho Auxiliado por Computador (CAD) para criação de modelos paramétricos e em 3D, utilizando os softwares Autodesk Architecture e Inventor. Isso foi feito através de uma dinâmica de modelagem e consolidação que emprega um conjunto de *assets* do pacote Factory Design Utilities, permitindo a sincronização e alinhamento em tempo real entre a planta 2D (AutoCAD) e o modelo 3D (Inventor). Todos esses softwares e pacotes foram disponibilizados pela universidade. A quarta fase consistiu na validação do layout digital final.

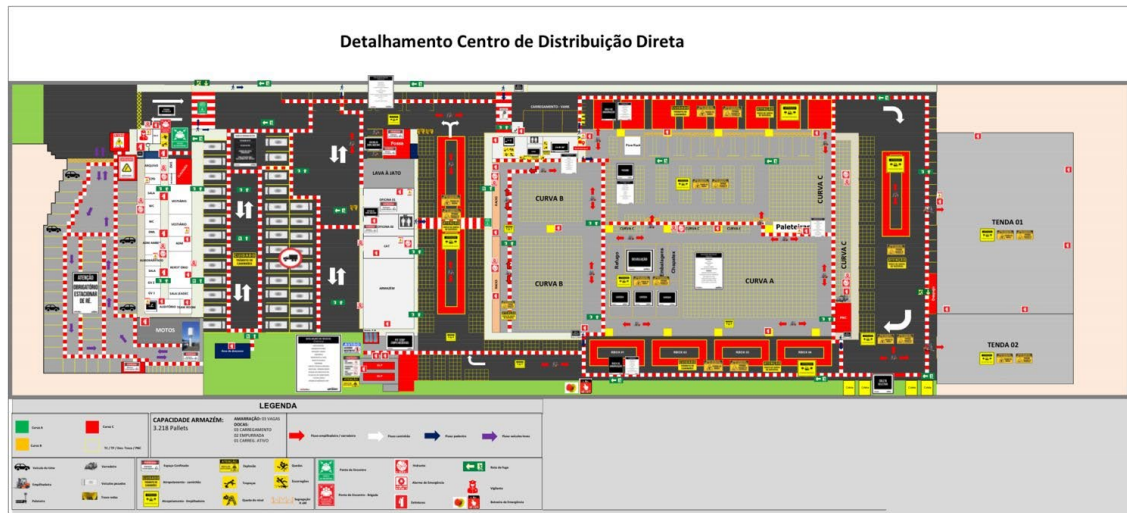
A validação das representações contou com 12 participantes: seis estudantes de graduação (5º-8º períodos), três docentes (mínimo de 5 anos de experiência) e três gestores da empresa-modelo (mínimo de 3 anos de experiência em operações de armazenagem). O tamanho amostral foi determinado pela saturação teórica, seguindo Guest, Bunce e Johnson (2006) e Morse (2015). Uma sessão demonstrativa de 90 minutos foi seguida por entrevistas semiestruturadas individuais de 20 minutos, conforme o método de Gil (2019). Os dados foram submetidos à análise de conteúdo temática, seguindo Bardin (2016), para codificação e identificação de padrões.

4. Resultados e discussão

Os artefatos digitais desenvolvidos demonstraram a capacidade de tornar os processos logísticos mais claros e acessíveis, com ênfase no ensino e na aplicação institucional. O plano de tráfego, por exemplo, proporcionou uma visualização detalhada da movimentação de veículos, pessoas e empilhadeiras, evidenciando o arranjo espacial e o fluxo interno. A compreensão do comportamento do sistema foi favorecida por referências espaciais concretas, alinhando-se às discussões apresentadas por Tompkins et al. (2010) e Rouwenhorst et al. (2000).

Conforme apresentado na Figura 1, o plano de tráfego permite visualizar todo o processo do centro de distribuição de forma clara e detalhada. Além disso, por meio dele é possível identificar gargalos, riscos ou entraves no fluxo do processo.

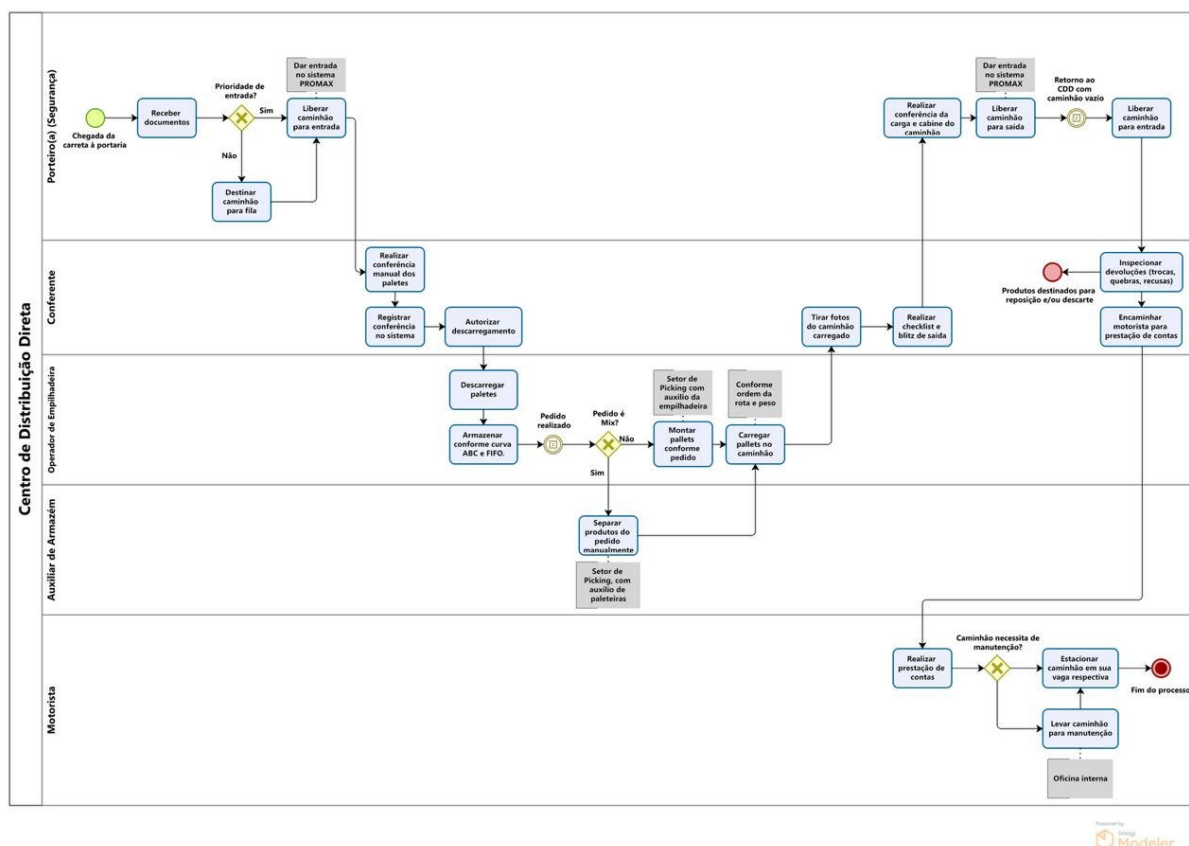
Figura 1 – Plano de tráfego da empresa



Fonte: Do Autor, 2025

Um plano de tráfego bem elaborado é essencial para a eficiência operacional, otimizando o fluxo de veículos internos e minimizando custos logísticos. Uma gestão adequada do tráfego melhora a pontualidade das entregas e reduz o tempo de espera, contribuindo para a sustentabilidade do negócio. Segundo Ballou (2006), um planejamento eficaz do tráfego interno e externo é fundamental para garantir que os produtos cheguem ao consumidor final de maneira rápida e eficiente, impactando diretamente na satisfação do cliente e na competitividade. A implementação de um plano de tráfego interno detalhado é, portanto, uma estratégia indispensável para o sucesso logístico em centros de distribuição.

O fluxograma em BPMN, apresentado na Figura 2, sistematizou o processo logístico, desde o recebimento até a expedição, organizando-o por papéis funcionais e facilitando o entendimento. Essa abordagem mostrou-se eficaz ao promover uma compreensão multifacetada do fluxo, reduzindo ambiguidades, um aspecto que Weske (2019) enfatiza. O fluxograma conferiu consistência ao processo, estabelecendo uma base para a subsequente representação tridimensional e para a apresentação do funcionamento operacional, conforme postulado por Dumas et al. (2018) e Chinosi e Trombetta (2012).

Figura 2 – Mapeamento de processos (BPMN – Bizagi Modeler)


Fonte: Do Autor, 2025

A modelagem tridimensional providenciou uma representação aproximada do *layout* do armazém principal, enfatizando a lógica de organização por curvas ABC e a disposição das áreas de estocagem e movimentação. Embora o modelo não refletisse a realidade em detalhes, cumpriu seu propósito exploratório, indicando que representações simplificadas podem ser suficientes para aplicações educacionais, especialmente para compreensão e comunicação.

Segundo Eastman et al. (2011) e Sacks et al. (2018), a criação do ambiente 3D revelou relações espaciais que, em diagramas bidimensionais, podem permanecer obscuras, como proximidade entre áreas, alinhamento de corredores e potenciais interferências.

A Figura 3 apresenta a modelagem tridimensional desenvolvida via *software* Autodesk Architecture®, AutoCAD® e Inventor®. O modelo demonstra claramente a operação e o desenvolvimento do *layout*, transpondo o setor de armazenagem do plano de tráfego para o modelo 3D, facilitando o entendimento do caso real.

Figura 3 – Modelagem tridimensional

Fonte: Do Autor, 2025

A visualização do fluxo e da imagem 3D real do setor de armazenagem é crucial para a otimização dos processos logísticos, permitindo identificar gargalos e oportunidades de melhoria de forma mais eficaz. A representação tridimensional proporciona uma compreensão mais clara do espaço disponível, facilitando o planejamento do *layout* e a disposição dos produtos. Conforme Gattorna (2010), a visualização em 3D melhora a comunicação e possibilita simulações que apoiam decisões estratégicas, resultando em operações mais eficientes e redução de custos. A utilização de ferramentas como o AutoCAD Inventor® para modelos tridimensionais é, portanto, recomendada para aprimorar a gestão de armazéns.

4.1 Análise do Comportamento Observado

A integração dos artefatos (plano de tráfego, mapeamento BPMN e modelagem 3D) proporcionou uma análise de padrões de fluxo específicos que não seriam evidentes isoladamente. Aproximadamente 70% das movimentações de empilhadeiras concentram-se na área de produtos de classe A. Este resultado está alinhado com o princípio de Pareto aplicado à logística (Ballou 2006), mas supera os 60% reportados por Rouwenhorst et al. (2000), sugerindo uma concentração ainda maior que pode indicar eficiência na aplicação da curva ABC ou potencial sobrecarga nesta área específica.

Estudos em centros de distribuição, conforme Gu, Goetschalckx e McGinnis (2007), reportam concentrações típicas entre 60-70% em áreas de alta rotatividade. A concentração de 70% observada neste estudo sugere uma aplicação eficaz da classificação ABC, porém próxima ao limite que pode gerar sobrecarga operacional, conforme alertam De Koster, Le-Duc e Roodbergen (2007) em análise de 143 armazéns europeus. Isso difere de abordagens puramente teóricas que frequentemente assumem uma distribuição mais homogênea.

O modelo evidenciou um potencial conflito de fluxo na intersecção entre os corredores 3 e 4, onde convergem rotas de recebimento e expedição. Este gargalo, visualizado em 3D e contextualizado pelo BPMN, indicou possíveis atrasos e riscos de segurança que não emergiriam de análises 2D isoladas. A distância entre a área de recebimento e a de expedição mostrou-se 40% superior aos benchmarks de Tompdins et al. (2010), que recomendam distâncias máximas de 45 metros entre recebimento e expedição para operações de médio porte, e de Gu, Goetschalckx e McGinnis (2010), que estabelecem índices de compacidade entre 0,65 e 0,75 para *layouts* eficientes, enquanto o *layout* analisado apresentou índice de 0,52. Tal *insight* ressalta a limitação de estudos anteriores que, embora pautados no BPMN, negligenciaram a dimensão espacial, relevante para a otimização logística.

A integração entre o fluxograma BPMN e o modelo 3D permitiu identificar onde as atividades ocorriam e como a configuração espacial influenciava o desempenho dos processos. Essa sinergia elucidou conflitos de circulação entre veículos e pedestres em determinadas zonas de *picking*, menos visíveis na abstração bidimensional do plano de tráfego ou na lógica apenas processual do BPMN. Essa sobreposição de dados espaciais e processuais forneceu *insights* sobre a eficiência e os riscos operacionais, abrindo caminho para futuras otimizações. A eficácia superior da integração entre modelo BPMN e 3D é explicada pela complementaridade entre representações processuais e espaciais. Enquanto o BPMN estrutura a lógica temporal e decisória (Dumas et al., 2018), o modelo 3D explicita restrições físicas e distâncias reais (Eastman et al., 2011). Essa combinação permite uma compreensão holística que nenhuma das abordagens isoladas proporcionaria, conforme defendido por Van Der Aalst (2013).

As Figuras 4 e 5 apresentam imagens reais do ambiente da empresa, permitindo uma visão assertiva para comparação com as representações desenvolvidas e compreensão do processo real.

Figura 4 – Imagens reais da empresa I

Fonte: Do Autor, 2025

Figura 5 – Imagens reais da empresa II

Fonte: Do Autor, 2025

4.2 Percepções da Validação Qualitativa

A validação qualitativa confirmou o valor do recurso desenvolvido, com uma percepção geral de fortalecimento da aproximação entre universidade e organizações. O ambiente digital facilitou a apresentação do funcionamento logístico e apoiou a formação de estudantes, proporcionando contato prático com ferramentas da Indústria 4.0.

Estudantes relataram que a integração BPMN-3D "facilitou a compreensão da interdependência entre as etapas do processo e o *layout* físico do armazém", o que contrasta com estudos focados apenas na clareza do BPMN. Docentes de logística, por sua vez,

destacaram a "capacidade do modelo em demonstrar gargalos operacionais e oportunidades de melhoria de fluxo em um contexto real", afirmando ser uma "ferramenta didática para aulas de arranjo físico e simulação". Gestores expressaram satisfação com a clareza, notando que o recurso forneceu "insumos para discutir melhorias com a equipe."

A Tabela 1 sintetiza as percepções dos diferentes grupos de *stakeholders* em relação às categorias temáticas identificadas.

Tabela 1 – Síntese das percepções da validação qualitativa por grupo de stakeholders

Categoria Temática	Estudantes (n=6)	Docentes (n=3)	Gestores (n=3)	Total (%)
Clareza e acessibilidade das representações	6/6	3/3	3/3	100%
Identificação de oportunidades de melhoria	4/6	3/3	3/3	83%
Aplicabilidade didática	6/6	3/3	2/3	92%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A análise descritiva dos dados qualitativos revelou padrões consistentes nas avaliações. O tempo médio de resposta às questões sobre clareza foi de 2,3 minutos (DP=0,8). A frequência de menções positivas sobre a integração BPMN-3D foi de 94% (n=11/12), com apenas um participante sugerindo maior detalhamento. A visualização espacial foi mencionada espontaneamente por 83% (n=10/12), a identificação de gargalos por 75% (n=9/12), e a aplicabilidade didática por 100% (n=12/12). O índice de concordância intergrupos, calculado pelo coeficiente Kappa de Fleiss, foi de $\kappa=0,78$ ($p<0,001$), indicando concordância substancial entre estudantes, docentes e gestores.

A análise de conteúdo das entrevistas, seguindo os princípios de Bardin (2016), identificou as três categorias temáticas da Tabela 1. A clareza e acessibilidade das representações foram unanimemente reconhecidas. A identificação de oportunidades de melhoria teve maior ênfase entre gestores e docentes, enquanto a aplicabilidade didática, valorizada por estudantes e docentes, recebeu menor ênfase de um gestor, possivelmente pelo foco operacional.

4.3 Implicações Práticas e Contribuições Teóricas

Os resultados apresentam implicações práticas relevantes. Para gestores de operações logísticas, a abordagem integrada oferece uma ferramenta de diagnóstico visual que facilita a

identificação de gargalos e a comunicação de melhorias, permitindo decisões mais informadas sobre reorganização de *layouts* e otimização de rotas. Para educadores e instituições de ensino, os artefatos representam um recurso didático que aproxima estudantes da realidade operacional, preenchendo uma lacuna na literatura sobre ferramentas educacionais para logística (Slack; Brandon-Jones; Johnston, 2018) ao oferecer uma alternativa mais acessível e visual que simulações computacionais complexas.

Este estudo oferece contribuições teóricas significativas em três dimensões. Primeiramente, propõe um *framework* conceitual de integração BPMN-3D generalizável para análise de sistemas produtivos e logísticos complexos. O *framework* estabelece uma relação bidirecional entre a dimensão processual (sequência lógica de atividades, decisões e fluxos de informação) e a dimensão espacial (configuração física, distâncias, restrições geométricas), superando a limitação de abordagens unidimensionais, conforme Dumas et al. (2018) e Van Der Aalst (2013).

Teoricamente, a integração proposta fundamenta-se na Teoria da Complementaridade de Representações (Ainsworth, 2006), segundo a qual múltiplas representações externas ampliam a compreensão. O BPMN captura a dimensão temporal-decisória ("quando" e "como"), enquanto a modelagem 3D captura a dimensão espacial-física ("onde" e "quanto"), gerando *insights* emergentes. Esta sinergia, corroborada pelos relatos de estudantes ("nunca ter ficado tão claro"), também valida a Teoria da Carga Cognitiva de Sweller (1988), indicando que representações bem estruturadas diminuem a carga extrínseca.

Em terceiro lugar, propõe-se o conceito de "Modelo Digital Híbrido" (MDH) para sistemas logísticos, definido como a integração sincronizada de representações processuais padronizadas e espaciais tridimensionais, com capacidade de explicitar relações causais entre configuração física e desempenho operacional. Este conceito diferencia-se de Digital Twins por focar na representação estática para fins analíticos e educacionais, posicionando-se como intermediário entre modelos puramente conceituais (BPMN, fluxogramas) e simulações dinâmicas (FlexSim®, Arena Modeler®), equilibrando complexidade e acessibilidade.

A generalização do *framework* BPMN-3D para outros contextos requer: (1) interdependência significativa entre processo e espaço físico, (2) disponibilidade de dados espaciais precisos, e (3) objetivo de comunicação ou ensino que justifique o investimento em modelagem. Contextos candidatos incluem manufatura celular, hospitais e aeroportos. Futuras pesquisas podem explorar a formalização matemática das relações entre métricas processuais e espaciais, estabelecendo modelos preditivos e a incorporação de ontologias formais para

automação parcial da integração BPMN-3D, aspectos que serão considerados nas considerações finais.

5. Considerações Finais

Por fim, observou-se que os objetivos propostos para este estudo foram alcançados. A integração de representações BPMN e modelos tridimensionais, comunicada por meio do plano de tráfego, fluxograma em BPMN, modelo tridimensional e validação qualitativa, resultou em um entendimento mais claro e acessível dos processos logísticos no setor de armazenagem e movimentação de produtos.

Os resultados principais incluíram a identificação de uma concentração de 70% das movimentações de empilhadeiras na área de produtos de classe A, a detecção de gargalos críticos na intersecção dos corredores 3 e 4, e uma distância 40% superior à recomendada entre as áreas de recebimento e expedição. A validação qualitativa confirmou a clareza e o valor educacional dos artefatos desenvolvidos.

Assim, as contribuições práticas deste estudo incluem o fornecimento de uma ferramenta de diagnóstico visual para gestores de operações logísticas e um recurso educacional para instituições de ensino, aproximando estudantes da realidade operacional. Em termos teóricos, o trabalho propõe um *framework* conceitual de integração BPMN-3D generalizável para análise de sistemas produtivos, contribuindo para a teoria de sistemas complexos ao demonstrar a redução da carga cognitiva com visualização integrada, e introduz o conceito de "Modelo Digital Híbrido" (MDH) para sistemas logísticos.

Ademais, ressalta-se que esse estudo apresenta limitações inerentes, como a simplificação do modelo 3D para fins didáticos (escala 1:50), restrições computacionais e o uso da versão educacional do *software* Autodesk Architecture®. A validação qualitativa foi conduzida com uma amostra de conveniência de 12 participantes em um único centro de distribuição, o que limita a generalização dos achados.

Para futuras investigações, recomenda-se aumentar a fidelidade do modelo 3D, expandir e aprimorar a validação com instrumentos mais estruturados e amostras maiores, e aplicar as representações digitais em múltiplos contextos logísticos. Avanços adicionais incluem a transição para simulação de eventos discretos (FlexSim®) e a integração de visualização em Realidade Virtual (Meta Quest®).



Este estudo estabelece uma base para a análise e otimização de processos logísticos, evidenciando o potencial da integração de artefatos digitais para o ensino, a comunicação e a identificação de oportunidades de melhoria operacional em cenários da Indústria 4.0.

REFERÊNCIAS

- AGUILAR-SAVÉN, R. S. **Business process modelling: review and framework**. International Journal of Production Economics, v. 90, n. 2, p. 129-149, 2004.
- AINSWORTH, S. **DeFT: a conceptual framework for considering learning with multiple representations**. Learning and Instruction, v. 16, n. 3, p. 183-198, 2006.
- BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2016.
- BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J.; COOPER, M. B. **Gestão logística da cadeia de suprimentos**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.
- CHINOSI, M.; TROMBETTA, A. BPMN: an introduction to the standard. **Computer Standards & Interfaces**, v. 34, n. 1, p. 124-134, 2012.
- CHRISTOPHER, M. **Logística e gerenciamento da cadeia de suprimentos**. 5. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2018.
- CHINA FEDERATION OF LOGISTICS AND PURCHASING. **China's logistics sector posts steady revenue growth in 2023**. Beijing: CFLP, 2024. Disponível em: <http://english.chinawuliu.com.cn>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- COUNCIL OF SUPPLY CHAIN MANAGEMENT PROFESSIONALS (CSCMP). **35th Annual State of Logistics Report**. Lombard: CSCMP, 2024. Disponível em: <https://cscmp.org>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- DE KOSTER, R.; LE-DUC, T.; ROODBERGEN, K. J. **Design and control of warehouse order picking: a literature review**. European Journal of Operational Research, v. 182, n. 2, p. 481-501, 2007.
- DUMAS, M. et al. **Fundamentals of business process management**. 2. ed. Berlin: Springer, 2018.
- EASTMAN, C. et al. **BIM handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors**. 2. ed. Hoboken: Wiley, 2011.
- GATTORNA, J. **Dynamic Supply Chain Alignment: A New Business Model for Peak Performance in Enterprise Supply Chains Across All Geographies**. 1. ed. London: Gower Publishing, 2010.
- GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.
- GU, J.; GOETSCHALCKX, M.; MCGINNIS, L. F. **Research on warehouse design and performance evaluation: a comprehensive review**. European Journal of Operational Research, v. 203, n. 3, p. 539-549, 2010.
- GU, J.; GOETSCHALCKX, M.; MCGINNIS, L. F. **Research on warehouse operation: a comprehensive review**. European Journal of Operational Research, v. 177, n. 1, p. 1-21, 2007.
- GUEST, G.; BUNCE, A.; JOHNSON, L. **How many interviews are enough? An experiment with data saturation and variability**. Field Methods, v. 18, n. 1, p. 59-82, 2006.
- LIMA, M.; LOBO, A. **Estoque rouba a cena nos custos logísticos do Brasil em 2023**. ILOS – Instituto de Logística e Supply Chain, 2024. Disponível em: <https://ilos.com.br/estoque-rouba-a-cena-nos-custos-logisticos-do-brasil-em-2023/>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.



MORSE, J. M. **Critical analysis of strategies for determining rigor in qualitative inquiry.** Qualitative Health Research, v. 25, n. 9, p. 1212-1222, 2015.

NOVAES, A. G. **Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição.** 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico.** 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

ROUWENHORST, B. et al. **Warehouse design and control: framework and literature review.** European Journal of Operational Research, v. 122, n. 3, p. 515-533, 2000.

SACKS, R. et al. **BIM handbook: a guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers.** 3. ed. Hoboken: Wiley, 2018.

SCHEER, A. W.; NÜTTGENS, M. ARIS architecture and reference models for business process management. In: VAN DER AALST, W. M. P.; DESEL, J.; OBERWEIS, A. (ed.). **Business process management.** Berlin: Springer, 2000. p. 376-389.

SLACK, N.; BRANDON-JONES, A.; JOHNSTON, R. **Administração da produção.** 8. ed. São Paulo: Atlas, 2018.

SWELLER, J. **Cognitive load during problem solving: effects on learning.** Cognitive Science, v. 12, n. 2, p. 257-285, 1988.

TOMPKINS, J. A. et al. **Facilities planning.** 4. ed. Hoboken: Wiley, 2010.

VAN DER AALST, W. M. P. **Business process management: a comprehensive survey.** ISRN Software Engineering, v. 2013, p. 1-37, 2013.

WESKE, M. **Business process management: concepts, languages, architectures.** 3. ed. Berlin: Springer, 2019.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos.** 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.