ANAIS
IV EURO ELECS
2021

ARTIGO

USO DE ALGORITMOS EVOLUTIVOS PARA OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE ENVOLTÓRIAS DE EDIFICAÇÕES: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA



BENINCÁ, Letiane
(benincalf@gmail.com)
Faculdade Meridional (IMED), Brasil
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Brasil
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Espanha

GLITZENHIRN, Claudia
(claudiaglitzenhirn@gmail.com)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Brasil

PASSUELLO, Ana
(ana.passuello@ufrgs.br)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Brasil

BARROSO, José Maria González
(jose.m.gonzalez@upc.edu)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Espanha

SANCHEZ, Eva Crespo
(eva.crespo@upc.edu)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Espanha

PALAVRAS-CHAVE:

Algoritmo evolutivo, Otimização, Envoltória, Eficiência energética, Simulação energética

RESUMO

A envoltória das edificações tem grande influência em seu consumo energético. Analisar e projetar a envolvente externa de um edifício requer a tomada de decisão de muitas variáveis, sejam elas construtivas, de desenho ou referentes ao clima. Os algoritmos evolutivos como na biologia, fazem o cruzamento de vários parâmetros construtivos ou de design, na busca de maximizar ou minimizar um ou mais objetivos específicos, e assim encontrar a melhor solução para os objetivos especificados. Aliados a softwares de simulação energética, são capazes de realizar um grande número de simulações simultâneas, diminuindo o tempo de trabalho do tomador de decisão e reduzindo a necessidade de equipamentos caros e robustos. Com os algoritmos evolutivos é possível fazer a avaliação de muitas variáveis ao mesmo tempo, auxiliando a decisão final do projeto, o que poderia ser extremamente exaustivo se feito de forma prescritiva ou uma simulação por vez. Neste sentido, este artigo busca revisar e fazer uma análise crítica dos métodos utilizados para otimização da eficiência energética de edifícios, considerando parâmetros de sua envoltória que tenham sido avaliados com algoritmos genéticos. Esta revisão destaca os principais métodos, softwares e algoritmos utilizados para a simulação energética de edificações, levando em consideração as variáveis da envoltória que podem auxiliar na redução dos seus consumos energéticos e, consequentemente, diminuição dos impactos ambientais associados a edifícios.

1. INTRODUÇÃO

Com a crise de energia mundial, vivenciada nos anos 70, criou-se a necessidade de melhorar e adequar o padrão energético das edificações. Como resultado, novas leis e normativas sobre a temática foram criadas para minimizar os impactos energéticos das edificações. Desde então, os projetistas e construtores tiveram que se adaptar a essa nova realidade, buscando formas de edificar com maior eficiência energética (KHEIRI, 2018). A construção de um edifício requer estudo inicial e análise de múltiplas variáveis para que possa ser edificado com um desempenho energético adequado. São inúmeras as variáveis construtivas, climáticas e de design que influenciam no seu projeto.

Por isso, os métodos de otimização para o cruzamento dessas características vêm sendo aprimorados e largamente estudados nos últimos anos, como se pode exemplificar nos artigos de revisão sobre o tema de K. Parvin, et al. (2021), F. Kheiri (2018), X. Shi (2016), Y. Huang e J. Niu (2016), A. Nguyen, et al. (2014) e S. Attia, et al. (2013). Esta revisão sistemática da literatura (RSL) pretende avaliar as publicações que otimizam a envolvente de edificações com a finalidade de buscar a eficiência energética.

2. OBJETIVO

O principal objetivo deste estudo é identificar as produções que contribuam para a discussão da melhoria das envoltórias, utilizando algoritmos evolutivos (AE) como ferramenta de otimização das variáveis construtivas. Como objetivos secundários, elenca-se encontrar os principais softwares de simulação, otimização, as tipologias construtivas e quais a variáveis da envolvente são mais utilizadas na literatura.

O presente artigo de RSL tem como foco principal responder à seguinte pergunta: "Quais os algoritmos evolutivos mais utilizados na literatura para a otimização da eficiência energética, com foco na envoltória da edificação, e como são aplicados?"

3. MÉTODO

A fim de encontrar as premissas indicadas nos objetivos deste artigo, buscou-se por produções nas bases de dados, ScienceDirect e Scopus. Inicialmente foram delimitadas as palavras-chave, conforme a Tabela 1, posteriormente utilizadas para a formação da *string* de pesquisa.

Palavras-chave
Optimisation/Optimization/Optimize/Optimizing
Genetic Algorithm
Evolutionary Algorithm
Building Envelope
Building Energy Performance
Energy Efficiency

Tabela 1. Palavras-chave utilizadas para formação das strings de pesquisa.

A partir das palavras-chave, foi elaborada a *string* geral de busca das produções com abordagem da otimização, da envoltória da edificação, dos algoritmos evolutivos e, especificamente, dos algoritmos genéticos, e da eficiência energética. Para utilização na base de dados Scopus se utilizou a palavra-chave booleana na forma ("optim*") para encontrar todas as possíveis terminações da palavra. Na base de dados ScienceDirect as palavras foram elencadas como mostra a Tabela 2.

String de busca	*("optimization OR optimisation OR optimize OR optimizing") AND ("genetic algorithm" OR "evolutionary algorithms") AND ("building envelope") AND ("building energy performance") AND ("energy efficiency")*

Tabela 2. *String* de busca

Os critérios de inclusão utilizados para a avaliação dos trabalhos foram: publicados em *journals*, publicações em espanhol, inglês ou português e utilização de algum algoritmo. Como critério de exclusão a não utilização de AE. Como retorno das buscas realizadas nas bases de dados, a Tabela 3 apresenta os resultados finais de cada base.

ScienceDirect	Scopus	Total
195 (40%)	229 (60%)	424 (100%)

Tabela 3. Produções totais identificadas e filtradas na busca pelas bases de dados

No processo de seleção e identificação dos artigos, o *software* livre, desenvolvido pela Universidade Federal de São Carlos, StArt v. 2.3.4.2 foi utilizada como ferramenta de organização do conhecimento, fazendo o ajuste das publicações duplicadas. Foram identificados 487 trabalhos no total; destes, 63 eram duplicados, finalizando em 424 publicações para avaliação. Inicialmente, na fase de seleção, foi realizada a leitura dos *abstracts*, 155 artigos foram desqualificados a partir do critério de exclusão de utilização de algoritmo. Os 269 trabalhos restantes passaram para a fase de extração, com uma leitura quantitativa em busca das palavras-chave, resultando em um total de 104 trabalhos para análise, sendo 3 publicações de revisão bibliográfica sobre o tema.

Da amostra total, foi possível evidenciar que a *string* designada foi bastante genérica, visto que, nos resultados de busca, foram encontrados diferentes tipos de

investigação com o uso de algoritmos, sendo que os que não eram AE foram descartados, como por exemplo os métodos de controle *Artificial neural networks* e os algoritmos baseados em população do tipo *Swarm intelligence*.

Com as 101 pesquisas selecionadas e analisadas, foi elaborada uma matriz para a análise quantitativa das produções desenvolvidas. Na análise de dados da matriz, se considerou o ano de publicação, o *journal*, o autor principal, a tipologia construtiva analisada, o local de inserção do estudo(s) de caso(s), o(s) *software*(s) de simulação e de otimização, o(s) objetivo(s) da otimização, o tamanho da população e o número de gerações da otimização, assim como, as variáveis da envoltória otimizadas.

4. ANÁLISE DA AMOSTRA FINAL DE PRODUÇÕES

Como resultado das análises das publicações bibliográficas, os 3 artigos de revisão bibliográfica sobre o tema citam, evidenciam e apresentam a evolução da otimização energética em edificações. Attia et al. (2013), são os primeiros autores a avaliar o assunto, fazendo a revisão de 165 publicações sobre a otimização de edificações buscando o consumo nulo. No mesmo artigo, realizaram 28 entrevistas com especialistas (acadêmicos e do mercado) em otimização, com a intenção de verificar as ferramentas, as principais lacunas e as potencialidades.

Evidenciam que, na maioria dos casos, os modelos estudados são geometricamente simplificados, para otimizar o *software* de análise e diminuir o tempo de máquina requerido, assim como o tempo de simulação, que é reduzido a períodos específicos. Apresenta que nos últimos 10 anos houve um aumento na utilização de AE, do tipo algoritmos genéticos (AG) na otimização de edifícios, sendo o *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) o mais replicado nos estudos analisados, assim como o *software* MATLAB o mais utilizado nas pesquisas, em paralelo com o *software* de simulação EnergyPlus (ATTIA et al., 2013).

Huang e Niu (2016), fazem uma revisão histórica, da atualidade e dos potenciais da otimização do desempenho, com foco nas envoltórias. No artigo, discorrem sobre a evolução e a utilização da otimização computacional na simulação dos vários parâmetros que influenciam no desempenho da envoltória. Citam que os primeiros preceitos de otimização da envoltória, foram lançados em 1992, com o artigo publicado por Sullivan et al, aplicando uma análise de regressão como algoritmo de otimização.

Sobre a utilização de AE, os autores explicam que é uma pesquisa estocástica, inspirada na evolução biológica, na qual a função principal é selecionar os indivíduos de alto desempenho e fazer a reprodução destes com base nos parâmetros pré-definidos. O processo usual de um AE é a seleção, o cruzamento e a mutação. Inicialmente, é gerada uma população aleatória, depois são selecionados os melhores indivíduos, que serão escolhidos como os pais e, a partir deste ponto, serão realizados os cruzamentos e mutações necessárias para chegar ao objetivo determinado.

Como primeira publicação, utilizando AE, os autores citam a pesquisa de Coley e Schukat, de 2002, na qual são analisadas 5 variáveis para minimizar o consumo anual de energia de um modelo térmico simplificado (HUANG; NIU, 2016).

Como conclusão da revisão, evidenciam a lacuna de estudo, até então, relacionada à falta de estudos com foco no conforto térmico e o padrão de uso dos usuários. Da mesma forma, demonstram a predominância em estudos com somente um objetivo e normalmente sobre o consumo de energia. A maioria dos artigos analisa problemas mais complexos, relacionados à envoltória das edificações, no qual os profissionais tendem a utilizar AE. Por último, corroboram que o *software* de otimização MATLAB é mais utilizado nas pesquisas (HUANG; NIU, 2016).

K. Parvin et al. (2021), apresentam uma série de publicações relacionadas a controladores inteligentes e algoritmos de otimização para a gestão de energia na construção para alcançar os objetivos do desenvolvimento sustentável e trazem uma análise sobre a operação, o controle e a otimização do sistema de gestão de energia nas edificações. Neste sentido, evidencia os grupos de métodos de controle do sistema de gestão de energia de edificações como métodos inteligentes: métodos de aprendizagem (*learning methods)*, que seriam *Fuzzy system, Neural network* e *Hybrid methods.*

Para as técnicas de otimização, os autores dividem os métodos em matemática exata (modelos lineares e não lineares) e os métodos aproximados, onde se enquadram os AG. Estes estão divididos em heurísticos, metaheurísticos e inteligência artificial. Dentro do método metaheurístico estão os algoritmos baseados em população, que se dividem em AE (AG e evolução diferencial) e *Swarm intelligence (particle swarm, ant colony, artificial bee colony* e *harmony search* (PARVIN et al., 2021).

Existem outras revisões sobre otimização, que não foram delimitadas pela *string* desta RSL, como a de Nguyen, Reiter e Rigo (2014), que fazem uma revisão sobre os métodos de otimização aplicados à análise de desempenho de edificações, apresentam dados que corroboram com as demais investigações, demonstrando que os *softwares* de simulação e otimização mais utilizados são o EnergyPlus e MATLAB. Assim como, a maioria das publicações analisadas utilizam o AE como método de avaliação do desempenho da edificação.

Os autores apresentam uma série de razões para corroborar com o uso dos algoritmos genéticos em otimização de eficiência energética. A capacidade de suportar variáveis contínuas, discretas ou ambas; avaliação simultânea de um número de indivíduos em uma população, permitindo simulações paralelas, sendo ideal para resolver problemas multi-objetivo; e robusto no tratamento de descontinuidade (NGUYEN; REITER; RIGO, 2014).

Kheiri (2018) foca sua revisão em publicações que analisam a geometria e envoltória da edificação. Como as publicações já citadas, o autor evidencia o uso das ferramentas de simulação EnergyPlus e MATLAB, como de otimização, sendo as mais utilizadas na busca de soluções de eficiência energética para os tópicos analisados. Como conclusão, o autor indica que existem vários métodos e ferramentas

e que a decisão de qual utilizar vai depender da natureza do problema a resolver e das características do método de otimização.

Para a otimização da forma e/ou da envoltória, o autor cita os principais critérios que devem ser considerados na seleção do método: Robustez, os algoritmos devem funcionar para faixas de valores aceitáveis; Eficiência, métodos de otimização que tenham tempo computacional razoável; Precisão, ter a capacidade de otimizar dentro da faixa de precisão, sem arredondamentos excessivos; Variáveis, o número de variáveis analisada vai impactar diretamente na seleção da técnica de otimização; Multi-objetivo ou com somente um objetivo, neste caso, existe a restrição de ferramentas que são utilizadas para cada caso; Otimização local ou global, depende da escolha do algoritmo; Variáveis discretas (ex. sombras) e contínuas (ex. área), devem ser levadas em consideração, porque algumas ferramentas não comportam determinadas características e a Etapa do edifício, observar o momento da edificação, assim podendo ter mais detalhamento das propriedades utilizadas ou que serão utilizadas (KHEIRI, 2018).

Shi et al. (2016), analisam a otimização da eficiência energética a partir da perspectiva dos arquitetos em 116 artigos publicados até o ano de publicação e, também, demonstram que as ferramentas mais utilizadas são o EnergyPlus e MATLAB, assim como a predominância do uso de AG nas otimizações. Evidenciam que a maioria (66,4%) dos estudos são aplicados em modelos simplificados ou hipotéticos e os que são aplicados a estudos de caso reais, na maioria são voltados a ações de *retrofit*.

Os autores concluem que, da visão dos arquitetos, ainda existe espaço para a melhora dos métodos, assim como o desenvolvimento de softwares mais amigáveis, que se encaixem no fluxo de trabalho dos projetos (fases iniciais e pós-obra), especificando quais os melhores algoritmos para o estudo da eficiência energética e o melhoramento das técnicas de pós-processamento (SHI et al., 2016).

Como foco desta RSL, foram elencadas as publicações que investigam a melhoria da envoltória da edificação de forma objetiva, relacionado ou não com outros sistemas da edificação. Neste sentido, fica explícita a evolução do tema, durante os anos, visto que a partir do ano 2018 existe um maior número de artigos publicados, sendo 16 em 2018; 19 em 2019, 22 em 2020 e 13 até meados de 2021.

As revistas que publicaram os estudos relacionados nesta RSL foram *Energy and Buildings* (18,3%), *Applied Energy* (13,5%) e *Energy* (10,6%). Os demais trabalhos analisados foram publicados nas seguintes revistas: *Journal of Building Engineering* (7,7%), *Energies* (6,7%), *Sustainable Cities and Society* (5,7%), *Automation in Construction* (4,8%), *Building and Environment* (4,8%), *Journal of Cleaner Production* (4,8%), *Solar Energy* (2,8%), *Sustainability* (2,8%), *Building Simulation* (1,9%), *Energy for Sustainable Development* (1,9%), *Renewable Energy* (1,9%); as demais tinham apenas uma publicação.

Os principais autores do assunto são F. Ascione, com 34 publicações encontradas antes do refinamento do estudo e com 12 trabalhos selecionados para esta revisão; na sequência estão os autores I. García Kerdan, com 4 trabalhos selecionados, R.

Ruiz, M. com a autoria de 3 artigos e C. Baglivo, F. Harkouss, F. Shadram, Hamdy, R. Wang, C. F. Bandera, S. Yigit, X. Chen e Y. Lin com 2 publicações cada.

Pode-se verificar que a maioria das investigações estão focadas no setor residencial (59%), sendo que 37% avaliam edifícios multifamiliares e 22% residências unifamiliares. Dos restantes, 25% têm foco em edificações comerciais, 10% universitários e 6% em escolares. Dos estudos de caso, verificou-se que modelos hipotéticos e/ou simplificados para uma melhor análise dos resultados são utilizados com maior frequência (43%); na sequência, edifícios reais (28%) foram utilizados como modelo e, por fim, em 27% dos casos, os estudos de caso se deram com ações de retrofit. As localizações mais frequentes analisadas foram na China (22%), Itália (22%), França (7%), Espanha (7%), nos EUA (6%), no Irã (5%), na Turquia (5%) e no Reino Unido (5%).

Dos trabalhos analisados, entende-se que o *EnergyPlus* é um *software* de simulação amplamente utilizado, presente em 66% dos trabalhos; *DesignBuilder* (11%) e TRNSYS (8%) aparecem na sequência, como demonstrado na Figura 1.

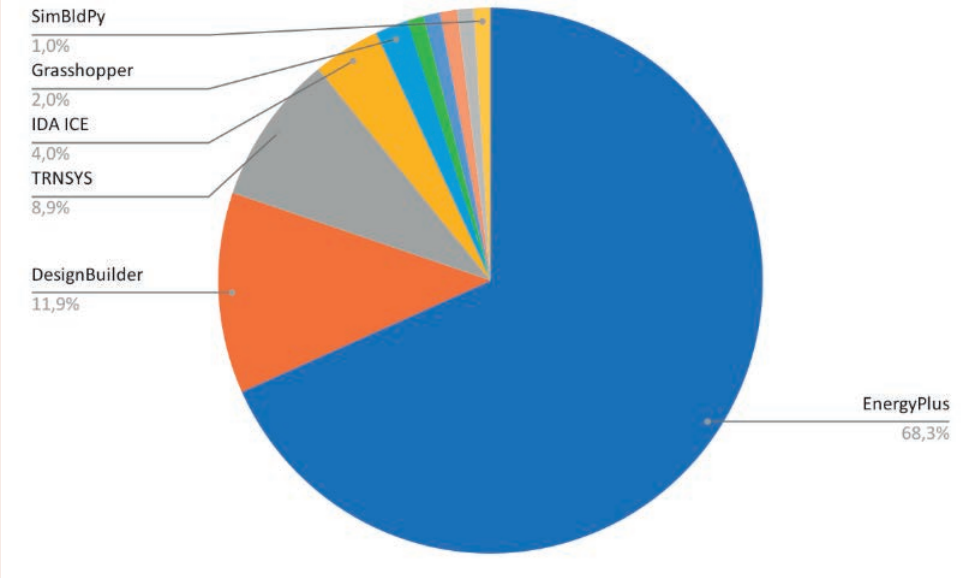

Figura 1. Representatividade dos *softwares* de simulação utilizados nas publicações avaliadas.

Em relação aos *softwares* em que a otimização foi realizada, o MATLAB foi o mais recorrente, seguido do Python e Octupus. Em muitos casos, Python, JEplus e JEplus + EA foram utilizados simultaneamente, como mostra a Figura 2.

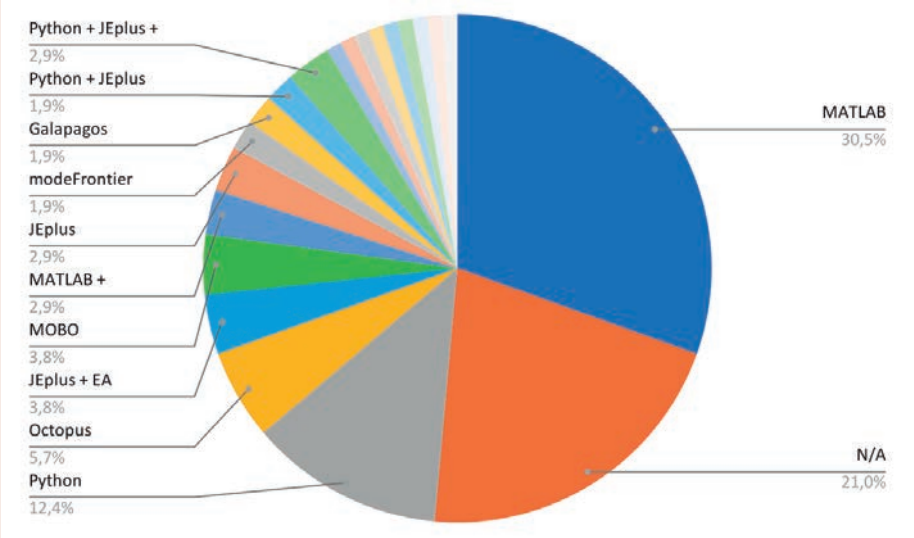

Figura 2. Representatividade dos *softwares* de otimização utilizados nos trabalhos analisados.

Da amostra analisada, foram evidenciadas as principais variáveis de desenho e desempenho da edificação. Na maioria dos casos, eram analisados a envoltória e algum sistema como: ar condicionado, aquecimento de água, sistemas de energia renováveis (fotovoltaicos e eólico), materiais de troca de fase e propriedades específicas dos sistemas construtivos. A Figura 3 apresenta as variáveis analisadas com foco na envoltória da edificação.

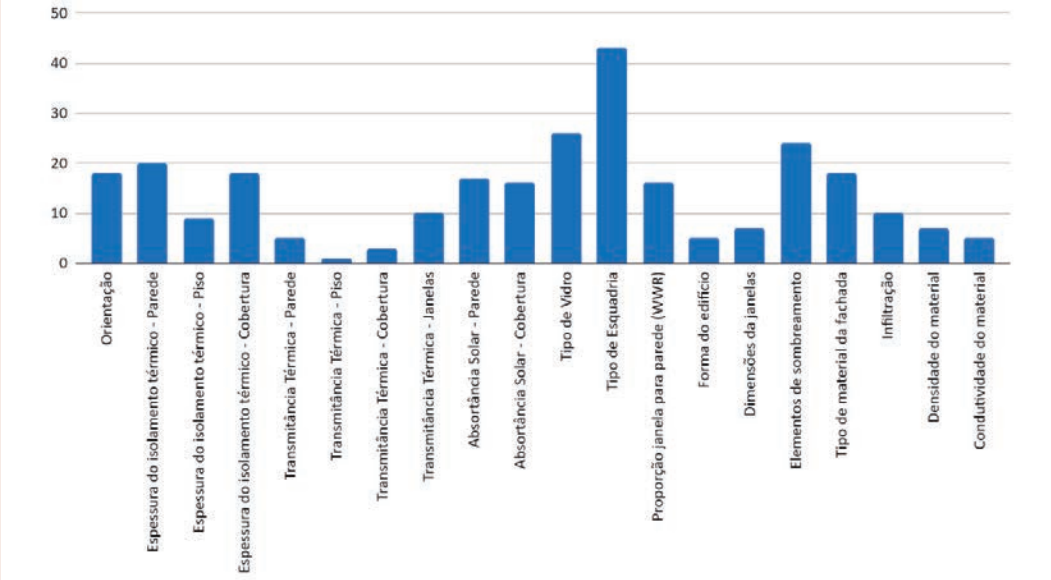

Figura 3. Variáveis analisadas com foco na envoltória da edificação.

O algoritmo genético NSGA-II é utilizado como método de otimização em 55,3% dos estudos analisados. Soma-se a esta porcentagem estudos com a utilização de variantes do NSGA-II, como o aNSGA-II, e estudos em que o NSGA-II foi utilizado simultaneamente com outros AG, resultando em 65%. Segundo Attia (2013), o NSGA-II encontra relações de compensação entre o consumo energético, os custos

de investimento ou o conforto térmico das edificações. A Tabela 4 indica os demais algoritmos utilizados nos 101 trabalhos analisados e elenca os autores.

AE	AUTORES
NSGA-II	B. Chen, et al. (2021); Y.-H. Lin, et al. (2021); X.Cao, et al. (2021); Y. Schwartz, et al. (2021); R. Wang, et al.(2021; 2020); U. Acar, et al. (2021); S.Naji, et al. (2021); J. Zhao e Y. Du (2020); F. Rosso, et al. (2020); C. Carpino, et al. (2020); J.Forde, et al. (2020); X. Wang, et al. (2020); S. Chaturvedi, et al. (2020); S. Yigit (2020); R. Guo (2020); R. Aghamolaei e M. R. Ghanni (2020); E. Markarian e F. Fazelpour (2019); S. A. Sharif e A. Hammad (2019); X. Chen, et al. (2019; 2016); F. Ascione, et al. (2019a; 2019b; 2017a; 2016); I. García Kerdan et al. (2019; 2017a; 2016; 2015); E.Jalilzadehazhari, et al.(2019); S. Zuhaib, et al. (2019); P. Shen, et al. (2019); T.Hong, et al. (2019); F. Harkouss, et al. (2018; 2018a); K. Chen, et al. (2018); D. Yang, et al. (2018); Y. Lin e W. Yang (2018); K. Grygierek e J. Ferdyn-Grygierek (2018); C. F. Bandera, et al. (2018); Y. Cascone, et al. (2018); R. Lapisa, et al. (2018); S. Gou, et al. (2018); M.-D. Yang, et al.(2017); G. R. Ruiz e C. F. Bandera (2017); G. Pernigotto, et al. (2017); F. Gilles, et al. (2017); S. K. Pal, et al. (2017); T. Niemelä, et al. (2017); G. R. Ruiz, et al. (2017; 2016); M.H.Wu, et al. (2016); S. Chardon, et al. (2016); M. Wu, et al. (2016); T. Méndez Echenagucia, et al. (2015); M. Rahmani, et al. (2015) e P. Penna, et al. (2015)
Variante NSGA-II	F. Ascione, et al. (2015a; 2015b; 2017a; 2018)
aNSGA-II	A. Ciardiello, et al. (2020)
NSGA-II, MOGA e MOPSO	B. Chegari, et al. (2021) e B.Si, et al. (2019)
NSGA-II, MOPSO, MOEA/D, and NSGA-III	H. Son e C. Kim (2018)
NSGA-II, MOPSO, MOGA e MODE	K. Li, et al. (2017)
SPEA-2 e HypE	D. Zhuang, et al. (2021) e F. Shadram, et al. (2020)
SPEA-2	L. Zhu, et al. (2020); F. Shadram e J. Mukkavaara (2019); Z. Li, et al. (2020) e K. Javanroodi, et al. (2019);
PR_GA	M. Hamdy, et al. (2011)
PR_GA_RF	M. Hamdy e G. M. Mauro (2017)
CMA-ES e HDE	E. Vettorazzi, et al. (2021)
hybrid evolutionary algorithm	A. Figueiredo, et al. (2020)
MOGA	F. Salata, et al.(2020) e F. Ascione, et al. (2019c; 2019d)
MOGA - II	C. Baglivo, et al. (2014) e C. Baglivo e Congedo (2015)
GA (Não especificado)	Y. Ke, et al. (2021); R. Foroughi et al. (2021); A. Albatayneh (2021); Foroughi, et al. (2021); S. Lu, et al. (2020); Y.Fang e S. Cho (2019); K. Jeong, et al. (2019); A. Keshtkarbanaeemoghadam, et al. (2018); Y. Li e Y. Rezgui (2017); F. Bre, et al. (2016) e J. Mao et al.(2016)
GA default MATLAB	P. Saikia, et al. (2020); S. N. Al-Saadi, et al. (2020); S. Chang, et al. (2020); A. Mohammadzadeh e M. Kavgic (2020); P. Jie et al. (2018); F. Ascione, et al. (2017b; 2017c; 2017d); S. Yigit e B. Ozorhon (2018); K. Y. Lin, et al. (2018) e J. Ferdyn-Grygierek e K. Grygierek (2017).

Tabela 4. Autores e respectivos algoritmos genéticos utilizados nos estudos

Da implementação do AE, detectou-se uma grande variedade no número de indivíduos (população) e no número de gerações. Verificou-se, aqui, a inexistência de um padrão em relação à implementação do algoritmo, visto que 23% dos artigos selecionados não especificaram ou mencionaram o tamanho da população e 30% dos artigos não especificaram ou mencionaram o número de gerações utilizados.

Dos trabalhos analisados e dos AE utilizados, evidenciou-se a relevante presença de otimização multi-objetivo (sendo a principal *keyword* encontrada na amostra de artigos). Os principais objetivos para otimização encontrados nos trabalhos foram a minimização da demanda energética, presente em 61% dos trabalhos, e maximização do conforto térmico (32%).

Ainda, objetivos como a maximização do desempenho energético, minimização das emissões de dióxido de carbono (CO_2), maximização da luz solar e maximização do conforto para ocupantes foram recorrentes. Análises financeiras, como *Life Cycle Cost* (LCC), foram encontradas em 40% dos trabalhos. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) se fez presente em 8% dos estudos.

A análise de aspectos ambientais, com vistas à sustentabilidade, foi encontrada em 7% dos trabalhos. A exergia foi analisada em 3% dos trabalhos. Outros aspectos analisados, porém, com baixa recorrência, foram o conforto visual, a minimização do ganho de calor interno, a ventilação e a renovação energética da edificação.

5. CONCLUSÕES

Esta RSL analisou 104 artigos a fim de encontrar os aspectos mais frequentes na literatura para a otimização da eficiência energética com foco na envoltória da edificação. Evidenciou-se e corroborou com os prévios artigos de revisão sobre o tema que o algoritmo genético NSGA-II é o método mais utilizado. A simulação energética se dá, na maioria dos casos, com o *software* EnergyPlus. A otimização, por sua vez, ocorre, com maior frequência, por meio de *softwares* como MATLAB, JEplus e a linguagem de programação Python.

Em relação aos estudos de caso, a utilização de modelos hipotéticos e/ou simplificados, os estudos em edificações reais ou casos de *retrofit* foram encontrados em números similares; os modelos hipotéticos ou simplificados, porém, são mais recorrentes. Das análises, aspectos financeiros, como LCC, e ambientais.

Por fim, verificou-se que os objetivos de otimização mais frequentes são a minimização da demanda energética e a maximização do conforto térmico, uma das lacunas citadas que veio a ser mais pesquisada nos últimos anos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Attia, S. et al. (2013). Assessing gaps and needs for integrating building performance optimization tools in net zero energy buildings design. **Energy & Buildings**, v. 60, p. 110–124. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.01.016>.

Huang, Y.; Niu, J. L. (2016). Optimal building envelope design based on simulated performance: History, current status and new potentials. **Energy and Buildings**, v. 117, p. 387–398. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.025>.

Kheiri, F. (2018). A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 92, n. May 2017, p. 897–920. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.080>.

Nguyen, A. T.; Reiter, S.; Rigo, P. (2014). A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. **Applied Energy**, v. 113, p. 1043–1058. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061>.

Parvin, K. et al. (2021). Intelligent Controllers and Optimization Algorithms for Building Energy Management towards Achieving Sustainable Development: Challenges and Prospects. **IEEE Access**, v. 9, p. 41577–41602.

Shi, X. et al. (2016). A review on building energy efficient design optimization rom the perspective of architects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 65, p. 872–884. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.050>.