

# OTIMIZAÇÃO COMPUTACIONAL PARA DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS SUSTENTÁVEIS EM BIM: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Fernanda Ribeiro Janchikoski <sup>1</sup>

Gabriela Bardelli <sup>2</sup>

Julianna Crippa <sup>3</sup>

## RESUMO

Este projeto de pesquisa tem como objetivo identificar e analisar métodos de otimização de projetos sustentáveis em BIM por meio de uma revisão sistemática da literatura. Visando identificar artigos e publicações, a plataforma de pesquisa *Publish or Perish* foi utilizada. Após as filtragens, foram selecionadas 22 publicações acerca do tema de pesquisa e dessa maneira seus métodos foram analisados e sintetizados com o objetivo de listar todas as potencialidades e limitações dos estudos. Foi possível notar que a maior parte dos artigos utiliza modelos determinísticos (72,7%) e concentram as análises em Luz Solar e Energia (31,8%). Além disso, percebe-se um padrão relacionado à necessidade de maior detalhamento dos processos, para que seja possível aprimorar as metodologias utilizadas. Para pesquisas futuras, sugere-se uma análise sistemática dos dados para identificação de mais padrões e para comparação de aplicabilidade sugere-se a realização de testes em um mesmo projeto BIM.

Palavras-chave: *Building Information Modelling*. Modelagem da Informação da Construção. Pesquisa Operacional. Otimização. Sustentabilidade

<sup>1</sup> Aluna do 9º período do curso de Arquitetura e Urbanismo da FAE Centro Universitário. Bolsista do Programa de Apoio à Iniciação Científica (PAIC 2021/2022). E-mail: fernanda.janchikoski@mail.fae.edu

<sup>2</sup> Aluna do 9º período do curso de Engenharia Civil da FAE Centro Universitário. Voluntária do Programa de Apoio à Iniciação Científica (PAIC 2021/2022). E-mail: gabriela.bardelli@mail.fae.edu

<sup>3</sup> Orientadora da Pesquisa. Mestre em Engenharia da Construção Civil pela Universidade Federal do Paraná. Professora da FAE Centro Universitário. E-mail: julianna.crippa@fae.edu

## INTRODUÇÃO

No setor da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), a crescente demanda por habitação a preços acessíveis, o aumento dos custos de construção, a baixa taxa de produtividade e a maior preocupação com a eficiência energética e sustentabilidade levam a indústria a perceber os imensos benefícios de ferramentas de digitalização da construção. Apesar disso, em análise publicada pelo *McKinsey Global Institute* em 2015, a indústria da construção nos Estados Unidos mostrou-se ser a menos digitalizada dentre as demais, apresentando indicadores apenas melhores do que a indústria do agronegócio e caça (MANYIKA, 2015). Por outro lado, em outra análise feita pelo mesmo instituto em 2017, o setor da construção apresentou um potencial de 47% para automação, o que desperta certo otimismo enquanto as lacunas e oportunidades a serem exploradas neste mercado (MANYIKA, 2017). No entanto, percebe-se um movimento crescente de implementação de ferramentas desenvolvidas para projetos em BIM (Modelagem de Informações da Construção) que vem sendo cada vez mais utilizada pela cadeia produtiva, arquitetos e demais projetistas. O BIM é baseado na modelagem 3D paramétrica que permite desenvolver construções mais eficientes e revolucionar os projetos de construção. Dessa forma, destaca-se a necessidade de investir no desenvolvimento de projetos de edifícios sustentáveis utilizando simulações computacionais e demais ferramentas e técnicas tecnológicas compatíveis com BIM.

Em um contexto geral, simulações computacionais, assim como modelagem numérica e otimização estão se tornando habituais na engenharia e ciência contemporânea. Frequentemente, em aplicações na indústria é necessário maximizar o desempenho e a eficiência enquanto deve-se minimizar o custo, tamanho ou consumo de energia ao mesmo tempo. Dessa forma, a otimização computacional vem se tornando um componente essencial nos mais diversos setores produtivos, e em muitos casos, é um fator crítico do processo de desenvolvimento de projetos. No entanto, esta tarefa geralmente é complexa e envolve a manipulação de parâmetros de projeto disponíveis a fim de encontrar valores satisfatórios de um ou mais objetivos que são avaliados por meio de elaboradas simulações computacionais, e que dependem de inúmeras restrições que devem ser satisfeitas no processo de otimização. A utilização de técnicas de otimização frequentemente facilita a tomada de decisão em problemas complexos nos diferentes segmentos de projetos de engenharia (YANG; KOZIEL, 2011).

Para facilitar esse processo, pode-se ser utilizada a pesquisa operacional, que embora seja estudada na área de engenharia de produção, pode ser também aplicada na construção civil. Essa pesquisa consiste na utilização de métodos matemáticos, estatísticos e algoritmos computacionais para ajudar na tomada de decisões. O estudo de Eom e Kim (2006) classificou as ferramentas encontradas de uma revisão de literatura sobre técnicas de Pesquisa Operacional (PO) para tomada de decisão em sistemas nas seguintes

classificações: Modelos Determinísticos, Modelos Estocásticos, Modelos Estatísticos e outras técnicas. Segundo Belfiore e Fávero (2013), os modelos determinísticos têm todas as variáveis conhecidas e constantes, resultando assim em uma única solução exata, sendo eles divididos em: Programação linear, Programação em redes, Programação binária e inteira, Programação por metas ou multiobjetivo, Programação não linear e programação dinâmica determinística. Nos modelos estocásticos se utiliza uma ou mais variáveis aleatórias e é definida por probabilidade, gerando assim mais de uma solução e analisando a situação em vários cenários, assim não dando a garantia de uma solução perfeita. São divididas em teoria das filas, modelos de simulação, programação dinâmica estocástica e teoria dos jogos. As outras técnicas citadas foram sendo incluídas na Pesquisa Operacional de acordo com o desenvolvimento computacional e são divididas em Metodologia Multicritério de apoio à decisão, Análise envoltória de dados, Inteligência artificial, Inteligência computacional, Heurísticas e meta-heurísticas entre outras.

Por outro lado, abordando a problemática da sustentabilidade, estima-se que a indústria da AEC consome quase 50% da energia produzida no planeta inteiro (HOMER-DIXON, 2010) e aproximadamente um terço das emissões globais de gases do efeito de estufa, tanto em países desenvolvidos quanto em países emergentes (UNEP, 2009). Além dos critérios considerados nos projetos estruturais, como construtibilidade e custo de edificações, é visto uma evolução quanto a levar-se em conta também a sustentabilidade no desenvolvimento de projetos de construções. Dessa forma, encontrar meios automatizados de melhorar o desempenho visando a sustentabilidade em um projeto tornou-se indispensável.

Este projeto de pesquisa tem como objetivo identificar e analisar métodos de otimização de projetos sustentáveis em BIM por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), visando coletar artigos e publicações em conferências a partir das bases de dados *on-line*.

## 1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Liu, Meng e Tam (2015) foram os pioneiros em introduzir o BIM no desenvolvimento de projetos de construção utilizando métodos de otimização. Os autores combinaram BIM com PSO (*Particle Swarm Optimization* ou Otimização por Enxame de partículas) visando obter um projeto ideal, para que assim a eficiência e eficácia do desenvolvimento de projetos possa ser amplamente melhorada. No estudo, o método proposto visa facilitar a rotina dos projetistas para otimizar seus projetos e melhorar a sustentabilidade dos edifícios. O algoritmo PSO foi aplicado para pesquisar a compensação entre os Custos do Ciclo de Vida (CCV) e as emissões de carbono (CO<sub>2</sub>) do ciclo de vida de projetos de construção. Para validar a eficácia e eficiência do método, um estudo de caso de um prédio de escritórios foi realizado em Hong Kong. O resultado do estudo de caso mostrou que o método pode ampliar o espaço de busca por soluções de projetos ideais e encurtar o tempo de processamento dos resultados, o que é útil para a entrega de um projeto econômico e ambientalmente correto.

Recentemente, Kim e Kim (2021) publicaram um estudo que aborda a mesma questão e propõe um método de otimização que avalia e minimiza as emissões de CO<sub>2</sub> e os custos do ciclo de vida, mas aplicado em um projeto de túneis de barreira de ruído por meio da reutilização de vigas de aço. O algoritmo genético multi-objetivo utilizado gera automaticamente projetos ideais e planos de aquisição de componentes. A validação em estudos de caso mostrou que o método apresenta benefícios ambientais e significativos, no entanto, o processo de modificação de componentes reutilizáveis pode causar um aumento no custo total do projeto.

Sandberg et al. (2019) e Zhuang et al. (2021) também abordaram o CCV no modelo de análise multidisciplinar. No entanto, ambos não consideraram CO<sub>2</sub> como Liu, Meng e Tam (2015) e Kim e Kim (2021). Sandberg et al. (2019), considerou a Energia do Ciclo de Vida (ECV) e os resultados do estudo de caso demonstraram a aplicabilidade dos conceitos e do algoritmo de otimização multidisciplinar para escolha (*trade-off*) de objetivos conflitantes, como ECV e CCV, durante o processo de design. Por outro lado, Zhuang et al. (2021) aborda o custo com o tema de eficiência energética do ciclo de vida de edificações, com foco em qualidade ambiental interna. Dessa forma, os autores desenvolvem um protótipo de modelo geral de otimização multi-objetivo e aplicaram uma abordagem de controle de variável para analisar as influências da envoltória do estudo de caso.

Por outro lado, Tushar et al. (2021) apresentaram um modelo de otimização baseado em BIM que considera aspectos de ECV e ACV (Avaliação do Ciclo de Vida). No entanto, a aplicação da técnica de otimização é realizada apenas no quesito de energia operacional. Chen et al. (2021) estabelecem um método híbrido que prevê e otimiza o consumo de energia de edificações. Dessa forma, um modelo de otimização multi-objetivo foi utilizado para minimizar o consumo de energia e maximizar o conforto térmico interno. Segundo os autores, o modelo proposto é capaz de otimizar os parâmetros de projeto do envelope de construção do que seu precedente, o que pode fornecer raciocínio eficaz para problemas semelhantes.

Rodrigues, Santos e Jacyszyn (2013) evidenciam a toda comunidade acadêmica as interdisciplinaridades das técnicas de pesquisa operacional, buscando otimizar a resolução de problemas relacionados a segmentos da Ciência da Computação. Os autores destacam como principais técnicas de PO: Programação linear, Programação não linear, Programação dinâmica, Teoria da filas, Simulação, Heurísticas e Processos estocásticos.

## 2 METODOLOGIA

O método de pesquisa utilizado nesta pesquisa é a Revisão Sistemática da Literatura (RSL). Elaborar uma revisão de literatura é um requisito essencial para identificar quais os métodos científicos de qualidade existentes na literatura. Dessa forma, optou-se por seguir o protocolo proposto por Dresch, Lacerda e Antunes Júnior (2015) para desenvolvimento da Revisão Sistemática da Literatura (RSL), conforme apresentado no QUADRO 1.

QUADRO 1 – Protocolo da Revisão Sistemática da Literatura (RSL)

Framework conceitual	Análise de métodos de otimização computacional para desenvolvimento de projetos sustentáveis em BIM
Contexto	Mundial
Horizonte	Todos os anos até 19/10/21 (data de busca da pesquisa)
Idiomas	Inglês
Questões de revisão	Quais são os métodos para realizar a otimização de projetos sustentáveis utilizando BIM?
Estratégia de revisão	Configurativa

Critérios de busca	1ª Filtragem (Leitura dos títulos)	INCLUSÃO 1	Tem as palavras "BIM" e "Otimização"/"Optimal"/"Optimized" no título;
		INCLUSÃO 2	Tem a palavra "Otimização"/"Optimal"/"Optimized" no título;
		INCLUSÃO 3	Tem a palavra "Algoritmo" no título;
		EXCLUSÃO 1	Trata-se de outros conceitos além de otimização, sustentabilidade e BIM (por exemplo: Lean, segurança do trabalho, cronograma de obra, entre outros);
		EXCLUSÃO 2	Não trata de otimização;
		EXCLUSÃO 3	Não é artigo, trata-se de introdução dos anais de conferência;
		EXCLUSÃO 4	Publicação repetida, que a filtragem automática não identificou;
	2ª Filtragem (Leitura dos resumos)	EXCLUSÃO 1	Acesso indisponível;
		EXCLUSÃO 2	Não está disponível em inglês ou português;
		EXCLUSÃO 3	Publicação repetida, que a filtragem automática não identificou;
		EXCLUSÃO 4	Não trata de otimização;
		EXCLUSÃO 5	Trata de retrofit, design, economia circular, material de construção, energia, gerenciamento ou ciclo de vida do carbono sem pesquisa operacional;
	3ª Filtragem (Leitura dinâmica)	EXCLUSÃO 1	Acesso indisponível;
		EXCLUSÃO 2	Não está disponível em inglês ou português;
		EXCLUSÃO 3	É uma dissertação;
		EXCLUSÃO 4	Trata de aspectos climáticos e/ou térmicos sem pesquisa operacional.

Termos de busca	<ul style="list-style-type: none"> <li>• optimization AND “Building Information Modeling” AND sustainability;</li> <li>• optimisation AND “Building Information Modeling” AND sustainability;</li> <li>• optimization AND “Building Information Modeling” AND sustainable;</li> <li>• optimisation AND “Building Information Modeling” AND sustainable;</li> <li>• optimization AND BIM AND sustainability;</li> <li>• optimisation AND BIM AND sustainability;</li> <li>• optimization AND “BIM” AND sustainable;</li> <li>• optimisation AND “BIM” AND sustainable;</li> <li>• BIM AND sustainability AND optimal;</li> <li>• BIM AND sustainable AND optimal;</li> <li>• “Building Information Modeling” AND sustainability AND optimal;</li> <li>• “Building Information Modeling” AND sustainable AND optimal;</li> </ul>
Fontes de busca	<p>Base de dados: Scopus e Microsoft Academic (Title, Keywords e Abstract)</p> <p>Internet: Google Scholar (Apenas no título)</p>

FONTE: Elaborado pelos autores com base em Dresch, Lacerda e Antunes Júnior (2015)

Para auxiliar na filtragem dos artigos, foi determinada uma matriz de inclusão e exclusão para primeira filtragem de artigos (leitura do título), garantindo que todas as publicações selecionadas contemplem o tema de pesquisa. Frisa-se que a pergunta de pesquisa definida para realizar esta RSL é: Quais são os métodos para realizar a otimização de projetos sustentáveis utilizando BIM?

O processo de coleta das publicações (FIG. 1) foi dividido em 6 etapas: i) a pesquisa pelos termos de busca, utilizando a plataforma de busca *Publish or Perish*, nas bases de dados das plataformas *Scopus* e *Microsoft Academic* – ambos filtrando resumo, palavras-chaves e título - e do portal *Google Scholar* – apenas o título; ii) exclusão das publicações repetidas; iii) 1ª filtragem, por meio da leitura dos títulos; iv) 2ª filtragem, por meio da leitura dos resumos; v) 3ª filtragem, por meio da leitura dinâmica com foco no método; vi) 4ª filtragem, por meio da leitura completa da publicação.

FIGURA 1 – Processo de coleta de publicações para a RSL



FONTE: Os autores (2022)

### 3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A TAB. 1 registra o número de artigos encontrados a partir da busca de cada termo de pesquisa nas bases de dados *Scopus*, *Google Scholar* e *Microsoft Academic*, utilizando a plataforma *Publish or Perish* (PoP). No total foram obtidos 1078 artigos e após a exclusão de resultados repetidos, restaram 299 artigos.

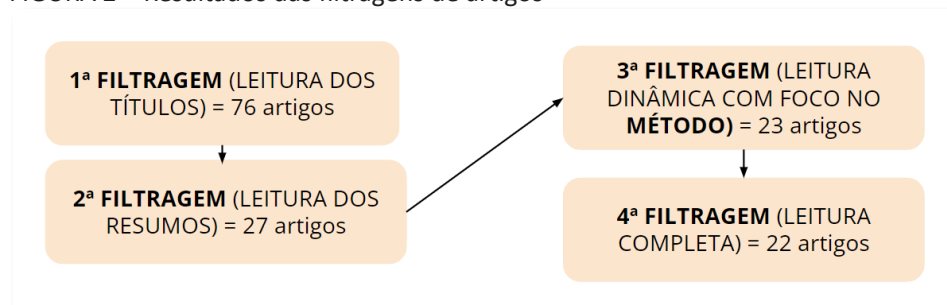
TABELA 1 – Resultados de busca nas bases de dados utilizando a plataforma PoP

Termos de Pesquisa	Scopus	Google Scholar	Microsoft Academic	Total	Total sem repetidos
<i>optimization AND “Building Information Modeling” AND sustainability;</i>	54	1	0	55	299
<i>optimisation AND “Building Information Modeling” AND sustainability;</i>	54	0	0	54	
<i>optimization AND “Building Information Modeling” AND sustainable;</i>	87	2	0	89	
<i>optimisation AND “Building Information Modeling” AND sustainable;</i>	87	0	0	87	
<i>optimization AND BIM AND sustainability;</i>	78	9	42	129	
<i>optimisation AND BIM AND sustainability;</i>	78	1	8	87	
<i>optimization AND “BIM” AND sustainable;</i>	140	2	52	194	
<i>optimisation AND “BIM” AND sustainable;</i>	140	2	12	154	
<i>BIM AND sustainability AND optimal;</i>	33	0	29	62	
<i>BIM AND sustainable AND optimal;</i>	62	2	37	101	
<i>“Building Information Modeling” AND sustainability AND optimal;</i>	25	0	0	25	
<i>“Building Information Modeling” AND sustainable AND optimal;</i>	41	0	0	41	
<b>Total</b>	<b>879</b>	<b>19</b>	<b>180</b>	<b>1078</b>	

FONTE: Os autores (2022)

Em seguida, com a definição de uma matriz de critérios para inclusão de publicações que são relevantes para o tema, e da matriz de exclusão para publicações que não condizem com o tema de pesquisa. Para a primeira filtragem, foram analisados apenas 299 títulos e após esta análise 76 artigos relacionados ao tema foram selecionados. Para a segunda filtragem, os 76 resumos foram lidos com foco no objetivo da pesquisa, restando apenas 27 artigos relacionados ao tema. Na terceira filtragem, os 27 artigos foram lidos de forma dinâmica, com foco no método, restando 23 artigos. Como última etapa, os 23 artigos foram lidos de forma completa e apenas 1 foi excluído. A FIG. 2 apresenta os resultados obtidos após as filtrações.

FIGURA 2 – Resultados das filtrações de artigos



FONTE: Os autores (2022)

O QUADRO 2 apresenta a estrutura do modelo de análise utilizado para mapear os métodos de otimização computacional que utilizam BIM com foco em projetos sustentáveis.

QUADRO 2 – Resumo dos métodos encontrados na literatura conforme classificações e técnicas de PO de Belfiore e Fávero (2013). continua

Citação	Técnica de PO - Macro	Técnica de PO - Micro	Software de Otimização	Algoritmo	Conceito de Sustentabilidade Aplicado	Objeto de Estudo	Software BIM
(LIU, 2015)	Modelos Determinísticos	Otimização Multiobjetivo	Software BIM não especificado	Multi-objective <i>particle swarm optimization</i> (MOPSO)	Minimizar o custo do ciclo de vida (LCC) e emissão de carbono do ciclo de vida (LCEE)	Edifício comercial	Não especificado
(SANDBERG et al., 2019)	Modelos Determinísticos	Programação por metas ou multiobjetivo	<i>Revit / Archicad. Grasshopper - Rhino 3D / EnergyPlus</i>	Algoritmo genético (GA)	Minimizar o custo do ciclo de vida (LCC) e emissão de carbono do ciclo de vida (LCEE)	Residência multifamiliar	<i>Revit / ArchiCAD / Rhino</i>
(ZHANG et al., 2018)	Modelos Determinísticos	Programação por metas ou multiobjetivo	<i>Revit</i>	Otimização por enxame de partículas (PSO)	Redução emissões atmosféricas totais (TAE) e custo total de construção (TCC)	Residência desenvolvida em <i>Revit</i>	<i>Revit</i>
(MARZOUK; AZAB; METAWIE, 2018)	Modelos Estocásticos	Modelos de simulação	<i>Revit</i>	Algoritmo genético (GA)	Minimizar o custo do ciclo de vida (LCC) e calcular pontuação LEED	Universidade desenvolvida em <i>Revit</i>	<i>Revit</i>
(GAO et al., 2019)	Modelos Determinísticos	Programação linear	<i>Revit / Dynamo</i>	Não especificado	Ajudar nas decisões de design nas primeiras etapas de projeto, melhorando o impacto no desempenho de energia da edificação.	Não especificado	<i>Revit API / Dynamo</i>
(MUKKA-VAARA et al., 2020)	Modelos Determinísticos	Otimização Multiobjetivo	Não especificado	Otimização multiobjetivo Algoritmo genético	Análise do ciclo de vida	Casa turística e um edifício residencial multifamiliar	<i>CAD model</i>
(CHENG; NINIC; TIZANI, 2019)	Modelos Determinísticos	Otimização Multiobjetivo	<i>Revit / Dynamo</i>	Otimização multiobjetivo Algoritmo genético de classificação-II (NSGA-II)	Análise da performance de luz solar e energia	Não especificado	<i>Revit</i>



QUADRO 2 – Resumo dos métodos encontrados na literatura conforme classificações e técnicas de PO de Belfiore e Fávero (2013). *continua*

Citação	Técnica de PO - Macro	Técnica de PO - Micro	Software de Otimização	Algoritmo	Conceito de Sustentabilidade Aplicado	Objeto de Estudo	Software BIM
(LOH; DAWOOD; DEAN, 2009)	Outras técnicas	Heurística	<i>Revit, IES</i>	Análise de decisão multicritério + 3D-EATT	Redução da emissão de carbono	Escola primária	<i>Revit</i>
(KIM; KIM, 2021)	Modelos Determinísticos	Simulação / Programação linear	Não especificado	<i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)</i>	Redução da emissão de carbono e custo	Túneis de barreira	Não especificado
(VITE; MORBIDUCCI, 2021)	Modelos Determinísticos	Otimização Multiobjetivo	<i>Dynamo</i>	Tomada de Decisão Multicritério (MCDM) + NSGA II	Design sustentável	Protótipos genéricos	<i>Revit</i>
(SHADRAM; MUKKAVARA, 2018)	Modelos Determinísticos	Otimização Multiobjetivo	<i>Dynamo</i>	Multiobjetivo algoritmo genético	Redução da energia do ciclo de vida da edificação (LCE)	Protótipos genéricos	<i>Revit</i>
(RAHMANI ASL; ZARRINMEHR; YAN, 2013)	Modelos Determinísticos	Otimização Multiobjetivo	<i>Autodesk Green Building Studio</i>	<i>Revit2GBSOpt</i>	Minimizar o consumo de energia do edifício e alcançar o crédito do LEED	Edificação residencial	<i>Revit</i>
(TUSHAR et al., 2021)	Outras técnicas	Heurística	<i>FirstRate5 + BIM-enabled LCA</i>	Não especificado	Simulação de estratégias para reduzir o consumo de energia	Edificação residencial	<i>Revit</i>
(MARZOUK; ABDELAKDER, 2020)	Modelos Determinísticos	Otimização Multiobjetivo	<i>Revit DB + Microsoft Access + Athena Impact Estimator Software</i>	Multiobjetivo híbrido <i>fuzzy</i> e NSGA-II	O modelo calcula emissões diretas, indiretas e energia primária para todo o ciclo de vida do projeto.	Edificação educacional	<i>Revit</i>

QUADRO 2 – Resumo dos métodos encontrados na literatura conforme classificações e técnicas de PO de Belfiore e Fávero (2013). conclusão

Citação	Técnica de PO - Macro	Técnica de PO - Micro	Software de Otimização	Algoritmo	Conceito de Sustentabilidade Aplicado	Objeto de Estudo	Software BIM
(RAIMONDI; AGUERRE, 2018)	Outras técnicas	Heurística	Revit	Otimização de seleção de materiais (MSOT)	Qualificação para o LEED V4	Espaço multifuncional	Revit
(VAN TUNG et al., 2021)	Modelos Estocásticos	Modelos de simulação	Rhinoceros / Grasshopper	Algoritmo Genético de Classificação Não Dominado II (NSGA-II)	Calcular redução da radiação solar	Flat	Rhinoceros (Rhino) / Grasshopper
(LIM et al., 2019)	Modelos Determinísticos	Programação por metas ou multiobjeto	Revit / Dynamo	Otimização Multi-objetivo (MOO)	Valor total de transferência térmica (OTTV) e custo	Edificação não residencial	Revit
(NAJJAR et al., 2019)	Modelos Determinísticos	Programação por metas ou multiobjeto	Green Building Studio / Revit	Não especificado	Eficiência energética	Edificação residencial	Revit
(YAN et al., 2015)	Modelos Determinísticos	Programação por metas ou multiobjeto	Revit2GBSOpt	Algoritmo Genético para otimização de Pareto (ArchMOO)	Design sustentável	Protótipos genéricos	Revit
(SHADRAM et al., 2018)	Modelos Determinísticos	Programação por metas ou multiobjeto	Não especificado	Algoritmo genético (GA)	Medidas de Eficiência Energética (EEMs)	Residência multifamiliar	Não especificado
(ZHAO; WANG, 2016)	Modelos Determinísticos	Programação linear	Visual Studio 2010/ Revit	Algoritmo desenvolvido nas linguagens C++ e C#	Otimizar design e desempenho geral	Edificação residencial	Revit
(LIM et al., 2016)	Outras técnicas	Heurística	Revit (Programação PHP)	Algoritmo genético (GA)	Valor total de transferência térmica (OTTV) e custo	Residência desenvolvida em Revit	Revit

FONTE: Os autores (2022)

De acordo com o QUADRO 3, quando analisamos os artigos relacionando as técnicas de pesquisa operacional, temos 16 artigos (72,7%) que utilizam modelos determinísticos. Dentre eles, treze estudos (59,1%) utilizaram a programação por metas e outros três utilizaram a programação linear (13,6%). Apenas 2 artigos (9,1%) utilizam modelos estocásticos, ambos utilizando modelos de simulação e 4 artigos (18,2%) utilizam a técnica heurística. Ressalta-se que, para a classificação e análise dos artigos, relacionando as técnicas de PO, foi utilizado a estrutura apresentada por Belfiore e Fávero (2013).

QUADRO 3 – Técnicas de PO utilizadas na análise dos artigos

MODELOS DETERMINÍSTICOS		MODELOS ESTOCÁSTICOS	OUTRAS TÉCNICAS
PROGRAMAÇÃO LINEAR	PROGRAMAÇÃO POR METAS E OUTRAS MULTIOBJETIVOS	MODELOS DE SIMULAÇÃO	HEURÍSTICA
(GAO, 2019); (KIM; KIM, 2021); (ZHAO; WANG, 2016)	(LIU, 2015); (SANDBERG, 2019); (ZHANG; SANDANAYAKE, 2018); (MUKKAVAARA, 2020); (CHENG; NINIC; TIZANI, 2019); (VITE; MORBIDUCCI, 2021); (SHADRAM; MUKKAVAARA, 2018); (SHADRAM; MUKKAVAARA, 2018)	(MARZOUK; AZAB; METAWIE, 2018); (VAN TUNG et al., 2021)	(LOH; DAWOOD; DEAN, 2009); (TUSHAR et al., 2021); (RAIMONDI; AGUERRE, 2018); (LIM et al., 2019)

FONTE: Os autores (2022)

De acordo com a divisão do QUADRO 4 abordando os principais conceitos de sustentabilidade nos artigos selecionados temos a seguinte análise: 2 publicações (9,1%) tiveram como conceito de sustentabilidade uma análise sobre o custo — dimensão econômica; 3 pesquisas (13,6%) utilizaram a certificação LEED para suas análises; 4 publicações (18,2%) abordam a emissão de carbono; outras 4 publicações (18,2%) utilizaram as decisões de design em projetos como estudo e conceito de sustentabilidade; 5 estudos (22,7%) se basearam no conceito de ciclo de vida; e, 7 estudos (31,8%) otimizaram análises de luz solar e energia.

QUADRO 4 – Conceitos de sustentabilidade abordados nos artigos selecionados

EMISSÃO DE CARBONO	LEED	DECISÕES DE DESIGN	LUZ SOLAR/ ENERGIA	CUSTO	CICLO DE VIDA
(LIU, 2015); (SANDBERG, 2019); (LOH; DAWOOD; DEAN, 2009); (KIM; KIM, 2021).	(MARZOUK; AZAB; METAWIE, 2018); (RAIMONDI; AGUERRE, 2018); (RAHMANI ASL; ZARRINMEHR; JAN, 2013).	(GAO, 2019); (VITE; MORBIDUCCI, 2021); (YAN et al., 2015); (ZHAO; WANG, 2016).	(CHENG; NINIC; TIZANI, 2019); (RAHMANI ASL; ZARRINMEHR; JAN, 2013); (TUSHAR et al., 2021); (MARZOUK; ABDELAKDER, 2020); (VAN TUNG et al., 2021); (LIM et al., 2019); (SHADRAM et al., 2018).	(CHENG; NINIC; TIZANI, 2019); (LIM et al., 2019).	(LIU, 2015); (MARZOUK E ABDELAKNER, 2020); (MUKKAVAARA, 2020); (SANDBERG, 2019); (SHADRAM E MUKKAVAARA, 2018).

FONTE: Os autores (2022)

Cheng, Ninic e Tizani (2019) e Lim et al. (2019) tiveram como conceito de sustentabilidade uma análise sobre o custo da obra. Na pesquisa de Cheng, Ninic e Tizani (2019), eles destacaram que o comportamento das variáveis apresentou um grande potencial de se ter resultados ideais através da geometria. Apesar disso concluíram que a otimização de projetos utilizando como base um projeto real é viável. Como estudos futuros, sugerem enriquecer o banco de dados ambientais e associar o ambiente de programação com ferramentas de código aberto. Já Lim et al. (2019) validaram o método através de um teste de caso que obteve uma redução significativa de Valor Total de Transferência Térmica (OTTV) com um custo de construção mais alto. Segundo os autores, embora o modelo computacional de otimização baseado em BIM inclua apenas OTTV e custo de construção como as funções objetivo, usando o método semelhante, este pode ser aprimorado para diferentes variáveis de projeto e funções objetivas.

Marzouk, Azab e Metawie (2018), Raimondi e Aguerre (2018) e Rahmani Asl, Zarrinmehr e Jan (2013) utilizaram a classificação LEED para suas análises. O trabalho de Marzouk, Azab e Metawie (2018) auxilia na escolha dos materiais ideais da edificação visando alcançar o Custo do Ciclo de Vida (LCC) mínimo e número máximo de créditos no LEED. Raimondi e Aguerre (2018) trazem que o MSOT quando combinado com o BIM, permite identificar os materiais mais influentes extraindo-os automaticamente do modelo, avaliando assim em termos de porcentagem o quanto cada material contribui para o crédito. Entretanto foi considerado burocrático a exclusão dos materiais não certificados e os fabricantes que não tem recursos para demonstrar a sustentabilidade dos materiais. Será proposto novos desenvolvimentos dos pontos mencionados anteriormente e a validação da ferramenta através de um teste em estudo de caso. O estudo de Rahmani Asl, Zarrinmehr e Jan (2013) demonstrou um grande potencial para alcançar a máxima eficiência em consumo de energia, porém a otimização

pode gerar designs que não são agradáveis visualmente ou não são eficientes em segurança, sendo necessário métodos multidisciplinares para as próximas pesquisas.

Liu (2015), Sandberg (2019), Loh, Dawood e Dean (2009) e Kim e Kim (2021) abordam a emissão de carbono em seus estudos. Liu (2015) comprova que o seu método é confiável e pode trazer opções de projetos ideias de forma automatizada, diminuindo assim a carga de trabalho dos projetistas e evitando erros por cálculos manuais. Porém muitos fatores ainda não são considerados, assim o espaço de busca ainda não é grande o suficiente. A troca de informações entre a simulação e a parte de otimização podem ser mais eficientes, sendo pontos que serão discutidos e melhorados em estudos posteriores. Na pesquisa de Sandberg (2019) se vê a necessidade da criação de um modelo mestre para habilitar fluxos de trabalho e mostrar como isso pode ser feito. Não foi considerado o uso e custo relacionados à eletricidade, sendo assim excluídos da pesquisa por falta de dados. Pela falta desses dados o trabalho não foi concluído. Serão necessárias pesquisas para expandir os resultados e contabilizar o uso de energia e os custos dos processos de construção. Loh, Dawood e Dean (2009) selecionaram um algoritmo com alta capacidade para lidar com processos complexos de tomada de decisão e um histórico de sucesso com a implementação em diversos setores de pesquisa. Apesar disso, faltam diretrizes para julgar a entrada de dados, há uma dificuldade na obtenção de visões qualitativas e quantitativas e a falta experiência dos pesquisadores teve relevância no resultado da pesquisa. Kim e Kim (2021) propuseram um método de otimização de projetos comprovando que a reutilização é uma estratégia viável para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>. Porém nenhuma das alternativas testadas minimizou os dois fatores de estudo juntos: CO<sub>2</sub> e custo, causando assim uma diferença em relação a projetos reais. Nos próximos trabalhos pretende-se estabelecer tipos de NBTs e considerar outros tipos de projeto para análise.

Mukkavaara (2020), Liu (2015), Sandberg (2019), Marzouk e Abdelakner (2020) e Shadram e Mukkavaara (2018) utilizaram o ciclo de vida de uma edificação como estudo. Mukkavaara (2020) afirma que ao utilizar o design generativo é possível explorar soluções de forma interativa, mas precisa de um estudo especializado no assunto para realizar otimizações reais. Assim, busca-se com novas pesquisas tornar esse processo mais acessível aos praticantes. Sandberg (2019) em sua pesquisa identificou a necessidade de uma criação de um modelo mestre para habilitar os fluxos de trabalhos e mostrar como isso pode ser feito. Apesar disso, a Energia do Ciclo de Vida (LCE) e o Custo do Ciclo de Vida (LCC) no estudo não considerou o uso e custos relacionados à eletricidade, e por falta de dados foi excluído da pesquisa. Pelo uso de energia associada aos processos de construção não fazerem parte do escopo do estudo, o trabalho não foi concluído, sendo assim necessário pesquisas para expandir os resultados e contabilizar o uso de energia e os custos dos processos de construção.

Gao (2019), Vite e Morbiducci (2021), Yan et al. (2015) e Zhao e Wang (2016) utilizaram as decisões de design em projetos como estudo e conceito de sustentabilidade. Gao (2019) desenvolveu uma ferramenta de simulação e otimização de energia de construção em tempo

real, ajudando assim os arquitetos a otimizar a forma do edifício, orientação, escolha de paredes e esquadrias como base no desempenho energético do edifício logo na fase inicial. Os resultados da ferramenta são verificados inicialmente com base no caso BSETEST 600 conforme o ANSI/ASHRAE, mostrando que as demandas de aquecimento estimadas são as exceções. Assim, em trabalhos futuros, o processo será seguido em detalhes, incluindo a verificação da transmissão de calor, transferência de calor, ganho de calor interno e ganho de calor solar. Vite e Morbiducci (2021) desenvolveram um procedimento replicável para otimização. Ainda existem desafios para trabalhar com BIM e com o Ambiente Comum de Dados (CDE), apesar de em um ponto teórico já ser considerado possível, na prática ainda não existem ferramentas consolidadas e procedimentos padronizados. Yan et al (2015) utiliza o archMOO, que traz vantagens da automatização ajudando a promover a criatividade durante o design, diminuindo o tempo de projeto. Apesar disso, falta considerar alguns quantitativos que são essenciais no momento de design. Em próximos trabalhos, eles pretendem criar um novo método: MOGA, baseado no algoritmo NSGA-II adicionando os quantitativos que não são avaliados no processo de GA. Zhao e Wang (2016) construíram uma plataforma de otimização de projeto de construção. Os resultados mostram que pode reduzir os custos de construção por meio da melhoria da eficiência do projeto de engenharia de construção, tendo um alto valor de uso e perspectiva de aplicação.

Cheng, Ninic e Tizani (2019), Rahmani Asl, Zarrinmehr e Jan (2013), Tushar et al. (2021), Marzouk e Abdalakde (2020), Van Tung et al. (2021), Lim et al. (2019) e Shadram et al. (2018) utilizam luz solar e energia como conceito de sustentabilidade. Cheng, Ninic e Tizani (2019) afirmam que a otimização de projetos utilizando como base um projeto real é viável, porém o comportamento das variáveis apresentou um potencial risco de se obter resultados irreais através da geometria. Como trabalhos futuros pretende-se enriquecer o banco de dados ambientais e associar o ambiente de programação com ferramentas de código aberto. Rahmani Asl, Zarrinmehr e Jan (2013) demonstraram grande potencial para alcançar a máxima eficiência em consumo de energia, mas a otimização pode gerar designs que não são agradáveis visualmente ou eficientes em segurança. Para projetos futuros, será necessário métodos multidisciplinares. Tushar et al. (2021) demonstraram que uma abordagem holística do design pode reduzir a carga do sistema, mas o estudo precisa de mais comprovações que exigem pesquisas futuras. Os dados dessa pesquisa podem ser utilizados em um estudo para modelos de previsão de energia do desempenho térmico. O estudo de Marzouk e Abdalakde (2020) apresentou uma ferramenta para auxiliar na tomada de decisão acerca da sustentabilidade. Van Tung et al. (2021) demonstraram que uma otimização geral pode gerar um design sustentável. Lim et al. (2019) validaram através de um teste, a comprovação da redução significativa de OTTV sendo alcançável com custo de construção mais alto. Embora o modelo computacional de otimização baseado em BIM recentemente proposto inclua apenas OTTV e custo de construção como as funções objetivo, utilizando o método semelhante pode ser desenvolvido como um abrangente computacional integrado baseado em BIM,

obtendo assim uma ferramenta de otimização para diferentes variáveis de projeto e funções objetivas. Shadram et al. (2018) demonstraram com os resultados da otimização do estudo de caso que a aplicabilidade da abordagem estendida para encontrar soluções ótimas do trade-off entre impacto de carbono corporal e operacional, promovendo escolhas durante o projeto de construção. A natureza exploratória deste estudo requer mais investigações para validar a descoberta em projetos de construção reais para solidificar uma metodologia para otimização de *trade-off* do impacto de carbono incorporado versus operacional. Futuras pesquisas podem estender a abordagem desenvolvida para cobrir uma ampla gama de EEMs (por exemplo, configuração da forma do edifício, sistemas de energia renovável e etc.) como variáveis de projeto. A abordagem de otimização neste estudo não leva em conta o custo do ciclo de vida do edifício, portanto, outro potencial para pesquisas futuras é incluir custo do ciclo de vida como outra função objetivo.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho identificou e analisou diversos métodos de otimização de projetos sustentáveis em BIM. Para atingir tal objetivo, foi realizada uma RSL, visando coletar artigos e publicações em conferências a partir das bases de dados *on-line*. Para a busca dos termos de busca selecionados, a plataforma de pesquisa *Publish or Perish* foi utilizada. Após a etapa de filtragem para seleção de trabalhos relacionados ao tema, 22 artigos foram selecionados.

Analisando as publicações selecionadas na última filtragem, quanto às técnicas de pesquisa operacional, destaca-se que a maioria das pesquisas utilizam modelos determinísticos (72,7%). Menos de dez por cento (9,1%) dos artigos utilizam modelos estocásticos e os demais utilizam a técnica heurística (18,2%). Considerando conceitos de sustentabilidade abordados, as publicações se mostraram bem diversas e apontaram estudos que estudam: certificação LEED; emissões de carbono; análise de luz solar e energia; ciclo de vida; custo e decisões/alternativas de design. Destes, os que mais se destacam, somando mais da metade dos artigos, foram: Luz Solar e Energia, com 31,8% das publicações e ciclo de vida, com 22,7% das publicações. Ao analisar o conteúdo da discussão sobre os métodos propostos, percebe-se um padrão quanto a necessidade de maior detalhamento dos processos e aprimoramento dos métodos, buscando facilitar a aplicação e complementar as análises BIM.

Quando as limitações deste estudo, destaca-se a falta de conhecimento dos pesquisadores acerca da Pesquisa Operacional (PO), considerando que a temática não faz parte dos cursos de graduação de Engenharia Civil e Arquitetura e que a presente pesquisa faz parte de um projeto de iniciação científica. Assim, a discussão quanto a este objeto poderia ter sido melhor explorada, principalmente os resultados do Quadro 2. Assim, para estudos futuros, sugere-se cruzar e relacionar os dados coletados sistematicamente para que se identifique ainda mais os padrões entre os estudos. Além disso, novos estudos que façam aplicações em um mesmo projeto BIM, podem ser elaborados visando testar e comparar a aplicabilidade dos métodos de otimização listados no presente trabalho.

## REFERÊNCIAS

- CHEN, Bin et al. Multiobjective optimization of building energy consumption based on BIM-DB and LSSVM-NSGA-II. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 294, 126153, p. 126153, Apr. 2021.
- CHENG, Cunyi; NINIC, Jelena; TIZANI, Walid. Parametric Virtual Design-based Multi-Objective Optimization for Sustainable Building Design. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON INTELLIGENT COMPUTING IN ENGINEERING, 26., 2019, Leuven. **Proceedings of EG-ICE 2019**. Leuven: CEUR Workshop Proceedings, 2019. 1613 0073.
- DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel Pacheco; ANTUNES JÚNIOR, José Antonio Valle. **Design Science Research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Porto Alegre: Bookman, 2015.
- EOM S, Kim E. A survey of decision support system application (1995-2001). **Journal of the Operational Research Society**, Vitória da Conquista, v. 3, n. 57, p. 1264-1278, May 2006.
- GAO, Hao et al. BIM-based real time building energy simulation and optimization in early design stage. In: IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING, 556.; EDITION OF THE INTERNATIONAL SOLARIS CONFERENCE, 9., 2019, Chengdu. **Proceedings...** Chengdu: IOP Publishing, 2019. p. 012064.
- HOMER-DIXON, Thomas F. **Environment, scarcity, and violence**. Nova Jérsei: Princeton University, 2010.
- KIM, Seongjun; KIM, Sung-Ah. Design optimization of noise barrier tunnels through component reuse: Minimization of costs and CO2 emissions using multi-objective genetic algorithm. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 298, p. 126697, May 2021.
- KITCHENHAM, Barbara et al. Systematic Literature Reviews in Software Engineering: a systematic literature review. **Information and Software Technology**, Amsterdam, v. 51, n. 1, p. 7-15, Jan. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2008.09.009>.
- LIM, Yaik-Wah et al. BIM and Genetic Algorithm optimisation for sustainable building envelope design. **Building Information Systems in the Construction Industry**, Malaysia, v. 159, 151-159, Jan. 2018.
- LIM, Yaik-Wah et al. Computational BIM for Building Envelope Sustainability Optimization. In: MATEC WEB OF CONFERENCES, ICBMM 2018., 2019, Lisboa. **Proceedings...** Lisboa: EDP Sciences, 2019. p. 04001.
- LIU, Sha. Sustainable building design optimization using building information modeling. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONSTRUCTION AND REAL ESTATE MANAGEMENT, 2015, Lulea. **Proceedings...** Lulea, 2015. p. 326-335.
- LIU, Sha; MENG, Xianhai; TAM, Chiming. Building information modeling based building design optimization for sustainability. **Energy and Buildings**, Dalian, v. 105, p. 139-153, Oct. 2015.
- LOH, Eugene; DAWOOD, N.; DEAN, J. Development of an optimisation approach for the energy efficient buildings. **Computing in Civil Engineering**, Austin, v. 1, n. 1, p. 318-327, Abr. 2009.
- MANYIKA, James et al. A future that works: Automation, employment, and productivity. **McKinsey Global Institute**, São Francisco, v. 60, p. 1-135, Jan. 2017. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/featured%20insights/Digital%20Disruption/Harnessing%20automation%20for%20a%20future%20that%20works/MGI-A-future-that-works-Executive-summary.ashx#:~:text=Our%20approach%20to%20analyzing%20the,activities%20rather%20than%20entire%20occupations.&text=We%20estimate%20that%20about%20half,by%20adapting%20currently%20demonstrated%20technologies>. Acesso em: 30 de abril de 2021.



- MANYIKA, James et al. Digital America: A tale of the haves and have-mores. **McKinsey Global Institute**, New York, v. 1, n. 1, p. 1-120, Dec. 2015. Disponível em: [https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Technology%20Media%20and%20Telecommunications/High%20Tech/Our%20Insights/Digital%20America%20A%20tale%20of%20the%20haves%20and%20have%20mores/MGI%20Digital%20America\\_Executive%20Summary\\_December%202015.pdf](https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Technology%20Media%20and%20Telecommunications/High%20Tech/Our%20Insights/Digital%20America%20A%20tale%20of%20the%20haves%20and%20have%20mores/MGI%20Digital%20America_Executive%20Summary_December%202015.pdf). Acesso em: 30 de abril de 2021.
- MARZOUK, Mohamed; ABDELAKDER, Eslam. A hybrid fuzzy-optimization method for modeling construction emissions. **Decision Science Letters**, Vancouver, v. 9, n. 1, p. 1-20, Jan. 2020.
- MARZOUK, Mohamed; AZAB, Shima; METAWIE, Mahmoud. BIM-based approach for optimizing life cycle costs of sustainable buildings. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 188, n. 126697, p. 217-226, May 2018.
- MUKKAVAARA, Jani et al. Sustainability evaluation of timber dwellings in the north of Sweden based on environmental impact and optimization of energy and cost. **Procedia Manufacturing**, Lulea, v. 44, n. 101016, p. 76-83, May 2020.
- NAJJAR, Mohammad et al. Integrated optimization with building information modeling and life cycle assessment for generating energy efficient buildings. **Applied Energy**, Estocolmo, v. 250, n. 1366 138, p. 1366-1382, Sep. 2019.
- RAHMANI ASL, Mohammad; ZARRINMEHR, Saied; YAN, Wei. Towards BIM-based parametric building energy performance optimization. In: THE ASSOCIATION FOR COMPUTER AIDED DESIGN IN ARCHITECTURE (ACADIA), 13., 2015, Cambridge. **Proceedings...** Cambridge: 2013. p. 101-108.
- RAIMONDI, Alberto; AGUERRE, Mabel. MSOT: materials selection optimization in the LEED v4 protocol-a case study with BIM. **TECHNE: Journal of Technology for Architecture and Environment**, Roma, v. 16, n. 1, p. 270-280, May 2018.
- RODRIGUES, Bruno Felipe da Silva; SANTOS, João Paulo de Oliveira; JACYSZYN, Stella. Interdisciplinaridades entre Pesquisa Operacional e Ciência da Computação. In: ENCONTRO ANUAL DE COMPUTAÇÃO – ENACOMP, 10., 2013, Catalão. **Proceedings...** 2013. Catalão, Brasil, 2013. 265-270.
- SANDBERG, Marcus et al. Multidisciplinary optimization of life-cycle energy and cost using a BIM-based master model. **Sustainability**, Lulea, v. 11, n. 1, p. 286, Jan. 2019.
- SHADRAM, Farshid et al. Trade-off optimization of embodied versus operational carbon impact for insulation and window to wall ratio design choices: A case study. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABILITY IN ENERGY AND BUILDINGS, KES-SEB 2018, 2018, Cham. **Proceedings...** Cham: Springer, 2018. p. 12-20.
- SHADRAM, Farshid; MUKKAVAARA, Jani. An integrated BIM-based framework for the optimization of the trade-off between embodied and operational energy. **Energy and Buildings**, Luleå, v. 158, n. 0378 7788, p. 1189-1205, Oct. 2018.
- TUSHAR, Quddus et al. An integrated approach of BIM-enabled LCA and energy simulation: The optimized solution towards sustainable development. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 289, n. 126697, p. 125622, May 2021.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME (UNEP). **Buildings and climate change: Summary for decision-makers**. Paris: UNEP, Sustainable Buildings and Climate Initiative, 2009. p. 1-62.

VAN TUNG, Nguyen et al. Multidisciplinary design optimization for sustainable design using building information modeling. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, Chengdu, v. 556, n. 1, p. 012013, 2021.

VITE, Clara; MORBIDUCCI, Renata. Optimizing the sustainable aspects of the design process through building information modeling. **Sustainability**, Genoa, v. 13, n. 6, p. 3041, Mar. 2021.

YAN, Wei et al. Towards multi-objective optimization for sustainable buildings with both quantifiable and non-quantifiable design objectives. **Sustainable Human–Building Ecosystems**, Texas, v. 101061, p. 223-230, Oct. 2015.

YANG, Xin-She; KOZIEL, Slawomir (Ed.). **Computational optimization and applications in engineering and industry**. New York: Springer Science & Business Media, 2011.

ZHANG, Guomin; SANDANAYAKE, Malindu. BIM and optimisation techniques to improve sustainability in green certification submission of construction projects. In: **WORLD CONSTRUCTION SYMPOSIUM**, 7., 2018, Colombo. **Proceedings...** Sri Lanka: Ceylon Institute of Builders, 2018. p. 105-115.

ZHAO, L.; WANG, W. S. Construction Project Design Optimization Platform Research Based on BIM. **Chemical Engineering Transactions**, Milão, v. 51, n. 1, p. 535-540, Aug. 2016.

ZHUANG, Dian et al. A performance data integrated BIM framework for building life-cycle energy efficiency and environmental optimization design. **Automation in Construction**, Indiana, v. 127, 103712, p. 103712, July 2021.