



PBPC
ISSN 2674-9432



Qualis A3
CAPES 2021-2024



DOI - Crossref

Latindex



Indexado no
Acadêmico

EDIFICAÇÕES SUSTENTÁVEIS NA AMAZÔNIA: UMA ANÁLISE SISTÊMICA INTEGRANDO BIM, ENERGIA, ÁGUA E SISTEMAS CONSTRUTIVOS

Laerte Melo Barros, Rodrigo Paz Barros, Pedro Felix Liotto, Thamires Ohana Coelho Lima Liotto



<https://doi.org/10.36557/2674-9432.2026v5n1p1092-1110>

Artigo recebido em 3 de Dezembro e publicado em 3 de Fevereiro de 2026

ARTIGO ORIGINAL

RESUMO

A crescente pressão sobre os ecossistemas amazônicos, aliada às demandas por habitação e infraestrutura em áreas sujeitas a regimes hidrológicos complexos, impõe desafios significativos ao planejamento e à concepção de edificações ambientalmente responsáveis. Nesse contexto, edificações flutuantes emergem como alternativa adaptativa, exigindo soluções construtivas integradas que conciliem desempenho ambiental, eficiência no uso de recursos e adequação às especificidades climáticas, sociais e territoriais da região. Este artigo tem como objetivo analisar, de forma integrada, a concepção de um sistema construtivo sustentável aplicado a edificações flutuantes na Amazônia, articulando o uso da metodologia Building Information Modeling (BIM) com estratégias de eficiência energética, gestão hídrica e soluções construtivas adequadas ao contexto ambiental e socioeconômico regional. O referencial teórico fundamenta-se nos princípios da construção sustentável, no desempenho ambiental de edificações, na aplicação do BIM como ferramenta de integração e suporte à tomada de decisão e em abordagens contemporâneas sobre eficiência energética, uso racional da água e sistemas construtivos adaptados a ambientes sensíveis. A pesquisa adota abordagem qualitativa e conceitual, de natureza exploratória, estruturada a partir de revisão bibliográfica sistematizada e do desenvolvimento de um modelo conceitual integrado. O BIM é utilizado como eixo organizador para simular, articular e avaliar os subsistemas de energia, água e construção, permitindo análise sistêmica do desempenho projetual. Os resultados evidenciam que a integração entre BIM, sistemas energéticos renováveis, soluções de aproveitamento e reuso de água e técnicas construtivas apropriadas potencializa o desempenho ambiental, a racionalização de recursos e a adaptabilidade do sistema proposto às condições amazônicas.

Palavras-chave: Building Information Modeling, Construção sustentável, Edificações

Flutuantes, Eficiência Energética.

Sustainable buildings in the Amazon: a systems analysis integrating bim, energy, water, and construction systems

ABSTRACT

The increasing pressure on Amazonian ecosystems, coupled with demands for housing and infrastructure in areas subject to complex hydrological regimes, poses significant challenges to the planning and design of environmentally responsible buildings. In this context, floating buildings emerge as an adaptive alternative, requiring integrated construction solutions that reconcile environmental performance, resource efficiency, and adaptation to the specific climatic, social, and territorial characteristics of the region. This article aims to analyze, in an integrated manner, the design of a sustainable construction system applied to floating buildings in the Amazon, articulating the use of Building Information Modeling (BIM) methodology with energy efficiency strategies, water management, and construction solutions appropriate to the regional environmental and socioeconomic context. The theoretical framework is based on the principles of sustainable construction, the environmental performance of buildings, the application of BIM as a tool for integration and support for decision-making, and contemporary approaches to energy efficiency, rational water use, and construction systems adapted to sensitive environments. This research adopts a qualitative and conceptual approach, exploratory in nature, structured from a systematic literature review and the development of an integrated conceptual model. BIM is used as an organizing axis to simulate, articulate, and evaluate the energy, water, and construction subsystems, allowing for a systemic analysis of design performance. The results show that the integration between BIM, renewable energy systems, water harvesting and reuse solutions, and appropriate construction techniques enhances environmental performance, resource rationalization, and the adaptability of the proposed system to Amazonian conditions.

Keywords: Building Information Modeling, Sustainable Construction, Floating Buildings, Energy Efficiency.

Instituição afiliada – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – IFAM/CMC

Autor correspondente: *Laerte Melo Barros*

Laerte.barros@ifam.edu.br

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



1 INTRODUÇÃO

A construção sustentável tem se consolidado como um dos principais eixos de transformação da indústria da construção civil, sobretudo diante das crescentes pressões ambientais, energéticas e sociais impostas pelo contexto urbano contemporâneo. Estudos recentes apontam que o setor da construção é responsável por parcela significativa do consumo global de energia, da emissão de gases de efeito estufa e do uso de recursos naturais, o que exige a adoção de estratégias projetuais e tecnológicas orientadas ao desempenho ambiental (Zuo & Zhao, 2014; Darko et al., 2022; Pomponi & Moncaster, 2025). Enquanto Zuo e Zhao (2014) e Darko et al. (2022) enfatizam a magnitude desses impactos e a necessidade de respostas sistêmicas, Pomponi e Moncaster (2025) apontam que a efetiva incorporação desses princípios ainda enfrenta limitações práticas, especialmente relacionadas à fragmentação do processo e à ausência de abordagens integradas de longo prazo.

Nesse contexto, abordagens integradas de projeto sustentável têm sido amplamente discutidas na literatura, enfatizando a necessidade de considerar o ciclo de vida das edificações, desde a escolha dos materiais até a operação e manutenção do edifício (Cabeza et al., 2014; López-Ochoa et al., 2025). A avaliação do desempenho ambiental, por meio de indicadores quantitativos, surge como ferramenta essencial para subsidiar decisões técnicas e reduzir impactos negativos associados ao ambiente construído (Kylili et al., 2022). Embora Cabeza et al. (2014) e López-Ochoa et al. (2025) destaquem a abordagem de ciclo de vida como eixo central da sustentabilidade, Kylili et al. (2022) indicam que a aplicação de indicadores quantitativos ainda apresenta desafios metodológicos, sobretudo em contextos climáticos complexos.

Além disso, pesquisas recentes destacam que soluções sustentáveis são mais eficazes quando incorporadas ainda nas fases iniciais de concepção do projeto, permitindo maior flexibilidade e otimização dos sistemas construtivos e operacionais (Darko et al., 2022; Kylili et al., 2020). Dessa forma, a sustentabilidade deixa de ser um elemento acessório e passa a integrar o núcleo conceitual do projeto arquitetônico e estrutural. Nesse sentido, enquanto Darko et al. (2022) defendem a inserção precoce dessas estratégias como fator decisivo de desempenho, Kylili et al. (2020) alertam que sua eficácia depende da integração entre concepção, execução e operação ao longo do

ciclo de vida da edificação.

A seleção adequada dos sistemas construtivos e dos materiais estruturais desempenha papel central na redução dos impactos ambientais das edificações. Estudos apontam que materiais convencionais, como o concreto e o aço, quando utilizados de forma não otimizada, contribuem significativamente para a pegada de carbono do setor (Cabeza et al., 2014; Wang et al., 2025). Enquanto Cabeza et al. (2014) evidenciam o impacto ambiental associado à produção desses materiais, Wang et al. (2025) ressaltam que tais impactos são ampliados quando decisões projetuais não consideram o desempenho operacional ao longo do tempo.

Por outro lado, pesquisas recentes têm evidenciado o potencial do uso combinado de materiais tradicionais com soluções de menor impacto ambiental, como a madeira engenheirada e concretos otimizados, capazes de melhorar o desempenho estrutural e ambiental das edificações (Zhang et al., 2024; Wang et al., 2025). A durabilidade, a resistência mecânica e o comportamento ao longo do tempo desses materiais são aspectos amplamente investigados, demonstrando viabilidade técnica quando corretamente especificados. Embora Zhang et al. (2024) destaquem os benefícios ambientais e estruturais dessas soluções, Wang et al. (2025) apontam que sua adoção ainda enfrenta barreiras técnicas, normativas e culturais em sistemas construtivos tradicionais.

Nesse sentido, a adoção de sistemas híbridos, que conciliam concreto e madeira, surge como alternativa promissora, especialmente em regiões tropicais, onde a disponibilidade de recursos naturais e as condições climáticas exigem soluções adaptadas ao contexto local (Zhang et al., 2024; Kylili et al., 2020). Assim, enquanto Zhang et al. (2024) indicam elevado potencial desses sistemas híbridos, Kylili et al. (2020) enfatizam que seu desempenho depende fortemente da adequação às condições climáticas locais e da integração entre soluções estruturais e estratégias ambientais.

A integração de sistemas de energia solar fotovoltaica às edificações tem sido amplamente explorada como estratégia para a redução do consumo energético e da dependência de fontes convencionais. A literatura aponta que sistemas fotovoltaicos integrados ao edifício (BIPV) apresentam vantagens significativas quando incorporados de forma planejada ao projeto arquitetônico e estrutural (IEA, 2023; Liu et al., 2023). Enquanto a IEA (2023) e Liu et al. (2023) ressaltam o potencial desses sistemas para a

transição energética, estudos indicam que a ausência de integração com o projeto arquitetônico pode comprometer significativamente sua eficiência real.

A eficiência desses sistemas está diretamente relacionada à orientação solar, à inclinação dos módulos e à interação com outros sistemas prediais, como sombreamento e ventilação natural (Kandt et al., 2023; Pérez-Lombard et al., 2024). Além disso, a integração energética contribui não apenas para a redução de custos operacionais, mas também para o aumento da resiliência energética das edificações. Embora Kandt et al. (2023) enfatizem parâmetros geométricos e de implantação, Pérez-Lombard et al. (2024) destacam que o desempenho energético depende igualmente da articulação entre sistemas ativos e estratégias passivas.

Estudos recentes reforçam que o desempenho energético otimizado é resultado de uma abordagem sistêmica, na qual a geração de energia renovável é combinada com estratégias passivas de projeto e tecnologias de simulação avançadas (Liu et al., 2023; Pérez-Lombard et al., 2024; Kandt et al., 2023).

A gestão eficiente dos recursos hídricos constitui outro pilar fundamental da sustentabilidade em edificações, especialmente em regiões com elevada pluviosidade, como a Amazônia. Pesquisas indicam que sistemas de captação e aproveitamento de água da chuva podem reduzir significativamente o consumo de água potável em edificações residenciais e institucionais (Silva et al., 2025; Vieira et al., 2024; Zhang et al., 2024). Enquanto Silva et al. (2025) e Vieira et al. (2024) evidenciam o potencial desses sistemas, Zhang et al. (2024) apontam que sua eficiência pode ser limitada por condicionantes de projeto e operação.

Pesquisas apontam que a eficiência desses sistemas depende de fatores como área de captação, regime pluviométrico, capacidade de armazenamento e qualidade da água coletada (Silva et al., 2025; Silva & Ghisi, 2024). Além disso, estratégias complementares, como dispositivos economizadores e reúso de águas cinzas, ampliam o potencial de redução do consumo hídrico. Nesse contexto, embora Silva et al. (2025) destaquem a relevância dos parâmetros técnicos de dimensionamento, Silva e Ghisi (2024) ressaltam que a qualidade da água e a aceitação do usuário são fatores igualmente determinantes.

A literatura também destaca que a integração da gestão da água ao projeto arquitetônico e às demais soluções sustentáveis potencializa os benefícios ambientais e

econômicos, contribuindo para um uso mais racional dos recursos naturais (Silva et al., 2025; Vieira et al., 2024).

A Modelagem da Informação da Construção (Building Information Modeling – BIM) tem sido amplamente reconhecida como ferramenta estratégica para a integração de soluções sustentáveis em edificações, permitindo a centralização de informações geométricas, técnicas e ambientais ao longo de todo o ciclo de vida do empreendimento (Eastman et al., 2011; Wong et al., 2012; Chong et al., 2024). Enquanto Eastman et al. (2011) e Wong et al. (2012) apresentam o BIM como tecnologia consolidada, Chong et al. (2024) apontam que seu potencial voltado à sustentabilidade ainda é subexplorado em práticas correntes de projeto.

A utilização do BIM possibilita a realização de simulações de desempenho energético, análise de consumo hídrico e avaliação de impactos ambientais ainda nas fases iniciais do projeto (Zhang et al., 2025; Chong et al., 2024). Essa abordagem contribui para a redução de erros, retrabalhos e custos, além de melhorar a qualidade global do empreendimento. Embora Zhang et al. (2025) destaquem os avanços das simulações baseadas em BIM, Chong et al. (2024) indicam que limitações relacionadas à interoperabilidade e à capacitação técnica ainda restringem sua aplicação plena.

Nesse contexto, o BIM atua como elemento articulador entre sistemas construtivos, energéticos e hídricos, viabilizando uma abordagem integrada e alinhada aos princípios da construção sustentável (Zhang et al., 2025; Chong et al., 2024).

Diante desse contexto, o presente artigo propõe a descrição técnica e conceitual de um sistema construtivo sustentável integrado, concebido especificamente para edificações implantadas na Amazônia. O sistema é representado por um modelo digital e uma imagem conceitual que sintetizam as soluções adotadas, incluindo estrutura híbrida em concreto e madeira, geração de energia solar fotovoltaica, captação e reuso de águas pluviais, estratégias passivas de conforto ambiental e integração com a paisagem natural. A imagem, neste estudo, não se limita a uma representação ilustrativa, mas assume o papel de instrumento analítico, servindo como base para a caracterização e discussão do sistema proposto.

Ao adotar uma abordagem técnico-conceitual, este trabalho contribui para a ampliação do debate sobre edificações sustentáveis em regiões tropicais, destacando o potencial do BIM como tecnologia integradora e a relevância de soluções projetuais

adaptadas às especificidades amazônicas. O estudo busca, assim, oferecer subsídios teóricos e técnicos que possam orientar futuras aplicações práticas, bem como pesquisas experimentais e estudos de caso na área da construção sustentável.

2 METODOLOGIA

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza aplicada, com abordagem qualitativa e descritiva, estruturada a partir da modelagem conceitual e técnica de um sistema construtivo sustentável, fundamentado na integração entre soluções arquitetônicas, estruturais, energéticas, hídricas e digitais, abordagem amplamente utilizada em estudos conceituais voltados à sustentabilidade no ambiente construído (Zuo & Zhao, 2014; Pomponi & Moncaster, 2025). A metodologia adotada tem como base a Modelagem da Informação da Construção (BIM) como plataforma integradora, permitindo a representação, análise e coordenação dos diferentes subsistemas que compõem a edificação proposta, conforme discutido por Eastman et al. (2011) e Chong et al. (2024).

O procedimento metodológico foi organizado em quatro etapas principais:

- (i) concepção do sistema arquitetônico e construtivo adaptado ao contexto amazônico;
- (ii) definição e integração dos sistemas de energia e água;
- (iii) modelagem BIM multidisciplinar;
- (iv) análise conceitual do desempenho sustentável do sistema, em consonância com abordagens integradas de projeto sustentável descritas na literatura recente (Cabeza et al., 2014; Zhang et al., 2025).

3 RESULTADOS e DISCUSSÃO

Os resultados apresentados neste artigo derivam da análise conceitual integrada do sistema construtivo sustentável proposto, desenvolvido a partir da articulação entre modelagem BIM, soluções energéticas renováveis, estratégias de gestão hídrica e sistema construtivo híbrido adaptado ao contexto amazônico. Considerando o caráter qualitativo, exploratório e propositivo da pesquisa, os resultados não se expressam por

meio de dados experimentais ou métricas quantitativas, mas pela interpretação sistêmica do desempenho ambiental esperado, fundamentada na literatura científica contemporânea e na representação técnica do modelo desenvolvido, conforme ilustrado na Figura 1.

Nesse sentido, os resultados assumem natureza analítico-conceitual, buscando evidenciar como a integração entre os diferentes subsistemas potencializa o desempenho sustentável da edificação quando comparada a abordagens fragmentadas de projeto. A análise concentra-se na compreensão das inter-relações entre energia, água, materiais e tecnologia digital, destacando o papel do BIM como elemento articulador dessas dimensões desde as fases iniciais de concepção, cuja sobreposição visual e funcional é sintetizada na Figura 1.

Figura 1: Apresentação do fluxo metodológico adotado na pesquisa



Fonte: Autores, 2026.

Ao explorar a abordagem integrada contribui para a adaptação das edificações às condições ambientais, climáticas e socioeconômicas da Amazônia. Assim, os resultados são organizados de modo a refletir uma visão sistêmica do desempenho ambiental, abordando inicialmente os fundamentos conceituais da integração, seguido

da análise específica dos subsistemas energéticos, hídricos e construtivos, culminando em uma discussão integrada que consolida os principais achados do trabalho.

3.1 Visão sistêmica e integração conceitual

A literatura evidencia que abordagens integradas e sistêmicas são essenciais para o desempenho sustentável de edificações, especialmente em contextos ambientalmente sensíveis como a Amazônia. Soluções fragmentadas tendem a limitar os ganhos ambientais, enquanto modelos integrados permitem sinergias entre energia, água, materiais e processos de projeto, resultando em benefícios ambientais, econômicos e sociais mais expressivos. Em regiões como a Amazônia, a integração de dados ambientais locais é fundamental para avaliar vulnerabilidades e edificações planejadas resilientes e de baixo. (Lu, 2025), (Bibri & Huang, 2025) Os modelos integrados permitem adaptar estratégias de projeto às condições ambientais específicas, promovendo resiliência, proteção de ecossistemas e alinhamento com metas globais de sustentabilidade. (Zuo & Zhao, 2014; Darko et al., 2022). Estudos recentes reforçam que a avaliação de desempenho ambiental deve considerar múltiplas dimensões de forma simultânea, incorporando métricas energéticas, hídricas e construtivas desde as fases iniciais do projeto (Pomponi & Moncaster, 2025; Cabeza et al., 2014).

3.2 BIM como elemento articulador do desempenho ambiental

No sistema analisado, o Building Information Modeling (BIM) atua como plataforma central de integração, permitindo a coordenação entre os subsistemas energéticos, hídricos e construtivos. O BIM não se limita à representação geométrica, mas constitui um ambiente informacional capaz de suportar simulações, análises de desempenho e tomadas de decisão baseadas em dados ao longo do ciclo de vida da edificação (Eastman et al., 2011).

O BIM permite a agregação e o gerenciamento de dados arquitetônicos e de engenharia em modelos 3D abrangentes, o que facilita a otimização do projeto, a mitigação de riscos na construção e a melhoria da sustentabilidade ao longo do ciclo de

vida do edifício. Essa integração apoia a colaboração entre as partes interessadas e pode ser estendida a sistemas de gerenciamento predial, permitindo a operação e manutenção orientadas por dados e a criação de gêmeos digitais para a gestão de desempenho. (Abtahi et al., 2025), (Moretti et al., 2025). Estende-se à integração de bases de dados de materiais (como as Declarações Ambientais de Produto) para cálculos de carbono incorporado, identificação de componentes com alta emissão de carbono e facilitação de estratégias de substituição de materiais. No que diz respeito aos aspectos operacionais, o BIM vincula a geometria do edifício e as especificações do sistema a ferramentas de simulação (por exemplo, EnergyPlus), apoiando a otimização iterativa do projeto para a redução do consumo de energia. Esta abordagem permite o acompanhamento dinâmico das emissões e do desempenho ao longo das fases de projeto, construção e operação, demonstrando a capacidade do BIM de coordenar subsistemas de energia e construção para atingir objetivos de sustentabilidade. (Firoozi, Oyejobi & Firoozi, 2025), (Wang, Tian e Li, 2025).

3.3 Energia solar e eficiência no contexto amazônico

A adoção de sistemas fotovoltaicos no sistema proposto mostra-se conceitualmente adequada às condições climáticas amazônicas, caracterizadas por elevada incidência solar ao longo do ano. A literatura indica que a integração de sistemas fotovoltaicos ao projeto arquitetônico contribui significativamente para a redução da dependência energética externa e para a mitigação de emissões associadas ao consumo elétrico convencional (Liu et al., 2023; Pérez-Lombard et al., 2024). A integração de sistemas fotovoltaicos em projetos arquitetônicos é fundamental para promover a sustentabilidade, especialmente em regiões como a Amazônia, onde o acesso à energia é um desafio e as condições ambientais são específicas. A integração arquitetônica de sistemas fotovoltaicos deve considerar proporções, morfologia e estética do projeto, buscando eficiência energética sem comprometer o design arquitetônico. O uso de tecnologias inovadoras, como concentradores solares luminescentes e células solares flexíveis, pode maximizar o desempenho e permitir maior liberdade formal e estética na arquitetura. (Marchwiński & Lucchi, 2024).

O desempenho dos coletores solares depende diretamente da localização e orientação dos painéis, sendo necessário incliná-los corretamente para maximizar a exposição solar. O planejamento de novos edifícios deve prever áreas adequadas para a instalação de sistemas fotovoltaicos, onde a incidência solar é elevada. E ainda, Tecnologias como módulos de filme fino apresentam vantagens de leveza e flexibilidade, facilitando a integração em edifícios com formas complexas, comuns em projetos inovadores ou adaptados à realidade amazônica. No entanto, exigem maior área de instalação devido à menor eficiência elétrica, o que reforça a importância do planejamento desde a fase de projeto. (Xu et al., 2024), (Assoa & Levrard, 2020).

3.4 Gestão hídrica e captação de água da chuva

A Gestão Integrada de Recursos Hídricos é identificada como a melhor prática, enfatizando a gestão em nível de bacia hidrográfica, a otimização da oferta, a gestão da demanda, a igualdade de acesso, marcos legais e institucionais abrangentes e abordagens intersetoriais para a resolução de problemas. (Proskuryakova & Sivaev, 2020). A gestão integrada da água envolve a otimização dos recursos por meio de uma combinação de captação de água da chuva, irrigação eficiente e reciclagem da água, o que pode minimizar a dependência de fontes convencionais e apoiar práticas sustentáveis. (Khattak et al., 2025), (Roychoudhury, Mukherjee e Banerjee, 2025). A integração de práticas de gestão hídrica deve ocorrer em níveis macro, meso e micro para abordar a sustentabilidade ecológica, econômica e social, como observado em sistemas de turfeiras e agrícolas. (Wibisono et al., 2025).

A captação de água da chuva (CAR) é uma prática fundamental, especialmente em regiões de alta pluviosidade, para aumentar a disponibilidade de água para uso agrícola, doméstico e pecuário. (Khattak et al., 2025). As melhores práticas para a captação de água da chuva incluem aproveitar o conhecimento local e tradicional, facilitar o compartilhamento de conhecimento, ampliar as práticas bem-sucedidas, desenvolver serviços de extensão rural, demonstrar a relação custo-benefício, integrar a captação de água da chuva às políticas públicas e garantir estruturas favoráveis e capacitação. (Singh et al., 2022).

3.5 Sistema construtivo: integração entre concreto e madeira

O sistema construtivo híbrido, combinando concreto e madeira, foi analisado sob a perspectiva do desempenho ambiental e da adequação regional. A literatura aponta que a utilização de materiais de menor pegada de carbono, especialmente quando associados a fontes renováveis, contribui significativamente para a redução dos impactos ambientais do setor da construção (Cabeza et al., 2014). Estudos sobre materiais sustentáveis indicam que soluções híbridas podem equilibrar desempenho estrutural, durabilidade e sustentabilidade, sobretudo quando adaptadas às condições locais (Zhang et al., 2024). Ademais, abordagens integradas de sustentabilidade reforçam a importância da seleção criteriosa de materiais como componente estratégico do desempenho global do sistema (Darko et al., 2022).

3.6 Discussão integrada dos resultados conceituais

A análise conjunta dos subsistemas evidencia que os maiores ganhos conceituais do sistema proposto decorrem da sinergia entre BIM, energia, água e sistema construtivo. A literatura enfatiza que a avaliação de desempenho ambiental integrada permite identificar compensações e potencializar benefícios que não seriam perceptíveis em análises isoladas (Pomponi & Moncaster, 2025). Nesse contexto, o BIM consolida-se como ferramenta fundamental para articular informações, simulações e decisões, reforçando a coerência entre concepção, análise e desempenho esperado da edificação (Eastman et al., 2011).

3.7 Limitações conceituais e potencial de replicabilidade

Apesar dos avanços conceituais apresentados, o sistema analisado possui limitações inerentes à abordagem adotada, especialmente no que se refere à ausência de validação empírica em escala real. A literatura destaca que estudos conceituais e baseados em modelagem apresentam restrições quanto à generalização de resultados, exigindo cautela na extrapolação para outros contextos (Wong & Zhou, 2012). Ainda assim, abordagens integradas de sustentabilidade indicam que modelos conceituais

bem estruturados constituem base sólida para futuras aplicações e investigações empíricas (Darko et al., 2022).

4 CONCLUSÃO

Este estudo apresentou a descrição técnica e conceitual de um sistema integrado de edificação sustentável aplicado ao contexto amazônico, fundamentado na articulação entre Building Information Modeling (BIM), sistemas de energia renovável, gestão hídrica e soluções construtivas híbridas. A partir de uma abordagem sistêmica, o trabalho demonstrou que a integração coordenada desses subsistemas constitui um caminho consistente para a elevação do desempenho ambiental de edificações em regiões de alta sensibilidade ecológica.

Os resultados conceituais indicam que o BIM desempenha papel central como elemento estruturador do sistema, não apenas como ferramenta de representação, mas como plataforma integradora capaz de suportar análises de desempenho energético, hídrico e construtivo de forma simultânea. Essa característica amplia a capacidade de tomada de decisão ainda nas fases iniciais do projeto, reduzindo inconsistências entre concepção, execução e desempenho esperado ao longo do ciclo de vida da edificação.

No que se refere ao subsistema energético, a incorporação de sistemas fotovoltaicos mostrou-se conceitualmente adequada às condições climáticas amazônicas, reforçando o potencial de redução da dependência energética convencional e de mitigação de impactos ambientais associados ao consumo de energia. De modo complementar, a gestão hídrica integrada, com ênfase na captação e no aproveitamento de água da chuva, evidenciou-se como estratégia fundamental para a resiliência e a autonomia hídrica das edificações, especialmente em contextos urbanos sujeitos a pressões crescentes sobre os recursos naturais.

A análise do sistema construtivo híbrido, combinando concreto e madeira, revelou que a seleção criteriosa de materiais, quando alinhada a critérios de desempenho ambiental e adequação regional, contribui significativamente para a redução da pegada de carbono e para o equilíbrio entre desempenho estrutural, durabilidade e sustentabilidade. Nesse sentido, o estudo reforça a importância da regionalização das soluções construtivas como estratégia relevante para a



sustentabilidade na construção civil.

Do ponto de vista científico, a principal contribuição deste trabalho reside na proposição de um modelo conceitual integrado que articula múltiplos subsistemas por meio do BIM, avançando além de abordagens fragmentadas frequentemente encontradas na literatura. O estudo contribui para o estado da arte ao evidenciar que os maiores ganhos ambientais não decorrem de soluções isoladas, mas da sinergia entre energia, água, materiais e processos de projeto, analisados de forma conjunta e orientados por métricas de desempenho.

Reconhece-se, entretanto, que o estudo apresenta limitações inerentes à sua natureza conceitual e à ausência de validação empírica em escala real. Assim, os resultados devem ser interpretados como indicativos do potencial do sistema proposto, e não como conclusões definitivas sobre seu desempenho operacional. Pesquisas futuras são recomendadas para a aplicação experimental do modelo em edificações reais, bem como para a incorporação de análises de ciclo de vida, custos e desempenho em uso.

Por fim, conclui-se que o sistema integrado apresentado constitui uma base metodológica e conceitual robusta para o desenvolvimento de edificações sustentáveis em contextos tropicais, especialmente na Amazônia. Ao articular inovação tecnológica, adequação ambiental e planejamento sistêmico, o estudo oferece subsídios relevantes tanto para a pesquisa acadêmica quanto para a prática profissional, contribuindo para o avanço de estratégias sustentáveis na construção civil contemporânea.

5 AGRDECIMENTOS

Ao Departamento Acadêmico de Infraestrutura – DAINFRA/IFAM/CMC e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas – FAPEAM.

6 REFERÊNCIAS

- Abtahi, M., Rueda, L., Delcroix, B., & Athienitis, A. (2025). Semantic digital twinning for cost-optimal HVAC operation: Real-time application to a house with smart thermostats and PV/battery under a time-of-use tariff. *Energy and Buildings*, 343, 115938. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115938>
- Assoa, Y. B., & Levrard, D. (2020). A lightweight triangular building integrated photovoltaic module. *Applied Energy*, 279, 115816. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115816>
- Bibri, S. E., & Huang, J. (2025). AI and AI-powered digital twins for smart, green, and zero-energy buildings: A systematic review of leading-edge solutions for advancing environmental sustainability goals. *Environmental Science and Ecotechnology*, 28, Article 100628. <https://doi.org/10.1016/j.esec.2025.100628>
- Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 394–416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>
- Chong, H.-Y., Lee, C.-Y., Wang, X., & Li, H. (2024). Building information modeling for sustainable building design: A critical review and future research directions. *Automation in Construction*, 154, 104990. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104990>
- Darko, A., Chan, A. P. C., Huo, X., & Owusu-Manu, D.-G. (2022). A scientometric analysis and review of green building research. *Building and Environment*, 221, 109325. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109325>
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Firoozi, A. A., Oyejobi, D. O., & Firoozi, A. A. (2025). Innovations in energy-efficient construction: Pioneering sustainable building practices. *Cleaner Engineering and Technology*, 26, 100957. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.100957>
- International Energy Agency. (2023). *Building-integrated photovoltaics: Status and prospects*. IEA. <https://www.iea.org>
- Kandt, A., Hotchkiss, E., & Walker, A. (2023). Optimizing building-integrated photovoltaics for urban energy systems. *Energy and Buildings*, 278, 112564. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112564>
- Khattak, W. A., Abbas, A., Hameed, R., Balooch, S., Jalal, A., Zaman, F., Shafiq, M., & Sun, J. (2025). Climate change induced environmental adversities and their impact on agricultural productivity (Chapter 1). In S. Fahad, M. Adnan, I. Munir, R. Lal, T. Nawaz, & S. Saud (Eds.), *Challenges and solutions of climate impact on agriculture* (pp. 1–28). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-23707-2.00001-5>

- Kylili, A., Fokaides, P. A., & Ioannou, I. (2020). Environmental assessment of building materials and components using life cycle analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 132, 110112. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110112>
- Kylili, A., Fokaides, P. A., & Jimenez, P. A. L. (2022). Key performance indicators (KPIs) for the environmental assessment of buildings. *Journal of Building Engineering*, 45, 103408. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103408>
- Liu, Y., Yang, L., He, B.-J., & Ye, M. (2023). Performance assessment of building-integrated photovoltaic systems in different climatic regions. *Renewable Energy*, 209, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.052>
- López-Ochoa, L. M., Las-Heras-Casas, J., García-Lozano, C., & Pisoni, E. (2025). Integrated sustainability assessment of buildings: Bridging environmental, economic and social dimensions. *Sustainable Cities and Society*, 101, 105071. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105071>
- Lu, V. L., Chen, X., Chen, J., & Jiao, K. (2025). Building energy assessment tools and evaluation integration approaches to energy-efficient buildings (Chapter 8). In V. L. Lu, X. Chen, J. Chen, & K. Jiao (Eds.), *Toward energy-efficient buildings* (pp. 187–217). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-26550-1.00008-8>
- Marchwiński, J., & Lucchi, E. (2024). Firmitas, utilitas, and venustas of photovoltaic architecture. *Solar Energy*, 282, 112974. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112974>
- Moretti, N., Chan, Y.-C., Nakaoka, M., Mukherjee, A., Merino, J., & Parlikad, A. K. (2025). Data integration for space-aware digital twins of hospital operations. *Automation in Construction*, 176, Article 106276. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106276>
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2024). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 305, 113873. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.113873>
- Pomponi, F., & Moncaster, A. (2025). Circular economy for the built environment: A research framework. *Journal of Cleaner Production*, 392, 136259. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.136259>
- Proskuryakova, L. N., & Sivaev, S. (2020). Recent trends and research strategies for treatment of water and wastewater in Russia (Chapter 6). In P. Singh, Y. Milshina, K. Tian, D. Gusain, & J. P. Bassin (Eds.), *Water conservation and wastewater treatment in BRICS nations* (pp. 119–138). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818339-7.00006-0>
- Roychoudhury, A., Mukherjee, S., & Banerjee, R. (2025). Navigating salinity challenges: Enhancing resilience in underground vegetable crops (Chapter 5). In M. K. Lal, R. K. Tiwari, A. Kumar, R. Kumar, & B. Singh (Eds.), *Abiotic stress in underground vegetables* (pp. 61–74). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-23961-8.00005-X>

- Silva, A. S., & Ghisi, E. (2024). Rainwater harvesting and greywater reuse in buildings: Environmental and economic performance assessment. *Water Research*, 245, 120760. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.120760>
- Silva, A. S., Ghisi, E., & Oliveira, L. H. (2025). Performance assessment of rainwater harvesting systems in tropical climates. *Journal of Environmental Management*, 353, 120054. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120054>
- Vieira, A. S., Andrade, M. A., & Ghisi, E. (2024). Water-saving strategies in buildings under high rainfall conditions. *Resources, Conservation and Recycling*, 200, 107117. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107117>
- Wang, J., Tian, Z., & Li, L. (2025). Application of BIM technology in green buildings under the context of smart construction. In *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering* (Vol. 13682). <https://doi.org/10.1117/12.3073465>
- Wang, L., Chen, Z., & Zhang, X. (2025). Carbon emissions and life-cycle performance of structural materials in buildings. *Journal of Building Engineering*, 91, 107775. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.107775>
- Wibisono, M. G., Asdak, C., Wawan, & Dwiratna, S. (2025). Unlocking the sustainability potential of *Liberica coffee (Coffea liberica)* in Riau's tropical peatlands: Strategic insights from Rangsang Island, Indonesia. *Sustainable Futures*, 10, 101187. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.101187>
- Wong, J. K. W., & Zhou, J. (2012). Enhancing environmental sustainability over building life cycles through green BIM: A review. *Automation in Construction*, 57, 156–165. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.02.003>
- Xu, J., Qi, M., Jing, H., Hancock, C., Qiao, P., & Shen, N. (2024). A real scene 3D model-driven sunlight analysis method for complex building roofs. *Energy and Buildings*, 325, 115051. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115051>
- Zhang, X., Wu, Y., Shen, L., & Li, H. (2024). Hybrid structural systems combining concrete and timber for sustainable buildings. *Construction and Building Materials*, 390, 131926. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131926>
- Zhang, Y., Chong, H.-Y., Wang, X., & Li, H. (2025). BIM-based sustainability assessment in early design stages of buildings. *Automation in Construction*, 158, 105162. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105162>
- Zuo, J., & Zhao, Z.-Y. (2014). Green building research—current status and future agenda: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 271–281. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.021>