

TRANSFORMAÇÃO DIGITAL NA INDÚSTRIA: BIM E REALIDADE VIRTUAL COMO VETORES ESTRATÉGICOS DE EXPANSÃO

Valter Brito ⁽¹⁾, Guilherme Guignone ⁽²⁾, Wildenberg Lucas ⁽³⁾

(1) VMB Engenharia, Fortaleza, Ceará, Brasil, ID ORCID 0009-0005-8578-7483

(2) Collaborate Engenharia, Vitória, Espírito Santo, Brasil, ID ORCID 0000-0002-1007-8739

(3) Nacional Gás, Fortaleza, Ceará, Brasil

Resumo

A expansão de plantas industriais em operação exige precisão na análise de cenários, compatibilização entre estruturas existentes e propostas futuras e comunicação eficiente entre equipes multidisciplinares. Este estudo apresenta a aplicação integrada de *Building Information Modeling* (BIM) e Realidade Virtual (RV) na expansão de filiais de uma empresa brasileira de distribuição de gás de petróleo liquefeito (GLP), demonstrando como tecnologias imersivas apoiam a governança técnica e a tomada de decisão em ambientes industriais complexos. A metodologia partiu da modelagem BIM da situação existente, contemplando padronizações corporativas e requisitos operacionais. Com base nesse modelo, foram desenvolvidas simulações comparativas entre situação atual, alternativas de expansão e diretrizes do plano diretor, permitindo avaliar demolições, reformas, ampliações e reorganizações de fluxo de forma visual e auditável. A integração com RV possibilitou navegação imersiva, análise de equipamentos em escala real, comparação de versões e modos especializados de exploração de cenários. Os resultados qualitativos evidenciaram maior clareza comunicacional, redução de inconsistências interpretativas e melhor previsibilidade nas decisões de investimento; a quantificação rigorosa desses ganhos constitui trabalho futuro. Conclui-se que a combinação BIM–RV configura estratégia consistente para projetos industriais críticos, ampliando transparência, padronização e capacidade de simulação.

1. Introdução

A expansão de plantas industriais em operação apresenta relevantes barreiras e desafios, uma vez que decisões de projeto precisam considerar, simultaneamente, restrições físicas existentes, continuidade operacional, requisitos de segurança, conformidade normativa e viabilidade econômica. Intervenções mal planejadas, nesse contexto, podem resultar em impactos significativos sobre a produtividade, aumento de riscos operacionais e elevação dos custos ao longo do ciclo de vida dos ativos. Diante desse cenário, a transformação digital tem sido apontada como um elemento-chave para apoiar análises mais precisas, reduzir incertezas e potencializar a comunicação entre equipes multidisciplinares envolvidas no processo [1].

O *Building Information Modeling* (BIM) tem se destacado como uma das principais metodologias para a digitalização de ativos industriais, permitindo a criação de modelos tridimensionais integrados que concentram informações geométricas, operacionais e organizacionais em um ambiente colaborativo. Diferentemente dos métodos tradicionais baseados em documentação fragmentada, o BIM possibilita a avaliação simultânea de diferentes cenários de intervenção, promovendo maior consistência entre projeto, planejamento e tomada de decisão ao longo do ciclo de vida do empreendimento [2, 3].

No contexto industrial, o uso do BIM tem evoluído para além da etapa de projeto, assumindo papel estratégico no suporte ao planejamento de expansões, à análise de interferências com instalações existentes e à definição de diretrizes de padronização corporativa. Estudos amplamente reconhecidos indicam que essa abordagem contribui para a redução de conflitos, melhoria da rastreabilidade das informações e maior previsibilidade técnica em empreendimentos complexos [4, 5].

Entretanto, apesar dos avanços proporcionados pelo BIM, a interpretação de modelos digitais ainda pode apresentar limitações, especialmente quando envolve usuários não técnicos ou processos decisórios estratégicos de alto impacto. A leitura e compreensão de modelos tridimensionais em telas convencionais requerem familiaridade técnica e podem não transmitir plenamente aspectos espaciais, operacionais e perceptivos do ambiente construído. Nesse sentido, a Realidade Virtual (RV) amplia o potencial de uso dos modelos BIM ao permitir a navegação imersiva em ambientes virtuais tridimensionais e interativos, proporcionando uma compreensão mais intuitiva, espacialmente realista e colaborativa das soluções propostas [6, 7]. A integração entre RV e BIM constitui uma tecnologia imersiva de visualização e análise de projetos tridimensionais, capaz de suportar a coordenação interdisciplinar e a tomada de decisões na construção civil, por meio da exploração interativa de modelos digitais antes da execução física [8]. Essa integração tem sido cada vez mais utilizada como ferramenta de apoio à análise de alternativas de projeto, à simulação de sequências construtivas e à validação de soluções em ambientes complexos. Pesquisas consolidadas demonstram que essa combinação contribui para a redução de erros de interpretação, maior alinhamento entre *stakeholders*, antecipação de conflitos e aumento da confiabilidade das decisões de investimento, especialmente em fases iniciais do planejamento [9–11].

Além disso, recursos digitais complementares, como o uso de imagens 360° integradas a modelos BIM, têm sido discutidos na literatura como estratégias eficazes para aproximar o ambiente virtual do contexto real, favorecendo inspeções assistidas, validações remotas e melhor acesso à informação em campo. Essas abordagens ampliam a acessibilidade dos dados e fortalecem a governança técnica dos empreendimentos industriais, especialmente em ativos existentes e em processos de *retrofit* ou expansão [2].

Nesse contexto, o presente artigo apresenta a aplicação integrada de BIM e RV no processo de expansão de plantas industriais de uma empresa de distribuição de gás de petróleo liquefeito (GLP) no Brasil. O estudo evidencia como o uso de tecnologias imersivas contribuiu para a análise comparativa de cenários, a avaliação de impactos operacionais, a verificação de compatibilidade entre estruturas existentes e propostas futuras e a melhoria da comunicação técnica entre os agentes envolvidos. Os resultados, de natureza qualitativa, indicam o potencial da integração BIM–RV como estratégia prática para apoiar decisões em fases críticas de expansão industrial, sendo a sua quantificação rigorosa objeto de trabalhos futuros.

2. Avanços recentes na integração BIM–Realidade Virtual

A integração entre BIM e RV tem avançado nos últimos anos, deixando de ser apenas recurso de visualização para assumir papel estratégico no apoio à tomada de decisão, à simulação de cenários e à melhoria da comunicação em empreendimentos complexos. Em simulações 4D imersivas voltadas à construtibilidade, Botton [10] demonstrou que ambientes colaborativos baseados em BIM 4D integrados à RV permitem identificar conflitos construtivos de forma mais precoce que métodos tradicionais de revisão, ampliando a compreensão coletiva das etapas executivas. No planeamento de áreas de trabalho, Getuli *et al.* [12] evidenciaram que a simulação imersiva contribui para decisões mais assertivas relacionadas ao *workspace planning*, especialmente em ambientes restritos e dinâmicos. No âmbito do processo de projeto, Abdirad e Lin [11] observaram que ambientes virtuais imersivos favorecem a compreensão espacial das soluções, reduzem ambiguidades interpretativas e fortalecem a colaboração multidisciplinar durante a revisão de projetos. Avanços recentes também exploram a integração BIM–RV em ecossistemas *openBIM*: Johansson *et al.* [14] analisaram aplicações reais de RV imersiva conectadas a fluxos *openBIM*, destacando benefícios na colaboração remota e na comparação entre versões, bem como desafios de desempenho computacional e gestão de dados. Revisões sistemáticas consolidam esses avanços: Safikhani *et al.* [13] identificaram que a integração BIM–RV é predominantemente aplicada em visualização avançada, coordenação de projetos, simulação construtiva e treinamento, apontando como tendências emergentes a colaboração multiusuário e a integração com dados operacionais.

Apesar dos avanços teóricos, é ainda limitada a quantidade de estudos de caso reais aplicando essa integração em plantas industriais, caracterizadas pela atuação simultânea de múltiplas disciplinas e pela necessidade de troca contínua e precisa de informações. Nesses ambientes, os sistemas são críticos, interdependentes e não admitem falhas, tornando essencial uma compreensão espacial clara e compartilhada entre os envolvidos. Nesse contexto, o uso da RV integrada ao BIM apresenta-se como recurso potencial para apoiar a coordenação interdisciplinar, reduzir riscos e qualificar a tomada de decisão nas fases de projeto e planeamento.

3. Metodologia

O desenvolvimento do trabalho adotou um fluxo metodológico estruturado em etapas sequenciais e iterativas, concebido para garantir precisão técnica, rastreabilidade da informação, clareza comunicacional e integração com tecnologias digitais imersivas. A metodologia foi orientada por princípios de confiabilidade da base de dados, validação colaborativa e suporte à tomada de decisão em ambientes industriais complexos (Figura 1). A arquitetura tecnológica articulou o *Revit* (Autodesk) para a modelagem paramétrica, o *Navisworks* (Autodesk) para a coordenação multidisciplinar e a detecção de interferências, e o motor *Unreal Engine* para a construção dos ambientes de RV (Figura 2). A troca de informações entre plataformas baseou-se em formatos nativos e em fluxos compatíveis com o padrão *openBIM* (IFC), favorecendo a interoperabilidade entre disciplinas. A visualização foi

disponibilizada em monitores convencionais, em dispositivos móveis (códigos QR e imagens 360°) e em óculos de RV.

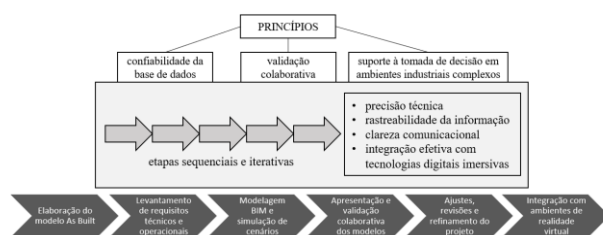


Figura 1: fluxo metodológico adotado para o desenvolvimento dos trabalhos

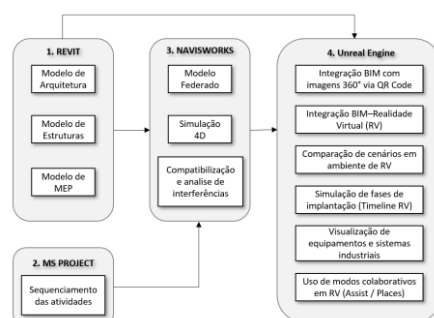


Figura 2: principais softwares adotados para o desenvolvimento dos trabalhos

3.1 Elaboração do modelo *As Built*

A primeira etapa consistiu na elaboração do modelo *As Built*, com o objetivo de registrar de forma fidedigna as condições reais da instalação existente. Essa fase envolveu a consolidação de informações geométricas, funcionais e operacionais, assegurando que o projeto de expansão fosse fundamentado em uma representação digital atualizada e coerente com o estado físico do ativo. A adoção do modelo *As Built* mostrou-se essencial para reduzir incertezas iniciais, eliminar inconsistências recorrentes em levantamentos manuais e criar uma base confiável para as etapas subsequentes do processo.

3.2 Levantamento de requisitos técnicos e operacionais

Na sequência, foi realizado o levantamento de requisitos, etapa fundamental para identificar e sistematizar as demandas específicas relacionadas à expansão da planta industrial. Esse levantamento contemplou aspectos de padronização corporativa, exigências regulatórias, requisitos operacionais, condicionantes de segurança e pontos críticos de desempenho do sistema existente. O mapeamento estruturado desses requisitos orientou as decisões projetuais, assegurando alinhamento entre as soluções técnicas propostas e as diretrizes estratégicas da organização.

3.3 Modelagem BIM e simulação de cenários

Com os dados consolidados, iniciou-se a etapa de modelagem BIM, responsável por traduzir as informações levantadas em modelos tridimensionais inteligentes e integrados. Nessa fase, foram desenvolvidos modelos paramétricos capazes de suportar a compatibilização entre disciplinas, o controle de versões e a simulação de diferentes alternativas de *layout* e expansão. A modelagem BIM possibilitou a análise comparativa de cenários, a avaliação de interferências

entre sistemas existentes e propostos e a verificação antecipada de adequações necessárias, contribuindo para a previsibilidade técnica do processo.

3.4 Apresentação e validação colaborativa dos modelos

Posteriormente, os modelos BIM foram apresentados às equipes técnicas e aos gestores, com foco na validação colaborativa das soluções propostas. Essa etapa permitiu que diferentes áreas da organização avaliassem os cenários de forma integrada, promovendo o alinhamento entre perspectivas técnicas, operacionais e estratégicas. A visualização tridimensional e a possibilidade de exploração dos modelos facilitaram a identificação de ajustes necessários e ampliaram a compreensão coletiva das implicações das decisões de projeto.

3.5 Ajustes, revisões e refinamento do projeto

A partir das contribuições obtidas durante a validação colaborativa, procedeu-se à etapa de ajustes e revisões, refinando o projeto de acordo com os apontamentos realizados. Esse processo iterativo contribuiu para aumentar a assertividade das soluções antes da fase de execução, reduzindo riscos de retrabalho e garantindo maior aderência aos requisitos previamente estabelecidos.

3.6 Integração com ambientes de realidade virtual

Por fim, os modelos BIM consolidados foram integrados a ambientes de RV, possibilitando a exploração imersiva e interativa do projeto em escala real. Essa etapa ampliou a compreensão espacial das soluções propostas, favoreceu a comunicação entre *stakeholders* com diferentes níveis de conhecimento técnico e apoiou a tomada de decisão. A navegação imersiva permitiu a análise de *layouts*, fluxos operacionais, posicionamento de equipamentos e impactos das expansões, proporcionando uma avaliação dos cenários antes da implementação física.

A Tabela 1 ilustra de forma esquemática as etapas do fluxo metodológico adotado, evidenciando o encadeamento lógico entre levantamento, modelagem, validação e imersão virtual como suporte à tomada de decisão.

Etapas	Objetivo principal	Entradas (inputs)	Ferramentas / Tecnologias	Saídas (outputs)
Elaboração do modelo As Built	Registrar fielmente as condições reais da instalação existente	Levantamentos de campo, plantas existentes, registros fotográficos, medições in loco	Modelagem BIM, levantamento técnico, registros fotográficos	Modelo As Built confiável e atualizado
Levantamento de requisitos técnicos e operacionais	Identificar demandas de expansão, padronização, segurança e requisitos regulatórios	Modelo As Built, normas técnicas, diretrizes corporativas, entrevistas com stakeholders	Análise técnica, reuniões de alinhamento, documentação de requisitos	Lista estruturada de requisitos e condicionantes do projeto
Modelagem BIM e simulação de cenários	Desenvolver modelos tridimensionais inteligentes e	Requisitos consolidados, modelo As Built, diretrizes de layout	Software BIM, coordenação multidisciplinar, simulações de cenários	Modelos BIM compatibilizados e alternativas de layout

Avaliação e validação colaborativa	avaliar alternativas de expansão			
Ajustes, revisões e refinamento do projeto	Avaliar soluções de forma integrada com equipes técnicas e gestores	Modelos BIM, cenários simulados	Visualização 3D, reuniões técnicas, apresentações digitais	Feedback técnico, validações e recomendações de ajuste
	Incorporar contribuições e aumentar a assertividade das soluções	Comentários das equipes, registros de validação	Revisão de modelos, controle de versões BIM	Modelo BIM refinado e validado
Integração com Realidade Virtual	Ampliar compreensão espacial e apoiar a tomada de decisão	Modelo BIM consolidado	Plataformas de Realidade Virtual, visualização imersiva, navegação interativa	Ambiente virtual imersivo para análise e decisão

Tabela 1: Etapas do fluxo metodológico adotado

4. Soluções BIM aplicadas ao planejamento e à expansão industrial

A aplicação da metodologia BIM no contexto da empresa de distribuição de gás de petróleo liquefeito (GLP), estudo de caso, resultou em um conjunto integrado de soluções digitais voltadas ao planejamento estratégico da expansão das filiais, à melhoria da comunicação técnica e à antecipação de decisões de investimento. Diferentemente de abordagens pontuais, a estratégia adotada buscou estruturar uma visão sistêmica e de longo prazo, na qual as expansões não fossem tratadas como intervenções isoladas, mas como parte de um processo contínuo e programado de desenvolvimento dos ativos industriais.

4.1 Visão integrada de expansão e estruturação de um plano piloto

Um dos principais resultados do trabalho foi a consolidação de uma visão integrada de expansão, fundamentada na análise criteriosa das condições existentes e na verificação de aderência aos padrões corporativos. A partir do modelo *As Built* e da avaliação técnica das instalações, foram elaborados estudos contemplando demolições, reformas, padronizações e ampliações necessárias. Foi proposta a adoção de um plano piloto de expansão, concebido como instrumento estratégico para orientar adequações futuras de maneira previsível e programada, antecipando necessidades de infraestrutura, identificando limitações físicas e estabelecendo diretrizes para o crescimento ordenado das filiais. A versão consolidada, validada pelas equipes envolvidas, passou a atuar como base de referência para orientar expansões futuras.

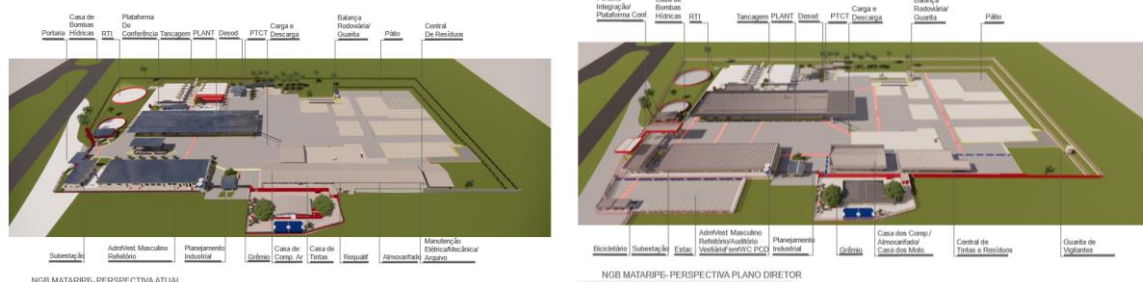


Figura 3: Versão existente e versão final da construção

4.2 Comparação entre a versão atual e o plano diretor de expansão

A utilização do BIM possibilitou a visualização simultânea da situação atual e das propostas de expansão, permitindo comparações diretas entre os cenários existentes e futuros. Essa funcionalidade ampliou significativamente a transparência do processo decisório, uma vez que as transformações planejadas puderam ser compreendidas de forma clara, visual e objetiva.

A comparação entre versões reduziu ambiguidades interpretativas, facilitou o alinhamento entre gestores e equipes técnicas e evitou interpretações equivocadas frequentemente associadas à análise de documentos bidimensionais. Como resultado, o processo decisório tornou-se mais robusto e fundamentado em evidências visuais e técnicas.



Figura 4: Comparativo versão atual e de expansão

4.3 Integração de códigos QR e imagens 360° como solução de acessibilidade

Como solução complementar, foram incorporados códigos QR vinculados a imagens 360°, ampliando a interatividade e a acessibilidade das informações do projeto. Usuários puderam acessar, por meio de dispositivos móveis, visualizações imersivas dos ambientes planejados, sem domínio de ferramentas avançadas de modelagem. A solução mostrou-se útil para validações remotas, apresentações gerenciais e alinhamento com *stakeholders* não técnicos, fortalecendo a comunicação do projeto e aproximando o ambiente digital da realidade do campo.

4.4 Clareza comunicacional como resultado da modelagem BIM

A comunicação entre agentes técnicos e gestores é tradicionalmente um dos principais gargalos em projetos industriais, especialmente quando envolve critérios simultâneos de engenharia, segurança, operação e sustentabilidade. A aplicação do BIM como ferramenta de simulação tridimensional permitiu representar as soluções de forma clara e integrada, favorecendo o alinhamento entre as diferentes áreas envolvidas. A visualização espacial das propostas reduziu ruídos de comunicação, acelerou processos de validação e aumentou a eficiência na definição das soluções de expansão, contribuindo para decisões mais consensuais e tecnicamente embasadas.

4.5 Aplicação da Realidade Virtual como solução de validação e análise

A RV foi aplicada como solução de análise, validação e comunicação, permitindo a imersão dos usuários no ambiente digital do projeto. A navegação interativa possibilitou explorar diferentes áreas da filial — setores administrativos, áreas industriais e espaços externos — em escala real, ampliando a compreensão espacial e funcional das soluções. Funcionalidades como visualização com e sem cobertura, navegação em primeira e terceira pessoa, controle de iluminação, simulação de condições climáticas e alteração de materiais em tempo real apoiaram

análises mais detalhadas, favorecendo a identificação de ajustes antes da execução física. A visualização de máquinas e equipamentos industriais, com acesso a informações técnicas, operacionais e descritivas diretamente no ambiente virtual, fortaleceu a integração entre projeto, operação e manutenção.

4.6 Modos avançados de Realidade Virtual e colaboração

A plataforma de RV incorporou modos avançados que ampliaram o potencial colaborativo da solução. O modo “*Places*” atuou como um guia virtual por setores específicos, facilitando discussões técnicas orientadas por áreas funcionais. O recurso de múltiplos cenários permitiu alternar rapidamente entre versões do projeto, favorecendo comparações diretas. O Modo “*Timeline*” possibilitou a simulação da evolução do projeto ao longo do tempo, representando diferentes fases da obra e apoiando análises relacionadas à sequência executiva. Já o Modo “*Assist*” ofereceu ferramentas para medição, inserção de comentários, captura de imagens e compartilhamento de informações em tempo real, fortalecendo o trabalho colaborativo entre equipes distribuídas. A compatibilidade com óculos de RV ampliou a imersão para gestores, engenheiros e demais *stakeholders*, consolidando a RV como solução de apoio à tomada de decisão em ambientes industriais complexos.

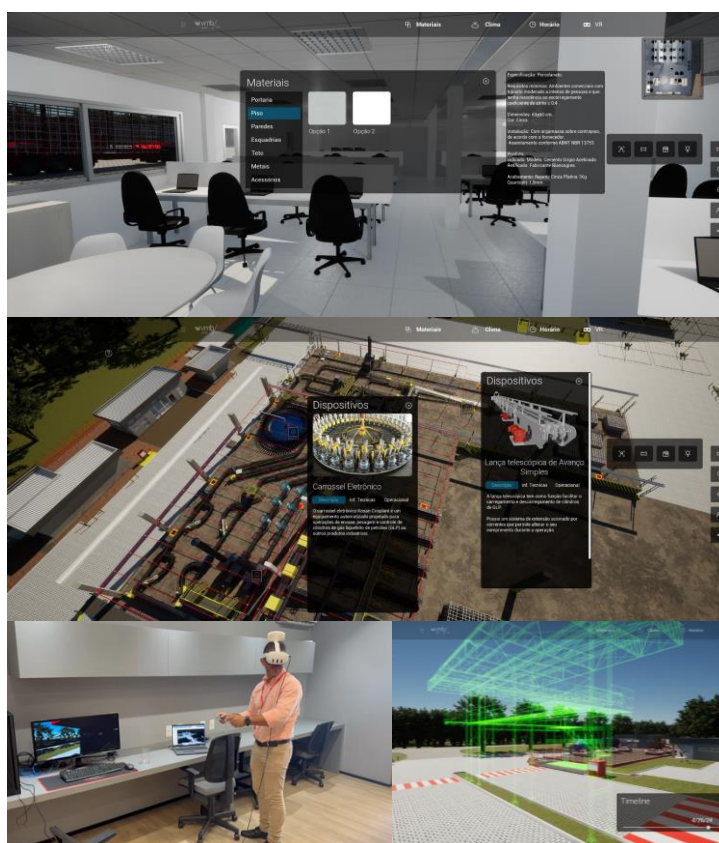


Figura 6: a) Visualizar as especificações dos materiais de piso b) visualizar as descrições de máquinas e equipamentos; c) uso de óculos de Realidade Virtual e d) evolução do projeto ao longo do tempo, representando diferentes fases da obra.

5. Benefícios alcançados e esperados

As soluções BIM evidenciaram benefícios consistentes ao longo das fases do projeto. A modelagem *As Built* no Revit, conjugada ao levantamento de requisitos e à estruturação do plano piloto, ofereceu base confiável para decisões, alinou exigências operacionais, regulatórias e estratégicas, e ampliou a previsibilidade de adequações futuras. Já a comparação entre versões e a análise de interferências pelo Navisworks conferiram transparência ao processo decisório, antecipando conflitos entre sistemas e reduzindo retrabalhos em campo. A integração do modelo com imagens 360° via códigos QR ampliou a acessibilidade da informação a partir de dispositivos móveis, mostrando-se útil em validações remotas e no alinhamento com stakeholders não técnicos.

A integração com a RV consolidou-se como o recurso de maior impacto sobre a clareza comunicacional e a análise espacial em escala real: a navegação imersiva favoreceu a comparação de cenários, o recurso Timeline permitiu antecipar impactos e aprimorar o sequenciamento da execução, e a visualização de equipamentos industriais fortaleceu a integração entre projeto, operação e manutenção. Os modos colaborativos Assist e Places contribuíram para a comunicação interdisciplinar e a rastreabilidade das decisões. Em conjunto, BIM e RV atuaram de forma complementar, sustentando a confiabilidade dos dados, a antecipação de conflitos e a qualidade da comunicação técnica entre os agentes envolvidos.

6. Conclusão

A aplicação integrada de BIM e RV em projetos de expansão industrial mostrou-se solução pertinente frente aos desafios identificados no contexto analisado. Problemas como a fragmentação das informações, a limitação de clareza comunicacional entre equipes multidisciplinares e a dificuldade de visualização da integração entre estruturas existentes e novas propostas foram mitigados pelo uso articulado dessas tecnologias. O BIM apoiou a organização e gestão das informações, possibilitando a comparação entre versões, a simulação de alternativas e a análise de cenários com maior previsibilidade técnica. De forma complementar, a RV ampliou a compreensão espacial das soluções por meio de experiências imersivas e interativas, favorecendo a validação técnica, o engajamento de *stakeholders* e a tomada de decisão colaborativa antes da execução física das intervenções. O fluxo de trabalho adotado — modelo *As Built*, levantamento de requisitos, modelagem BIM, validação colaborativa, ajustes e experiências em RV — mostrou-se consistente e potencialmente replicável em outros empreendimentos industriais que demandem planejamento integrado e elevado nível de coordenação técnica.

Como limitações, registra-se que os benefícios reportados são de natureza predominantemente qualitativa, baseados na percepção das equipes envolvidas e não quantificados por métricas formais. A análise concentrou-se em aspectos espaciais e de compatibilização entre estruturas, não tendo abordado a simulação dinâmica de fluxos operacionais da instalação, que constitui condição relevante em ambientes industriais críticos. Custos de adoção, hardware de RV, licenças de *software* e curva de aprendizagem das equipes também não foram detalhados. Como trabalhos futuros, propõe-se: (i) a aplicação de protocolos experimentais com grupos de comparação e questionários a usuários para quantificar ganhos de clareza comunicacional, número de inconsistências detectadas em RV *versus* revisão 2D, tempo de decisão e custo de retrabalho evitado; (ii) a integração com simulações dinâmicas de processos operacionais

(fluxos logísticos e de produção); e (iii) o aprofundamento da interoperabilidade IFC entre o ambiente BIM e o motor de RV, em alinhamento com os padrões *openBIM*. Apesar dessas limitações, a experiência relatada indica que a combinação BIM–RV pode contribuir como instrumento da transformação digital na engenharia industrial, alinhada às diretrizes da Indústria 4.0.

Referências

- [1] H. Kagermann, W. Wahlster, and J. Helbig, Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0. Munich, Germany: acatech – National Academy of Science and Engineering, 2013.
- [2] R. Volk, J. Stengel, and F. Schultmann, “Building Information Modeling (BIM) for existing buildings: Literature review and future needs,” *Automation in Construction*, vol. 38, pp. 109–127, 2014.
- [3] R. Sacks, G. Lee, L. Burdi, and M. Bolpagni, *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2025.
- [4] B. Succar and M. Kassem, “Macro-BIM adoption: Conceptual structures,” *Automation in Construction*, vol. 57, pp. 64–79, 2015.
- [5] P. Bosch-Sijtsema, A. Isaksson, M. Lennartsson, and H. Linderöth, “BIM implementation and organizational change,” *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 26, no. 9, pp. 1980–1995, 2019.
- [6] J. Whyte, *Virtual Reality and the Built Environment*. London, UK: Routledge, 2013.
- [7] J. Whyte and T. Hartmann, “How digitizing building information transforms the construction industry,” *Building Research & Information*, vol. 45, no. 6, pp. 591–595, 2017.
- [8] H. Salgado, “BIM-based immersive Virtual Reality for construction workspace planning: A safety-oriented approach,” *Automation in Construction*, vol. 114, p. 103160, 2020.
- [9] P. Wang, P. Wu, J. Wang, H.-L. Chi, and X. Wang, “A critical review of the use of virtual reality in construction engineering education and training,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 15, no. 6, p. 1204, 2018.
- [10] C. Botton, “Supporting constructability analysis meetings with immersive virtual reality-based collaborative BIM 4D simulation,” *Automation in Construction*, vol. 96, pp. 1–15, 2018.
- [11] H. Abdirad and K.-Y. Lin, “Advancing BIM–VR integration: Exploring the design process using immersive virtual environments,” *Journal of Architectural Engineering*, vol. 23, no. 3, p. 04017012, 2017.
- [12] V. Getuli, P. Capone, A. Bruttini, and S. Isaac, “BIM-based immersive virtual reality for construction workspace planning,” *Automation in Construction*, vol. 113, p. 103156, 2020.
- [13] S. Safikhani, M. Salmanzadeh, and A. Mahdiyar, “Immersive virtual reality for extending the potential of BIM: A systematic review,” *Automation in Construction*, vol. 140, p. 104360, 2022.
- [14] M. Johansson, M. Roupé, and P. Bosch-Sijtsema, “Real-world applications of BIM and immersive virtual reality in an openBIM ecosystem,” *Automation in Construction*, 2024.
- [15] J. Lucas, “Rapid development of virtual reality-based BIM applications,” *ITcon*, vol. 25, pp. 332–345, 2020.