

Exploração de processos de Operação e Manutenção em BIM a partir da Realidade Aumentada

Estudo de caso de um transformador em subestação de energia elétrica

BIM-FM process exploration in Augmented Reality

A case study of power transformer in power substation

André Luís de Araujo

Faculdade de Arquitetura, Urbanismo e Design
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
andre.araujo@ufu.br

Arnaldo José Pereira Rosentino

Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Triângulo Mineira
Uberaba, Brasil
arnaldo.rosentino@uftm.edu.br

Ana Luiza Sagário

Faculdade de Arquitetura, Urbanismo e Design
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
ana.sagario@ufu.br

Maria Julia Costa Oliveira

Faculdade de Arquitetura, Urbanismo e Design
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brazil
maria.oliveira2@ufu.br

Alexandre Cardoso

Faculty of Electrical Engineering
The Federal University of Uberlândia (UFU)
Uberlândia, Brazil
alexandre@ufu.br

Ana Marotti

Eletronbras
Centrais Elétricas Brasileiras S/A
Rio de Janeiro, Brazil
amarotti@fumas.com.br

Nathalia Sousa e Reis Carneiro

Faculdade de Arquitetura, Urbanismo e Design
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
nathaliasrcarneiro@gmail.com

Maria Cristina Vidigal de Lima

Faculdade de Engenharia Civil
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
macris@ufu.br

Resumo — A aplicação do BIM para facilidades na operação e manutenção é uma nova área que está emergindo, principalmente quando o foco é gestão energética. O uso do BIM como base de dados e sistemas com capacidade de visualização dos mesmos são o ponto principal abordado nas pesquisas de BIM-O&M. No entanto, desafios com a interoperabilidade, a definição de requerimentos para a O&M e uma análise de viabilidade de custos de implementação do BIM nessa fase têm sido pouco abordados. Esta pesquisa explora alternativas para os obstáculos de manipulação in loco de modelos BIM na área de Engenharia Elétrica, por meio de um estudo de caso de um dispositivo eletromecânico em uma subestação de energia elétrica.

Palavras Chave - Inventor; Revit, Unity, AT11

Abstract — The application of BIM for ease of operation and maintenance is an emerging area, especially when the focus is on energy management. The use of BIM as a database and systems with the ability to visualize them is the main point addressed in BIM-O&M research. However, challenges with interoperability, the definition of requirements for O&M, and a feasibility analysis of BIM implementation costs in this phase have fewer scientific investigations. This research explores alternatives to the obstacles of loco manipulation of BIM models in Electrical Engineering through a case study of an electromechanical device in an electric power substation.

Keywords - Inventor; Revit; Unity; AT11

I. INTRODUÇÃO

O acrônimo BIM, sigla para Building Information Modeling que no português pode ser traduzido por Modelagem da Informação da Construção, é um dos desenvolvimentos mais promissores dos últimos anos nas áreas de Arquitetura, Engenharia e Construção [1]. Mais do que um aplicativo ou uma instrução algorítmica, é uma profunda alteração na maneira como as equipes de projeto idealizam e constroem seus empreendimentos. Na última década, a difusão do BIM nos escritórios de projeto permitiu, fundamentalmente, a distinção entre o desenho 2D tradicional, a modelagem geométrica 3D e a modelagem baseada em informação, esta última, abrindo caminho para a modelagem paramétrica e a simulação de processos dinâmicos. A aproximação das características funcionais dos objetos, determinadas pelas expertises de disciplinas distintas é um problema complexo, raramente harmônico e, em geral, exige condutas projetuais específicas [2]. Ideias sobre a organização destes tipos de sistemas não são recentes e, como traço comum, seus problemas têm uma quantidade de variáveis de diferentes naturezas, o que dificulta os processos de controle e cognição sobre a informação.

A Gestão de Facilidades ou Facilities Management (FM) é a parte que coordena o espaço e seus ativos, de modo que tenham o melhor desempenho possível nas fases de Operação e Manutenção (O&M). A integração do BIM e FM pode proporcionar diversos benefícios para a gestão, com a coleta e organização dos dados do design e construção e permitir fornecer aos gerentes respaldo para as tomadas de decisão [3]. De acordo com Guia BIM da Universidade da Pensilvânia, o ponto crítico da implementação do BIM é entender o uso futuro da informação que está sendo desenvolvida nos passos iniciais do ciclo de vida do projeto. Por isso, é importante o Plano de Execução BIM identificando os usos BIM apropriados para cada fase do ciclo de vida. O guia define 25 usos BIM, dentre as quatro fases colocadas pelos autores: planejamento, design, construção e operação [4]. Nas fases O&M são colocados seis usos BIM, sendo dois deles diretamente ligados ao ciclo de vida dos ativos, que podem ser definidos de maneira sintética como:

- Modelo de registro (Record Model): modelagem BIM incluindo um sistema para registro da representação das condições físicas, ambiente e ativos de uma instalação, vinculando os dados a modelos as-built ou as-is, a fim de utilizá-lo durante o ciclo de vida;
- Gestão de ativos: um processo em que visa a eficiência de operação de ambientes e equipamentos por meio de vínculos entre um modelo de registro e um sistema de gestão.

A aplicação do BIM para facilidades na operação e manutenção é uma nova área que está emergindo, principalmente quando o foco é gestão energética. O uso do BIM como base de dados e sistemas com capacidade de visualização dos mesmos são o ponto principal abordado nas pesquisas de BIM-O&M. No entanto, desafios com a interoperabilidade, a definição de requerimentos para a O&M e uma análise de viabilidade de custos de implementação do BIM nessa fase têm sido pouco abordados [5]. Esta pesquisa explora alternativas para os obstáculos de manipulação in loco de modelos BIM na área de Engenharia Elétrica, por meio de um estudo de caso de

um dispositivo eletromecânico em uma subestação de energia elétrica. Tarefas deste tipo têm apresentado complicadores, em função da quantidade de informação vinculada a instâncias gráficas de geometria complexa, compostas por superfícies com elevada quantidade de polígonos. Nos últimos anos, os consoles de jogos se desenvolveram justamente nesse sentido, produzindo respostas gráficas instantâneas, a partir da evolução dos motores de renderização (engines). A integração de modelos gráficos nestas plataformas permitiu a criação dinâmica de aplicativos para dispositivos como smartphones e tablets, sem que haja perda de desempenho, devido a otimização de hardware realizada pelos motores.

II. RECENTES DESENVOLVIMENTOS

A. Aplicações recentes em BIM no contexto O&M

Visando a implementação do BIM no FM, Lin et al. [6] propuseram um plano de execução BIM para o gerenciamento de facilidades durante a fase de pré-operação, cujo objetivo é possibilitar o uso efetivo do BIM na fase de operação e manutenção. Por meio de definições e exames de projetos pilotos envolvendo FM e BIM, alguns pesquisadores propuseram uma cadeia de trabalho para a fundamentação do conhecimento em BIM no campo FM [7]. Marmo et al. [8] construíram um modelo de informação de edifícios e integração com sistemas de instalações e descreveu o processo de implementação desse método. Kula et al. [9] descreveram a operação e manutenção de um projeto de grande porte, no qual o BIM foi usado com auxílio de sistemas de gerenciamento de instalações. Por meio de entrevistas com empreiteiros da área de instalações elétricas e hidráulicas, Jang e Collige [10] estabeleceram as melhores práticas para a implementação do BIM no contexto de FM. Estes estudos têm em comum a preocupação com a organização da informação e sua captura nas outras fases, assim como será o seu uso, possibilitando a análise de que há um consenso na busca por um padrão que organize essas informações desde a sua coleta, armazenamento em um banco de dados até a sua análise durante os processos de operação e manutenção.

B. Manipulação do modelo gráfico em Realidade Aumentada

A integração de modelos BIM com a visualização em Realidade Aumentada (RA) tem sido usada como uma ferramenta de detecção crítica em diferentes cenários. Alguns exemplos demonstram que aplicações deste tipo permitiram a identificação de perigos potenciais em questões de acessibilidade em ambientes internos [11]. Análise de segurança da construção também representa um uso emergente dessa tecnologia com possibilidades de identificar perigos e realizar inspeções de segurança em canteiros de obras [12]. Em aplicações ao ar livre, a realidade aumentada tem sido usada para medir o número de áreas verdes em uma determinada paisagem, permitindo a conclusão sobre a necessidade de intervenções locais/urbanas no espaço verde [13]. A vinculação entre a modelagem paramétrica e a RA tem possibilitado visualizar uma forma inserida no ambiente real e manipulá-la intuitivamente por meio de transformações geométricas 3D [14][15]. Além de um retorno gráfico, este tipo de aplicativo permite que os usuários manipulem uma forma por tocar objetos reais enquanto compreende a geometria implicações das mudanças feitas nos virtuais [16]. Em diversos campos da engenharia, isso pode

representar uma comunicação entre projeto e construção, independentemente do método de construção utilizado, apoiando também a aprendizagem sobre os procedimentos de montagem [17]. Outra parte substancial das aplicações recentes permitiram supervisionar, colaborar e controlar sistemas digitais de fabricação. Em algumas dessas experiências, a RA permitiu os usuários avaliar a produção trajetórias dos equipamentos, empregando processos subtrativos como fresadoras CNC e impressão 3D [18][19], sobrepondo objetos virtuais e reais, antevendo problemas durante a fabricação por meio de feedback instantâneos constantes [20][21].

III. MÉTODO

As lacunas trabalhadas pelos estudos dizem respeito às dificuldades de implementação e criação de um plano de trabalho em BIM que facilite a transferência de informação das fases do ciclo de vida do processo de projeto até a operação e manutenção. Desse modo, esta pesquisa propôs um experimento em três fases: 1) seleção da amostra; 2) sistemas de modelagem; 3) console de operação e manutenção; buscando analisar as capacidades de um sistema em realidade aumentada em integrar informações de projeto com procedimentos de operação in loco.

A. Seleção da amostra

A amostra selecionada é um Transformador em funcionamento na Subestação (SE) de Mascarenhas de Moraes da Eletrobras (Centrais Elétricas Brasileiras S/A) integrada à UHE Mascarenhas de Moraes, localizada entre as usinas de Furnas e Luiz Carlos Barreto de Carvalho, e opera com tensões nos níveis de 345 kV e 138 kV (Fig. 1a). O dispositivo selecionado trata-se de um transformador (ou trafo) AT11 1x10-50 150MVA 11-33MVA 13.8/138/345 kV, destinado a transmitir energia elétrica ou potência elétrica de um circuito a outro, transformando tensões e correntes em um circuito de corrente alternada, ou a modificar os valores das impedâncias de um circuito elétrico (Fig. 1b).



Fig. 1a: Vista aérea da subestação de Mascarenhas de Moraes (20.28S, 47.06°) localizada no município de Ibiraci, Estado de Minas Gerais. Fonte: Eletrobras (Centrais Elétricas Brasileiras S/A.).

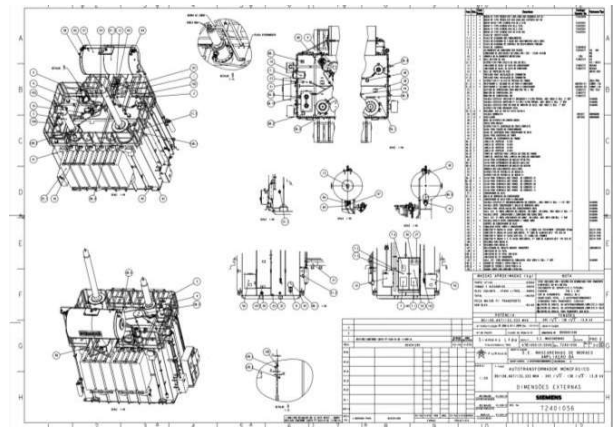


Fig. 1b: Uma das pranchas que compõe o *datasheet* do Transformador AT-11, em funcionamento na referida subestação. Fonte: Eletrobras (Centrais Elétricas Brasileiras S/A.).

B. Sistemas de modelagem

A produção de um modelo gráfico paramétrico partiu da recriação do Transformador AT-11 no ambiente virtual do aplicativo Inventor (Autodesk, Inc.), tendo como base informacional o *datasheet* deste dispositivo eletromecânico. Este conjunto de informações foram considerados parâmetros estáticos do ativo, isto é, um conjunto de dados inerentes à geometria dos modelos, os quais não serão alterados ao longo do ciclo de vida do equipamento (Fig. 2a). A transposição deste modelo para a plataforma BIM do aplicativo Revit (Autodesk, Inc.), se deu por meio da importação do formato nativo IPT no ambiente Revit (Autodesk, Inc.), sem perdas significativas de informação, um vez que as plataformas são de mesma empresa. No formato RVT foi proposta uma separação semântica de componentes e a constituição de parâmetros variáveis, relativos aos processos de operação e manutenção (Fig. 2b).

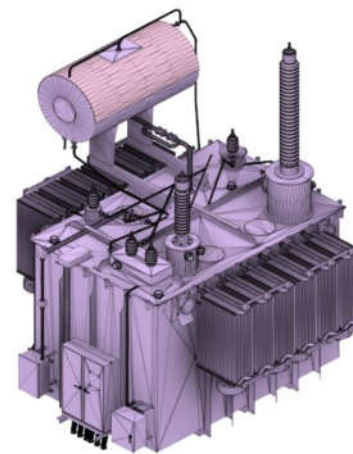


Fig. 2a: Modelo do Inventor (Autodesk, Inc) com o conjunto persistente de informações vinculadas a partir do *datasheet*. Fonte: Autores (2023).

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir de um protótipo físico (Fig. 4a) produziu uma aplicação (apk) para os sistemas operacionais Windows e Android em Realidade Aumentada, visando um suporte à colaboração multiusuário (Fig. 4b-c). A partir desse sistema, buscou-se a constituição do Nível de Informação Necessária (LoIN) aos processos de O&M do dispositivo eletromecânico, reduzindo os Níveis de Desenvolvimento (LOD) e os Níveis de Informação (LOI) da solução BIM. Do ponto de vista de precisão, a triangulação a partir de quatro marcaadores se mostrou satisfatória aos propósitos práticos, proporcionando um encaixe praticamente coincidente com o modelo físico. Considerando a redução da escala 1:25, a precisão mensurada foi de cerca de 2 milímetros, o que representa uma precisão escalar de aproximadamente 50 milímetros ou 5 centímetros em escala real. Do ponto de vista da sobreposição de objetos virtuais no ambiente real, denominada por oclusão, o console apresentou uma funcionalidade suficiente para o caso do Transformador AT11, por se tratar de um objeto integral, isto é, sem muitas regiões consideradas como internas e externas. Em termos de performance computacional, as ferramentas Unity Engine e Vuforia responderam com elevada rapidez em comparação com outros modos de visualização e manipulação do modelo BIM a partir de smartphones.

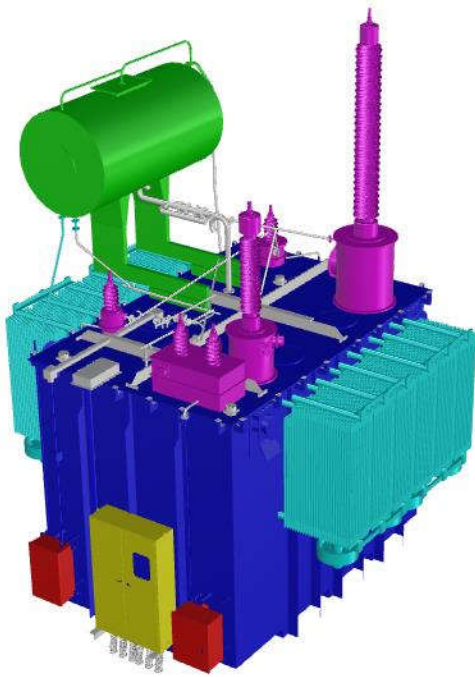


Fig. 2b: modelo BIM no Revit (Autodesk, Inc.) com a proposição de uma separação semântica baseada nos processos O&M (corpo = azul, arrefecimento = ciano, comando = amarelo, proteção = vermelho, conexões = magenta, tanque = verde). Fonte: Autores (2023).

C. Console de operação e manutenção

O experimento utilizou um protótipo físico na escala 1:25 como um controle às propriedades de precisão e oclusão e um sistema de marcadores simples que captura e reconhece a posição de um marcador e, então, exibe parâmetros do modelo sobrepondo a filmagem da câmera ao vivo em uma tela bidimensional. Para reconhecer o marcador e exibir as instruções de montagem, construiu-se um aplicativo utilizando a Unity Engine (Unity Technologies) e Vuforia (PTC Inc.) desenvolvimento de software kit (SDK) para Unity (Fig. 3). O Vuforia SDK foi selecionado devido à sua capacidade de reconhecer marcadores fixos com precisão. Os roteiros e sequenciamento das fases de montagem do modelo de controle foi escrito usando a linguagem de programação C# no Visual Studio IDE (Microsoft Inc).

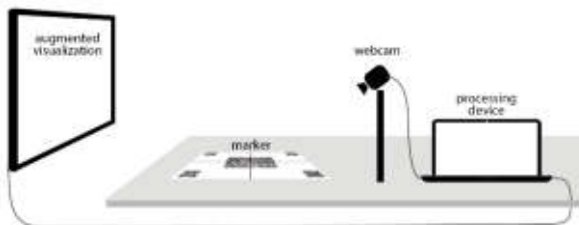


Fig. 3: Esquema do console de operação em realidade aumentada. Fonte: Autores (2023).

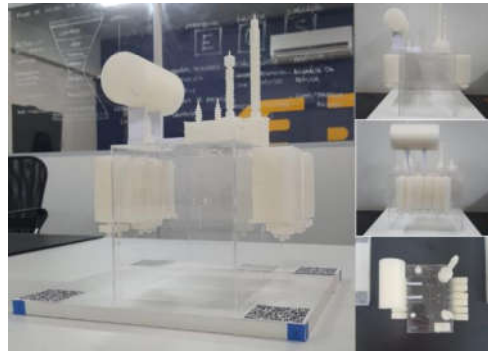


Fig. 4a: Prototipagem física do AT11 na escala 1:25 utilizando técnicas de prototipagem rápida com cortadora a laser e impressora 3D. Fonte: Autores (2023).

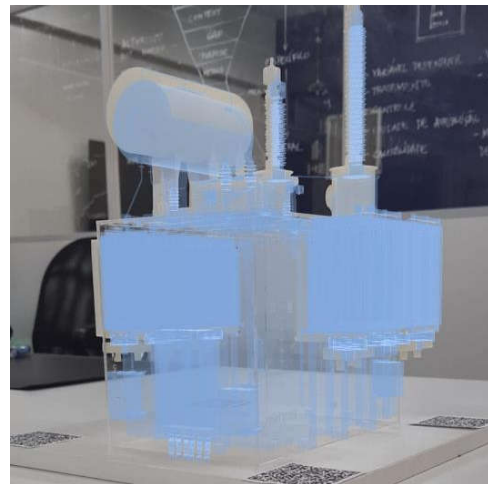


Fig. 4b: Modelo virtual sobreposto ao modelo físico. Fonte: Autores (2023).

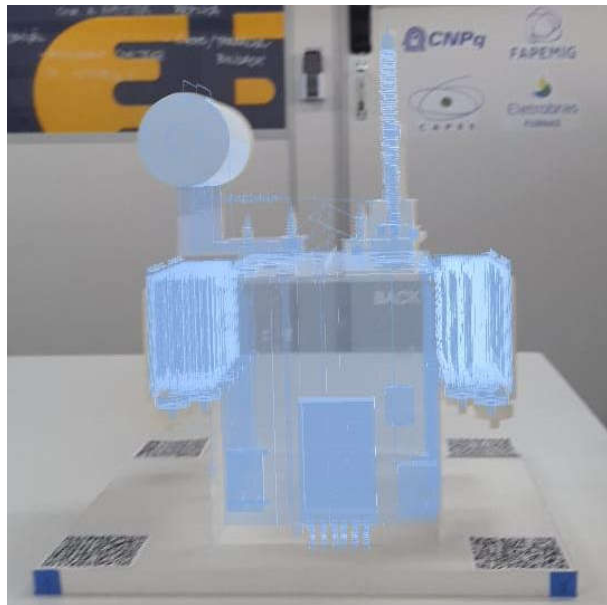


Fig. 4c: Modelo virtual sobreposto ao modelo físico em uma vista frontal.
Fonte: Autores (2023).

O modelo BIM permitiu vincular parâmetros de O&M passíveis de argumentação, neste caso, optou-se por uma representação das operações por meio de dados numéricos, booleanos e textuais. Essa vinculação foi feita de maneira direta, no Revit (Autodesk, Inc.). Esta base de dados gerada pela utilização do modelo BIM foi extraída em formato CSV (*Comma Separated Values*), a qual é aberta ao preenchimento de dados. Bastante semelhantes a conexões com planilhas Excel, as conexões com banco de dados via CSV ou TXT se diferem apenas na possibilidade de serem vinculadas a bancos de dados tipo Access ou SQL, o que permite o uso de formulários que conferem mais confiança aos processos. Por outro lado, estes bancos de dados possuem capacidade de armazenamento e permitem criação de regras para validação de dados, contribuindo para uma maior confiabilidade do processo. Contudo, dependem de customização e investimentos em recursos técnicos. É importante definir em um procedimento formal o fluxograma de conexão dos dados e os formatos a serem utilizados.

No arquivo CSV, os valores das células são dispostos conforme uma planilha, com textos divididos por uma vírgula a cada célula. Assim como em uma planilha, cada linha é dividida por uma quebra de linha. Na transferência do arquivo CSV, é fundamental a inclusão de aspas a qualquer célula cujo valor tenha vírgulas ou quebras de linha, justamente por serem caracteres responsáveis pela separação entre células e linhas da planilha. Desse modo, o CSV converte em texto os valores finais de cada célula e neste caso, optou-se pela conversão uma em matriz bidimensional de valores, de modo as informações pudessem ser acessadas na planilha utilizando as mesmas coordenadas de posicionamento da tabela inicial. Na Fig. 5a mostra-se a abertura de parâmetros vinculados ao AT11 no

Revit (Autodesk, Inc.) e, na Fig. 5b a sua interface de operação desenvolvida na Unity Engine.

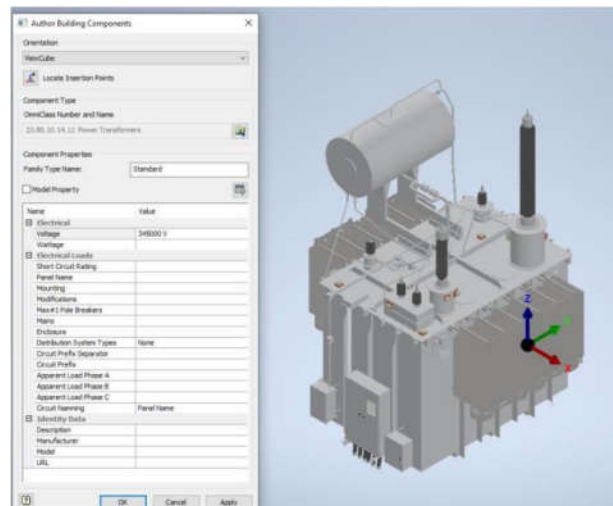


Fig. 5a: Exploração de possibilidade de operação com o modelo BIM após a finalização das etapas de projeto com abertura de parâmetros de O&M estabelecidos no Revit (Autodesk, Inc.) após a importação do modelo gráfico do dispositivo eletromecânico no Inventor (Autodesk, Inc.).
Fonte: Autores (2023)



Fig. 5b: Interface de operação do ativo na Unity Engine trazendo o modelo BIM e parâmetros em CSV. Fonte: Autores (2023).

Embora o CSV tenha apresentado características importantes, como a rapidez relacionada com o retorno gráfico imediato ao console de realidade aumentada, a sua utilização no contexto da Unity Engine acaba por desconsiderar o modelo BIM pós-projeto, que por sua vez ficará armazenado em nuvem, como a ConstructCloud (Autodesk, Inc.). Uma condição mais interessante nos processos O&M seria a atualização do modelo BIM diretamente na nuvem fazendo com que o modelo de projeto participe ativamente do ciclo de vida do dispositivo eletromecânico. Possibilidade de subsequentes desta pesquisa deve incluir também testes in loco com o modelo em tamanho real e, em um estágio mais avançado, o reconhecimento direto do ativo a partir das câmeras, verificando coincidências com o modelo em realidade aumentada. Isso dispensaria o uso dos marcadores em QRCode, tornando o processo ainda mais integrado.

V. CONCLUSÕES

A transferência e armazenamento de informações constituem lacunas quando o uso BIM modelo de registro é abordado, pois o repasse de informações de uma fase para outra é o ponto importante para que o modelo tenha relevância ao ser gerido em outras fases. Relacionado ao modelo de registro, a gestão de ativos é um processo de organização para o gerenciamento de sistemas que serão usados na operação e manutenção dos ativos. As práticas BIM são largamente focadas nas fases de design e construção, porém análises sobre as necessidades da Engenharia Elétrica e em como são feitos os processos necessários para a operação e manutenção, mostram que o maior benefício do BIM para as subestações está no uso Gestão de ativos. Além dos avanços das normas para padronizar as informações dos ativos são necessárias formalizações e padronizações dos requisitos BIM em contextos específicos das atividades de geração e transmissão de energia elétrica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às instituições brasileiras: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por meio da Eletrobras (Centrais Elétricas Brasileiras S.A.), pelo suporte financeiro ao projeto de P&D: Desenvolvimento de metodologia utilizando o conceito BIM aplicado a projetos de subestações integrado à Sistema de Informação Geográfica (GIS) e ao Enterprise Resource Planning (ERP) em parceria com Universidade Federal de Uberlândia, por meio do Grupo de Realidade Virtual e Aumentada (GRVA) e do Laboratório de Modelagem Baseada em Informação (INFORMA3D).

REFERÊNCIAS

- [1] R. Sacks, C. Eastman, P. Teicholz, L. Ghang, E. Toledo, S. Scheer, "Manual de BIM: Um Guia de Modelagem da Informação da Construção para Arquitetos, Engenheiros, Gerentes, Construtores e Incorporadores," 3. ed. São Paulo: Bookman, 2021.
- [2] B. Kolarevic, A. Malkawi, (Ed.) "Performative Architecture: Beyond Instrumentality," Londres: Spon Press, 2005.
- [3] P. Telchoz. BIM for facility managers. New York: John Wiley & Sons, 2013.
- [4] J. Won, G. Lee, C. Dossick, J. Messner, "Where to Focus for Successful Adoption of Building Information Modeling within Organization," *Journal of Construction Engineering and Management*, 139, 2013.
- [5] X. Gao, P. Pishdad-Bozorgi, "BIM-enabled facilities operation and maintenance: A review. *Advanced Engineering Informatics*," *Advanced Engineering Informatics*, v. 39, 2019. DOI: 10.1016/j.aei.2019.01.005.
- [6] Y. Lin, Y. Chen, W. Huang, C. Hong, "Development of BIM Execution Plan for BIM Model Management during the Pre-Operation Phase: A Case Study. *Buildings*", 6, 8, 2016. DOI: 10.3390/buildings6010008. Acesso em: 24 set. 2021.
- [7] P. Pishdad-Bozorgi, X. Gao, C. Eastman and A. Self, "Planning and developing facility management-enabled building information model (FM-enabled BIM)," *Automation in Construction*, 87, 22-38, 2018. DOI: /doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.004
- [8] R. Marmo, M. Nicoletta, F. Polverino, A. Tibaut, "A Methodology for a Performance Information Model to Support Facility Management Sustainability," 11, 7007, 2019. DOI:10.3390/su11247007.
- [9] B. Kula, E. Ergen. Implementation of a BIM-FM Platform at an International Airport Project: Case Study. *J. Constr. Eng. Manage*, v. 4, p. 174, 2021. DOI:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002025.
- [10] R. Jang, W. Collinge, Improving BIM asset and facilities management processes: A Mechanical and Electrical (M&E) contractor perspective. *Journal of Building Engineering*, 32, 101540, 2020. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101540.
- [11] S. Eloy, L. Dias, L. Ourique, M. Dias, "Home Mobility Hazards Detected via Object Recognition in Augmented Reality," *ECAADE*, vol. 1, pp. 415-422, September 2019 [Proceedings 37th Architecture in the age of the 4th revolution, Porto, p. 835, 2019].
- [12] X. Li, W. Yi, H. Chi, X. Wang, A. Chan, "A critical review of virtual and augmented reality (VR/AR) application in construction safety," *Automation in Construction*, vol. 86, pp. 150-162, November 2017.
- [13] T. Fukuda, K. Inoue, N. Yabuki, "PhotoAR+DR2016: integrating automatic estimation of green view index and augmented and diminished reality for architectural design simulation," *ECAADE*, vol. 1, pp. 241-250, September 2017 [Proceedings 35th Sharing of computable knowledge, Rome, p. 769, 2017].
- [14] A. Coppens, T. Mens, M. Gallas, "Parametric modelling within immersive environments building a bridge between existing tools and virtual reality headsets" *ECAADE*, vol. 2, pp. 711-726, September 2018 [Proceedings 35th Computing for a better tomorrow, Łódź, p. 860, 2018].
- [15] Y. Fukumoto, T. Yanagimachi, M. Nozawa, Y. Ishida, "Sangaku presented by augmented reality: an educational tool for geometry" *Advances in Smart Systems Research*, vol. 4, pp. 17-24, 2015.
- [16] Z. Chen, C. Liao, C. Chu, "An assembly guidance system of tou kung based on augmented reality," *CAADRIA*, vol. 1, pp. 349-358, May 2018 [Proceedings 35th Learning, Prototyping and Adapting, Beijing, p. 762, 2018].
- [17] U. Abe, K. Hotta, Y. Takami, H. Ikeda, Y. Ikeda, "Digital construction: demonstration of interactive assembly using smart discrete papers with RFID and AR codes," *CAADRIA*, vol. 1, pp. 75-84, May 2017 [Proceedings 35th Protocols, flows, and glitchers, Suzhou, p. 658, 2017].
- [18] A. Bartosh, P. Anzalone, "Experimental applications of virtual reality in design education," *ACADIA*, vol. 1, pp. 458-467, September 2019 [Proceedings 39th Ubiquity and autonomy, Austin, p. 642, 2019].
- [19] G. Goepel, "Augmented construction: impact and opportunity of mixed reality integration in architectural design implementation," *ACADIA*, vol. 1, pp. 430-437, September 2019 [Proceedings 39th Ubiquity and autonomy, Austin, p. 642, 2019].
- [20] S. Chaltiel, M. Bravo, A. Chronis, "Digital fabrication with virtual and augmented reality for monolithic shells" *ECAADE*, vol. 1, pp. 211-218, September 2017 [Proceedings 35th Sharing of computable knowledge, Rome, p. 769, 2017].
- [21] G. Betti, G. Aziz, S. Ron, "Pop up factory: collaborative design in mixed reality interactive live installation for the make city festival, 2018 Berlin," *ECAADE*, vol. 1, pp. 115-124, September 2019 [Proceedings 37th Architecture in the age of the 4th revolution, Porto, p. 835, 2019].