

O uso das redes neurais artificiais para obtenção de índices de sustentabilidade de edifícios habitacionais: revisão sistemática da literatura

Carlos Alberto da Costa* e Cezar Augusto Romano

Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Rua Dep. Heitor Alencar Furtado, 5000. Curitiba-PR, Brasil. (CEP 81280-340). *E-mail: cabeto@utfpr.edu.br.

Resumo. A demanda por edifícios mais sustentáveis tem relação com os impactos deste setor, onde a depleção de recursos, incluindo energia, a geração de resíduos e as significativas emissões de gases de efeito estufa, que influem nas mudanças climáticas, dentre outros severos danos, se somam à informalidade e fatores de risco aos operários. As muitas peculiaridades envolvendo os edifícios em seu ciclo de vida pedem métodos de avaliação ponderados, capazes de agregar indicadores para prever o desempenho de diretrizes a eles aplicadas, permitindo a tomada de decisão, em meio à complexidade, sobretudo na construção habitacional. Assim, o objetivo desta pesquisa foi realizar uma revisão sistemática da literatura voltada à aplicação de métodos que se utilizam das Redes Neurais Artificiais para analisar indicadores ambientais, sociais e econômicos; deles obtendo índices de sustentabilidade para os edifícios habitacionais. As abordagens para este fim foram encontradas em 61 de 134 artigos selecionados, porém, a aderência envolvendo índices foi notada somente em oito destes artigos, os quais se apoiaram em poucos indicadores, quase sempre representando diretrizes, ou seja, ações para promover a sustentabilidade. Portanto, verificou-se carência de indicadores da performance produzida por tais diretrizes. Ficou evidente também o desafio de se fazer comparações por meio de um edifício de referência, representante do modo convencional de construção com o qual se está insatisfeito, gerando índices para outros edifícios planejados como sustentáveis.

Palavras-chave: Avaliação de edifícios; Redes neurais artificiais; Indicadores de sustentabilidade; Índices de sustentabilidade; Revisão sistemática da literatura.

Abstract. *The use of artificial neural networks to obtain sustainability indices for housing buildings: A systematic literature review.* The demand for more sustainable buildings is related to the impacts of this sector, where the depletion of resources, including energy, waste generation and significant greenhouse gas emissions, which influence climate change, among other severe damages, add up in formality and risk factors

Recebido
24/02/2023

Aceito
28/04/2023

Publicado
30/04/2023



Acesso aberto



ORCID

0000-0003-2575-9518
Carlos Alberto da
Costa

0009-0005-1364-9946
Cezar Augusto
Romano

for workers. The many peculiarities involving buildings in their life cycle, call for weighted evaluation methods, capable of adding indicators to predict the performance of guidelines applied to them, allowing decision-making in the midst of complexity, especially in housing construction. Thus, the objective of this research was to carry out a Systematic Literature Review focused on the application of methods that use Artificial Neural Networks to analyze environmental, social and economic indicators, obtaining sustainability indices for housing buildings. Approaches to this end were found in 61 of 134 selected articles, however, adherence involving indices was noted only in 8 of these articles, which were based on a few indicators, almost always representing guidelines, that is, actions to promote sustainability. Therefore, there was a lack of performance indicators produced by such guidelines. It was also evident the challenge of making comparisons through a reference building, representative of the conventional way of construction with which one is dissatisfied, generating indices for other buildings planned as sustainable.

Keywords: Buildings assessment; Artificial neural networks; Sustainability indicators; Sustainability indices; Systematic literature review.

Introdução

A indústria da construção caracteriza-se por sua complexidade e relevância, mas também pelos altos níveis de impacto. Se, por um lado, em termos socioeconômicos, representa parcela importante do produto interno bruto das nações, gerando renda para milhões de trabalhadores, por outro lado, nela há altas taxas de informalidade, além de conter muitos fatores de risco à vida dos seus operários e até dos seus usuários. Em termos ambientais, o setor utiliza intensamente dos recursos naturais, tais como a água doce e as diferentes formas de energia (eletricidade, gás, óleo, carvão e biomassa), sendo responsável por parte significativa das emissões de gases de efeito estufa. A depleção de recursos manifesta-se na grande geração dos resíduos sólidos urbanos, originada da produção de edifícios e obras de infraestrutura. As mudanças climáticas, os eventos extremos e as perdas de biodiversidade, dentre outras severas consequências ao planeta, têm significativa participação do segmento (JRC, 2012; IEA, 2019; UNEP, 2019; MPT e OIT, 2020).

Desenvolver novas tecnologias de projeto e gestão da construção, capazes de atender o crescimento da demanda por edifícios mais sustentáveis, que considerem os diversos interesses e *stakeholders*, implica contemplar múltiplos aspectos técnicos, ambientais, sociais e econômicos ao longo do ciclo de vida dos componentes e do produto edifício. Isto requer a definição de métodos de avaliação ponderados, baseados em indicadores que permitam prever e analisar o desempenho das soluções aplicadas aos edifícios, permitindo a tomada de decisão em problemas tão intrincados quanto os da construção habitacional (Silva, 2007; Agopyan e John, 2011).

Os tradicionais métodos de certificação de edifícios são mais subjetivos, nem sempre ponderados, e limitam-se a analisar a implantação de diretrizes, tecnologias e sistemas supostamente sustentáveis, nem sempre mensurando objetivamente os impactos finais destas iniciativas sobre o meio ambiente, menos ainda sobre a sociedade e a economia. Dado que os métodos de avaliação e certificação são majoritariamente

qualitativos, por isso mais abstratos, além de focados na dimensão ambiental, resta a busca por opções de avaliação quanti-qualitativas, propondo completar lacunas essenciais, tais como a escassez de indicadores consolidados e aceitáveis, especialmente nas dimensões social e econômica, bem como a validação de um método de síntese (índice), para uma ampla gama de indicadores, que melhor expresse a sustentabilidade do edifício construído ou por construir.

Diante deste contexto, o problema desta pesquisa revelou-se na questão se as Redes Neurais Artificiais (RNAs) seriam adequadas para normalizar, ponderar e agregar um amplo, porém mais equilibrado conjunto de indicadores ambientais, sociais e econômicos para obtenção de índices que melhor expressariam o grau de sustentabilidade de edifícios habitacionais?

O objetivo deste estudo, portanto, foi revisar sistematicamente a literatura voltada à aplicação das Redes Neurais Artificiais para obtenção de índices de sustentabilidade dos edifícios habitacionais, com base em conjuntos de indicadores ambientais, sociais e econômicos.

Metodologia

Neste estudo adotou-se a revisão sistemática da literatura para identificar e eleger artigos de pesquisa visando a extrair, a analisar e a sintetizar resultados na forma de dados e conceitos do maior número de estudos, cujos objetivos estavam na aplicação da análise multivariada por meio das Redes Neurais Artificiais (RNAs), associadas a conjuntos de indicadores ambientais, sociais e econômicos, para obtenção de índices de sustentabilidade para edifícios habitacionais. O fluxo do processo, incluindo a busca, a seleção, a análise e a síntese dos estudos, está apresentado na Figura 1.

Conforme Köche (2011), compreender e explicar o problema, objeto da investigação requer melhor conhecer e analisar as principais contribuições teóricas existentes por meio da revisão bibliográfica de qualidade.

Tendo em vista as diferentes possíveis categorias, este estudo teve caráter descritivo e, tanto pelos procedimentos gerais, como pelas técnicas de pesquisa, tratou-se de uma pesquisa bibliográfica e estatística, na medida em que se usou como procedimento de coleta de dados a própria pesquisa (revisão) bibliográfica, documental e tipológica, bem como se aplicou análise estatística de frequência e classificação dos dados.

Para localizar prioritariamente as fontes de informação bibliográficas produzidas e publicadas em periódicos ou em anais de eventos científicos, foram consultadas as bases de dados *Scopus*, *Web of Science* e, de forma complementar, o *Google Scholar*.

As bases *Scopus* e *Web of Science* são bancos de dados contendo resumos e citações da literatura científica internacional com revisão por pares, publicados em diferentes mídias nas áreas de ciência, tecnologia, saúde, ciências sociais, artes e humanidades. Nestas bases há disponibilidade de ferramentas para monitorar, analisar e visualizar as pesquisas, seja por tipo de documento, autor e afiliação, ou usando o recurso avançado, onde se pode refinar os resultados por tipo de acesso, tipo de fonte, ano, idioma, autor, afiliação, patrocinador de financiamento, além dos *links* para obter os artigos de texto completo.

O *Google Scholar* foi usado de forma complementar. Trata-se de um *site* para pesquisa de referências, tal qual um repositório de teses, dissertações, monografias, artigos científicos e livros. O instrumento de busca organiza os conteúdos de bases que têm acesso abertos, como a Scielo, Altametric e Wiley, ou ainda daqueles estudos disponíveis no Google Livros. Nele é possível aplicar as cadeias de termos, associando palavras chaves com os operadores booleanos e depois limitar a busca dentro de períodos específicos e classificar os achados por relevância ou por data. O uso desta base permite encontrar parte da literatura chamada “cinza”, ainda não publicada, muitas vezes não

revisada por pares, mas que, ainda assim, precisa ser analisada e eventualmente considerada.

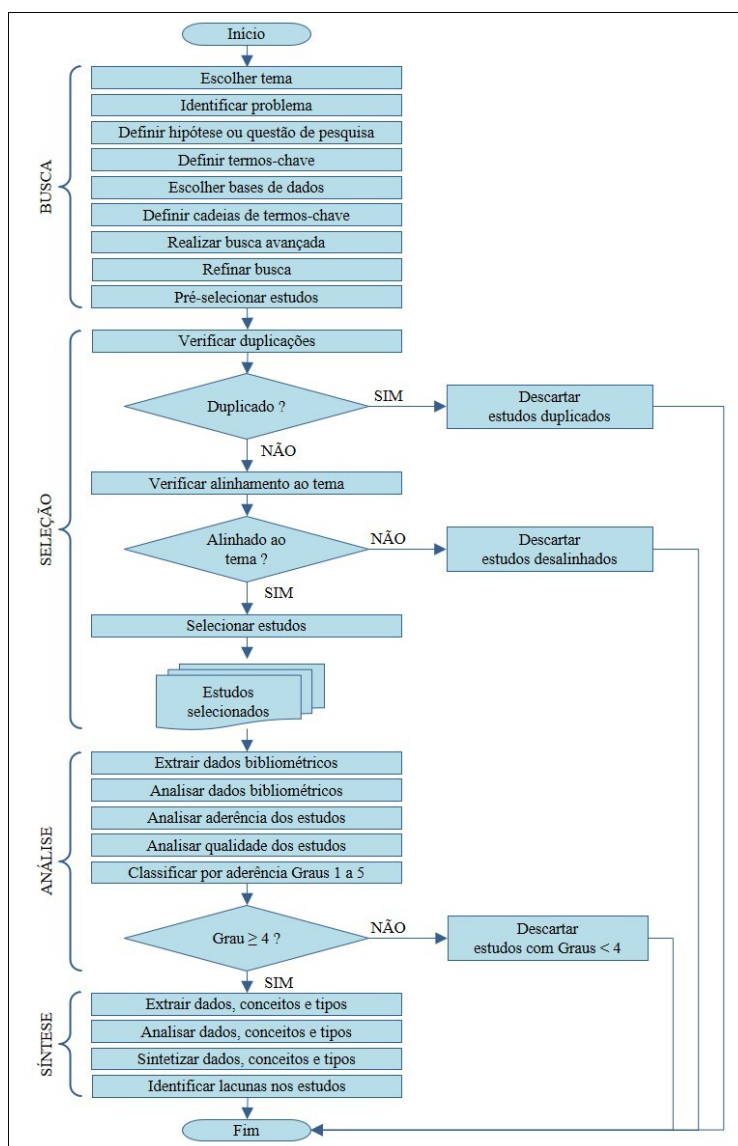


Figura 1. Fluxo do processo de revisão sistemática da literatura.

Nestas bases, foram utilizados os sistemas de busca avançada, submetendo cadeias de termos (*strings*), com uso de operadores booleanos para busca através do título, do resumo e do conjunto de palavras-chave.

As palavras-chave que compuseram as cadeias de termos para busca dos artigos científicos foram “greenbuilding”, “assessment” e “neural networks”. As buscas foram delimitadas quanto ao tipo de documento, artigos de pesquisa originais (*articles*) ou de revisão (*reviews*) publicados em periódicos (revistas e jornais científicos) ou em conferências, congressos e afins (*conference papers/proceedings papers*). Também se utilizou a delimitação pela língua inglesa, dado que os artigos, mesmo quando publicados em outras línguas, trazem resumo escrito em inglês.

Por outro lado, não se fez delimitação quanto ao ano de publicação para permitir a percepção da evolução do conhecimento ao longo do tempo; da mesma forma não se fez delimitação quanto às áreas de conhecimento, afiliação (instituições de ensino e pesquisa), fontes (jornais, revistas, eventos), país de origem, muito menos de autores, conforme se pode ver resumido na Tabela 1.

Tabela 1. Cadeia de termos (*strings*) para busca de fontes bibliográficas.

Bases de dados	Cadeia de termos
Scopus	TITLE-ABS-KEY ((("sustainable construction*" OR "sustainable building*" OR "green building*" OR "sustainability of building*" OR "sustainability of construction works") AND (assessment OR criteri* OR "assessment criteri*" OR evaluation* OR "evaluation criteri*" OR rating* OR "rating system*" OR "rating scale*" OR index OR indicator* OR "indicator* system*" OR measur* OR "measur* system*" OR metric* OR "metric system*" OR performance)) AND ("neural network*" OR "BP neural network" OR BPNN OR "artificial neural network*" OR ANN OR "artificial intelligence" OR "deep learning")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "cp") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English"))
Web of Science	(TS= ((("sustainable construction*" OR "sustainable building*" OR "green building*" OR "sustainability of building*" OR "sustainability of construction works") AND (assessment OR criteri* OR "assessment criteri*" OR evaluation* OR "evaluation criteri*" OR rating* OR "rating system*" OR "rating scale*" OR index OR indicator* OR "indicator* system*" OR measur* OR "measur* system*" OR metric* OR "metric system*" OR performance)) AND ("neural network*" OR "BP neural network" OR BPNN OR "artificial neural network*" OR ANN OR "artificial intelligence" OR "deep learning"))) AND IDIOMA: (English) Refinado por: TIPOS DE DOCUMENTO: (ARTICLE OR PROCEEDINGS PAPER OR REVIEW)
Google Scholar	("sustainable construction*" OR "sustainable building*" OR "green building*" OR "sustainability of building*" OR "sustainability of construction works") AND ("neural network*" OR "BP neural network" OR BPNN OR "artificial neural network*" OR ANN OR "artificial intelligence" OR "deep learning")

Os dados dos estudos selecionados nas bases *Scopus* e *Web of Science* foram exportados no formato de arquivos de valores separados por vírgula do aplicativo Microsoft Excel (csv) ou documentos de texto (txt).

A análise preliminar dos dados foi apresentada na forma de gráficos tipo rosca, linha e barras agrupadas. Eles foram analisados por tipo de documento, por ano de publicação, por autor pesquisador, por área de pesquisa, por instituição de ensino e pesquisa, por área de aplicação e pela abordagem técnica utilizada.

Para construção, visualização espacial e análise dos metadados bibliográficos exportados das bases *Scopus* e *Web of Science* foi utilizado o *software* VOSviewer (versão 1.6.15), desenvolvido pelo *Centre for Science and Technology Studies* (CWTS), da Universidade de Leiden (Países Baixos). Redes podem ser formadas com base em relações de coautoria, coocorrência de termos-chave, citação, acoplamento bibliográfico e cocitação. Também há a funcionalidade de mineração de textos e formação de redes de coocorrência de termos chave extraídos da literatura científica selecionada. Optou-se

neste estudo por construir e visualizar os mapas bibliométricos formados pelas relações de coautoria, tendo como unidade de análise os autores e, nas relações de cocitação, tendo como unidade de análise as referências citadas.

Conforme Galvão e Ricarte (2019), os documentos encontrados em uma revisão devem ser analisados criticamente, quando serão observadas a coerência do estudo, a qualidade metodológica, os resultados alcançados e as conclusões. Para analisar e classificar as fontes bibliográficas da amostra, foram utilizados os critérios “aderência ao tema” e “qualidade do estudo”, cujas escalas estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Escala e características para análise da aderência ao tema da pesquisa.

Escala de aderência	Características dos conteúdos
1. Muito Fraca Aderência	Envolve aspectos da sustentabilidade da indústria da construção e até o uso de indicadores e Redes Neurais Artificiais, mas não a avaliação da sustentabilidade dos edifícios.
2. Fraca Aderência	Envolve aspectos da sustentabilidade incluindo avaliação da sustentabilidade dos edifícios com uso de indicadores/critérios através de outros métodos analíticos/numéricos que não as Redes Neurais Artificiais.
3. Moderada Aderência	Envolve avaliação da sustentabilidade de componentes ou sistemas dos edifícios com uso de indicadores através de Redes Neurais Artificiais.
4. Forte Aderência	Envolve avaliação da sustentabilidade parcial (de até duas dimensões: ou social ou ambiental ou econômica) dos edifícios com uso de indicadores através de Redes Neurais Artificiais.
5. Muito Forte Aderência	Envolve avaliação da sustentabilidade integral (das três dimensões: social, ambiental e econômica) dos edifícios com uso de indicadores através de Redes Neurais Artificiais.
Viés qualitativo	Percepção da qualidade da estrutura e conteúdo do documento, incluindo sua aplicação prática e contribuição ao estudo: Péssimo (---); Muito Ruim (--); Ruim (-); Bom (+); Muito Bom (++); Excelente (+++).

Dos estudos com maior grau de aderência encontrados (grau ≥ 4) fez-se uma síntese dos conceitos, dados (tipos de indicadores) e desfechos apresentados pelos autores.

Resultados e discussão

Busca e seleção da literatura

Inicialmente foram feitas buscas usando a associação dos termos, e seus equivalentes, “green building” AND “assessment”, resultando em 6.725 artigos na base Scopus e 4.623 artigos na base Web of Science (números notadamente elevados). Muito embora alguns dos conceitos teóricos, advindos de estudos desta primeira associação, também tenham fundamentado este estudo, a análise foi refinada com a nova cadeia de termos “greenbuilding” AND “assessment”, AND “neural networks”, com seus respectivos equivalentes/sinônimos e suas variações (Tabela 1).

Da submissão da cadeia de termos-chave resultaram 92 artigos obtidos na base Scopus e 48 artigos obtidos na base Web of Science. Foram acrescentados ainda nesta análise outros 26 artigos obtidos via Google Scholar, considerando as limitações da busca avançada, utilizando a associação dos termos, e seus equivalentes “greenbuilding” AND “neural networks”. No total de 166 documentos, foram detectados 32 artigos duplicados,

restando, portanto, 134 artigos de pesquisa ou de revisão por analisar e verificar o alinhamento e aderência ao tema proposto, conforme se pode ver detalhado na Tabela 3.

Tabela 3. Artigos obtidos por base de dados consultada.

Bases de dados	Documentos
Scopus (Somente nesta Base)	58
Web of Science (Somente nesta Base)	18
Google Scholar (Somente nesta Base)	26
Scopus e Scopus (Repetidos nesta mesma Base)	2
Scopus e/ou Web of Science (Repetidos na duas Bases)	30
Final	134

Análise bibliométrica da literatura

Dentre os 134 artigos analisados, estão 82 artigos publicados em revistas ou jornais científicos; outros 37 artigos foram publicados em anais de eventos científicos, sendo que 15 daqueles estudos são artigos de revisão da produção científica, conforme ilustrado na Figura 2.



Figura 1. Artigos selecionados por tipo.

Conforme pode-se analisar na Figura 3, as primeiras publicações, envolvendo o tema de pesquisa, foram encontradas a partir de 2006; entre 2008 e 2014 foram produzidos de quatro a sete artigos ao ano; de 2015 até 2020 as pesquisas na área aumentaram e produziram entre 11 e 20 artigos ao ano.

A produção dos 134 estudos resultou do trabalho de 411 autores, dentre os quais se destacaram pela maior produção S. Zheng e Y. Zhou, ambos com três estudos publicados. Outros 10 autores, dentre eles Y. H. Ahn, J. C. P. Cheng e B. Dilkina, contribuíram com duas pesquisas, cada um, e os outros 398 autores, tais como M. Aamir, A. Y. Abdelaziz e M. Abdelhamid, publicaram um artigo cada, o que pode ser melhor analisado por meio da Figura 4.



Figura 3. Artigos publicados por ano.

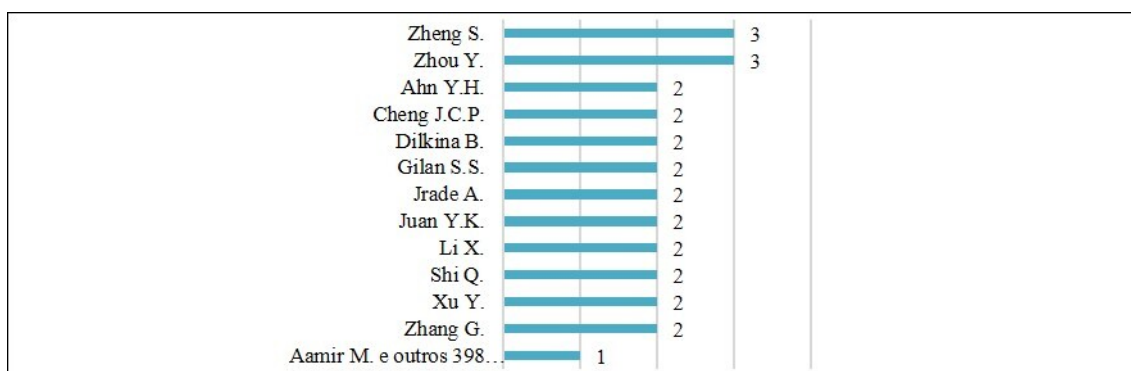


Figura 4. Artigos por autor entre 2006 e 2021.

Na base de dados *Scopus*, os maiores volumes de produção deram-se nas áreas de Engenharia, com 35% dos estudos, seguidos pelas Ciências da Computação (16%), Ciências Ambientais (13%), Energia (11%) e Ciências Sociais (8%). Na base de dados *Web of Science*, 26% dos artigos contribuíram para a área de Engenharia e, em menor medida, as áreas de Energia e Combustíveis (18%), Tecnologia de Construção de Edifícios (17%), Ciência e Tecnologia (11%), Ciências da Computação (6%) e Ciências Ambientais (5%). Estas comparações podem também ser feitas ao se analisar a Figura 5.

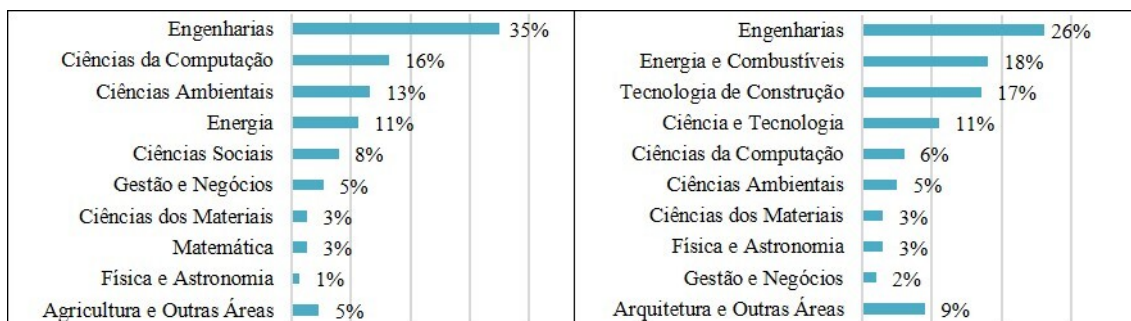


Figura 5. Artigos das bases Scopus e Web of Science por área de pesquisa.

Dentre as instituições de ensino e pesquisa que mais contribuíram com estudos atrelados a esta pesquisa (entre três e cinco publicações cada), conforme ilustração mais ampla apresentada na Figura 6, estão as universidades chinesas de Hong Kong, Hunan, Wuhan, Hanyang e ainda Tongji em Shanghai, também na China, além da norte-americana Georgiatech.

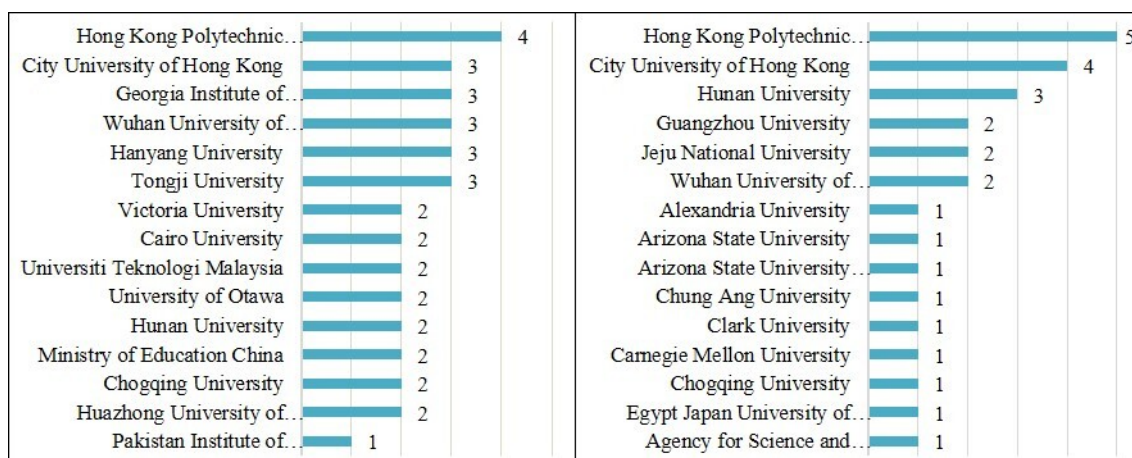


Figura 6. Artigos das bases *Scopus* e *Web of Science* por instituição.

As principais aplicações dos estudos selecionados ocorreram, conforme detalhado na Figura 7, principalmente na análise da eficiência energética dos edifícios, com 47 documentos, na avaliação da sustentabilidade da construção, com 26 casos, e na predição e análise do comportamento de componentes, materiais e sistemas, com 16 ocorrências, seguidos pela aplicação em sistemas de apoio às decisões de projetos com 13 estudos e seleção de componentes e fornecedores com 11 casos.



Figura 7. Artigos por área de aplicação.

A abordagem pelas Redes Neurais Artificiais para fins de predição, generalização, comparação, otimização e classificação, dentre outras finalidades, foram encontradas em 61 dos 134 artigos analisados. Entretanto, a aplicação das RNAs, envolvendo especificamente a avaliação da sustentabilidade na construção de edifícios, ocorreu efetivamente somente em oito daqueles artigos. Outros cinco estudos utilizaram abordagem pela inteligência artificial, conforme se pode perceber analisando a Figura 8.

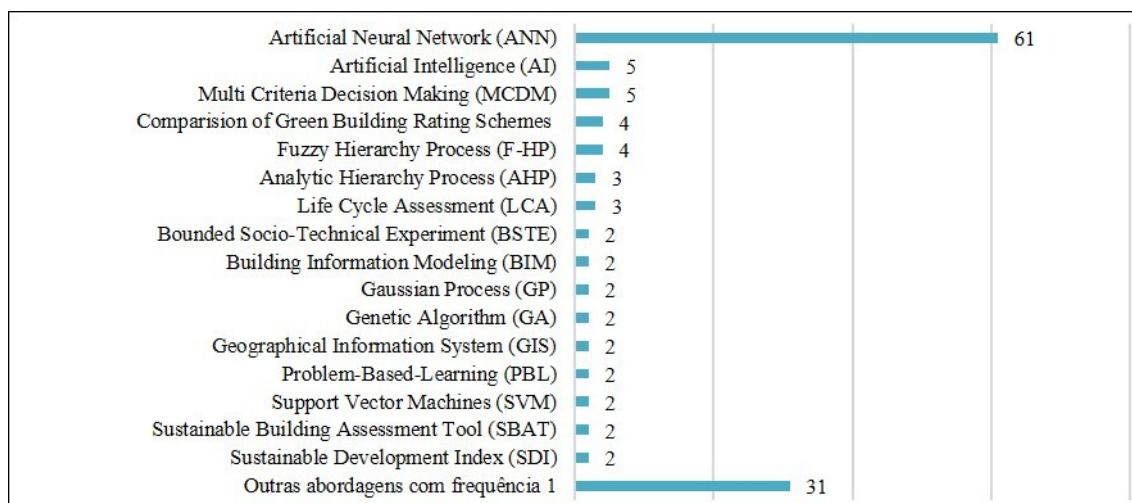


Figura 8. Artigos por abordagem utilizada.

Os fundamentos teóricos e conceituais utilizados pelos autores também foram analisados por meio das referências mais cocitadas, logo, centrais ou também chamadas seminais na área desta pesquisa.

Dentre os 92 estudos originários da base *Scopus* foram localizadas 3.235 referências com no máximo três cocitações, sendo que 48 delas obtiveram pelo menos duas cocitações. Somente seis destes estudos utilizaram abordagem pelas RNAs, porém aplicadas à predição de eficiência energética de edifícios. O mapa de cocitações por referências, construído a partir do *software* VOSviewer, e ilustrado pela Figura 9 (parte a), fez notar 33 conexões distribuídas em dois *clusters*. O primeiro cluster reuniu, dentre outros, os estudos de Dong et al. (2005); e, Perez-Lombard et al. (2008), que foram aqueles cocitados por três vezes cada.

Os 48 artigos gerados pela base Web of Science, utilizaram o total de 2.444 referências, sendo que 38 delas tiveram pelo menos três até o máximo de cinco cocitações. O mapa de cocitações por referências, construído a partir do *software* VOSviewer, está ilustrado pela Figura 9 (parte b) e sinalizou conexões entre as 38 referências formando cinco *clusters*. O primeiro cluster desta base também apontou, dentre outros, os estudos de Dong et al. (2005); e Perez-Lombard et al. (2008), sendo cocitados por seis e cinco vezes, respectivamente. O segundo cluster reuniu, dentre outros, os estudos de Zhao e Magoulès (2012); Hernandez Neto e Fiorelli (2008); e Fouquier et al. (2013) com oito, cinco e cinco cocitações, respectivamente. Em 15 das 38 referências, foi utilizada abordagem pelas RNAs, no entanto, aplicadas à obtenção de eficiência energética de edifícios.

Os trabalhos cocitados, tanto na base *Scopus*, como na base *Web of Science*, estavam desalinhados com o propósito deste estudo, assim, nenhum deles pôde ser usado, contribuindo com outros indicadores de sustentabilidade, muito menos com a avaliação da sustentabilidade na construção.

A análise de coautoria entre 275 autores, identificados pela submissão dos dados bibliográficos da base *Scopus* ao *software* VOSviewer, revelou 81 grupos de autores (*clusters*), sendo 6 destes *clusters* os maiores, com ao menos sete autores colaborando entre si.

A análise de coautoria entre 147 autores, obtida pela submissão dos dados bibliográficos da base Web of Science ao *software* VOSviewer, apontou 46 grupos de autores (*clusters*), sendo dois destes *clusters* os maiores com sete autores e três deles com pelo menos seis autores colaborando entre si.

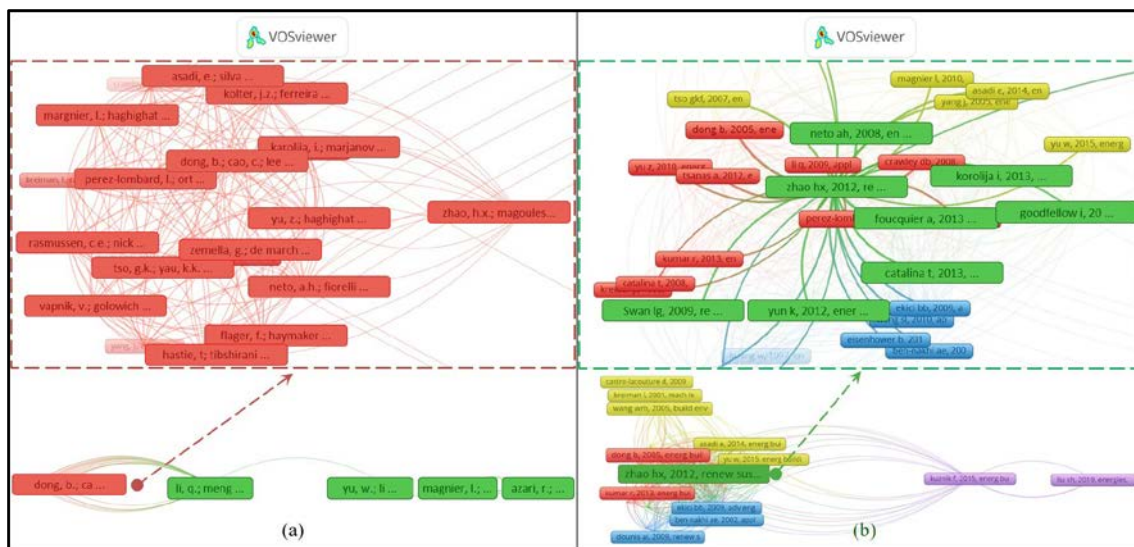


Figura 2. Cocitação nas bases Scopus (a) e Web of Science (b). Fonte: Adaptado de análise no software VOSviewer, 2022.

A mesma baixa intensidade de colaboração percebida entre os autores da base *Scopus* também aparece ao se ver o mapa de coautoria da base *Web of Science* com unidade de análise por autor, conforme representado na Figura 10 (partes a e b).

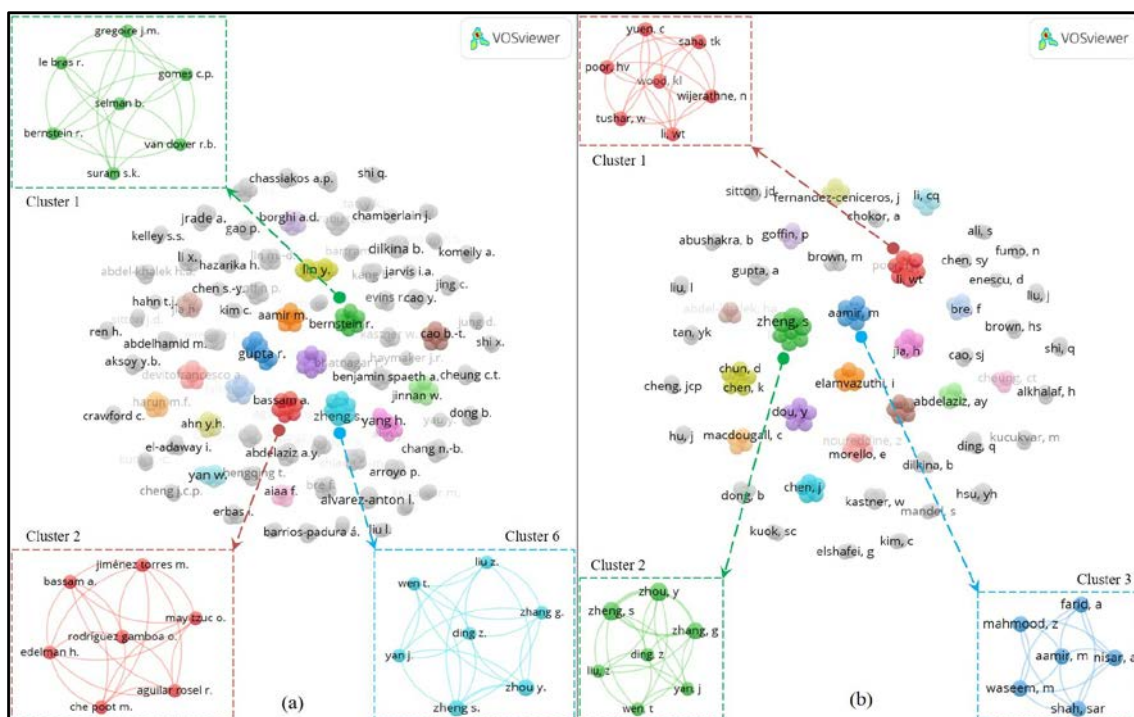


Figura 10. Coautoria nas bases *Scopus* (a) e *Web of Science* (b). Fonte: Adaptado de análise no software VOSviewer, 2022.

Análise de aderência e qualidade da literatura

Para selecionar a literatura mais relevante, alinhada e coerente com o tema da pesquisa, foi adotado como critérios o grau de aderência, bem como o nível de qualidade dos artigos, observando-se a estrutura e o conteúdo dos trabalhos, incluindo a aplicação prática e contribuição para esta análise.

Na Tabela 4 estão apresentadas as primeiras linhas (grau ≥ 4) da matriz de avaliação de aderência e classificação de qualidade dos artigos encontrados nas bases *Scopus*, *Web of Science* e *Google Scholar*. Podem-se ver neste conjunto os respectivos autores e o ano de cada publicação, bem como a abordagem utilizada e a aplicação de cada estudo. A análise completa com os 134 estudos pode ser vista em Costa (2021).

Tabela 4. Artigos com grau de aderência ao tema da pesquisa ≥ 4 .

Bases	Autoria/ano	Abordagem	Aplicação	Aderência
Google Scholar	Chen e Min (2007)	Artificial Neural Network (ANN)	Avaliação da sustentabilidade da construção - edifícios	4 +
Google Scholar	Si et al. (2008)	Artificial Neural Network (ANN)	Avaliação da sustentabilidade da construção - edifícios	4 +
Google Scholar	Shi et al. (2009)	Artificial Neural Network (ANN) Genetic Algorithm (GA)	Avaliação da sustentabilidade da construção - edifícios	4 +
Google Scholar	Zhi et al. (2010)	Artificial Neural Network (ANN)	Avaliação da sustentabilidade da construção - edifícios	4 +
Google Scholar	Qi et al. (2012)	Artificial Neural Network (ANN)	Avaliação da sustentabilidade da construção - edifícios	4 +
Scopus	Zhang e Shi (2012)	Artificial Neural Network (ANN)	Avaliação da sustentabilidade da construção - edifícios	4 +
Scopus Web of Science	Xia e Liu (2013)	Artificial Neural Network (ANN) Life Cycle Assessment (LCA)	Avaliação da sustentabilidade da construção - edifícios	4 -
Scopus Web of Science	Ding et al. (2008)	Artificial Neural Network (ANN) Modular Const. Least Square (MCLS)	Avaliação da sustentabilidade da construção - edifícios	4 --
...	...	...	...	...
Google Scholar	Shama e Motlak (2019)	Housing Sustainability Assessment Indicators System (HSAIS)	Avaliação da sustentabilidade da construção - edifícios	2 ++

Fonte: Adaptado de Costa (2021).

Tendo por base a escala de aderência e o viés qualitativo (Tabela 2), verificou-se que em 41 artigos havia “moderada aderência” (grau 3) ao tema, pois envolveram a avaliação da sustentabilidade de componentes ou sistemas dos edifícios, com uso de indicadores inseridos em RNAs. Somente em oito artigos se encontrou “forte aderência” (grau 4), uma vez que envolveram a avaliação da sustentabilidade parcial (de até duas dimensões, ou social ou ambiental ou econômica) dos edifícios, com uso de indicadores

através de RNAs. Entretanto, nenhum dos estudos apresentou “muito forte aderência” ao tema (grau 5), pois deveriam ter envolvido avaliação da sustentabilidade integral (das três dimensões: social, ambiental e econômica) dos edifícios, com uso de indicadores inseridos em RNAs. Especialmente, não se encontrou nenhum artigo que incluísse explicitamente a dimensão social para avaliação da sustentabilidade dos edifícios, expondo assim, uma lacuna a ser explorada. Estas distribuições podem ser vistas na Figura 11.

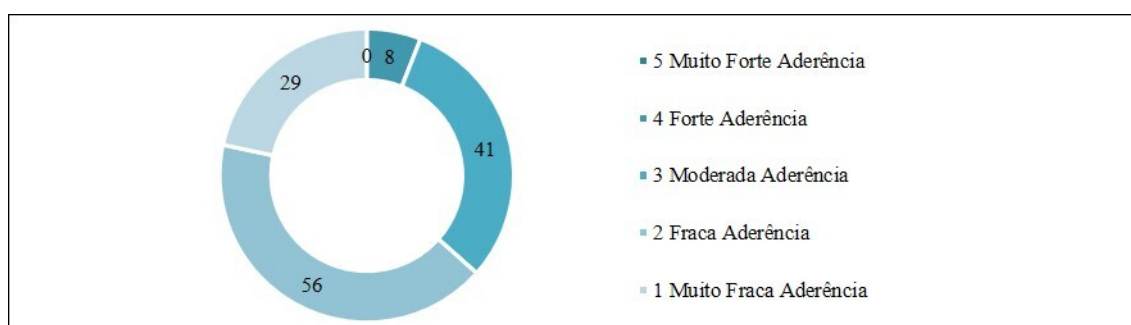


Figura 11. Artigos por grau de aderência ao tema da pesquisa.

Quanto ao viés qualitativo, dentre os 134 artigos analisados, 80 foram classificados como “ruins” (-) e um como “muito ruim” (--). De outro lado, 47 artigos foram classificados como “bons” (+), quatro artigos classificados como “muito bons” (++) e outros dois artigos receberam classificação como “excelentes” (+++). Contudo, os artigos classificados como “muito bons” ou “excelentes” não utilizaram abordagem por meio de RNAs, ainda assim contribuem com a formação do conjunto de indicadores.

Evidências encontradas na literatura

Chen e Min (2007) apontaram que a avaliação da construção sustentável é uma questão muito abrangente, pois vários fatores influenciam uns aos outros e existe uma relação não linear complexa. Para os pesquisadores, as RNAs são capazes de lidar com o problema através de aprendizagem e treinamento, estabelecendo uma abordagem qualitativa integrada à quantitativa. A função de generalização fornece uma ferramenta poderosa para resolver esse problema. O modelo de rede neural se caracteriza por autoaprendizagem a partir de amostras típicas, auto-organização, forte capacidade adaptativa, forte tolerância a falhas e capacidade de lidar com dados ruidosos ou incompletos, podendo simular com precisão o trabalho de avaliação de especialistas, encurtando o ciclo de avaliação.

A construção sustentável, segundo Chen e Min (2007), pode ser definida como aquela eficiente no uso de recursos, pois busca alta performance, baixo consumo e proteção ambiental; o que pode ser expresso conforme o sistema de indicadores sintetizados na Tabela 5.

O principal desafio apontado por Si et al. (2008) para os desenvolvedores de métodos de avaliação de edifícios, está em reconhecer e resolver as possíveis e complexas interações e sinergias entre os diversos indicadores de desempenho. Alguns indicadores têm efeitos diferentes sobre os resultados da avaliação em diferentes intervalos numéricos, e existe certa relação não linear entre o desempenho de cada indicador e o desempenho total do edifício.

Tabela 5. Indicadores propostos por Chen e Min (2007).

Índice	Indicadores nível 1	Indicadores nível 2	DS
Construção sustentável	U1 Gestão	V11 Organização de gestão de construção sustentável	S
		V12 Investimento em construção sustentável	E
		V13 Plano de construção sustentável	S
		V14 Treinamento de construção sustentável	S
		V15 Pesquisa e desenvolvimento de construção sustentável	S
	U2 Eficiência	V21 Manutenção de equipamentos de construção sustentável	S
		V22 Prevenção e controle da poluição do ar	A
		V23 Prevenção e controle de poluição sonora	A
		V24 Prevenção de poluição da água	A
		V25 Gerenciamento de resíduos de construção	A
		V26 Redução do impacto da construção sobre o meio ambiente e ecologia	A
		V27 Redução do consumo de energia	A

DS: Principal dimensão da sustentabilidade. A = Ambiental; S = Social; E = Econômica. Fonte: Adaptado de Chen e Min (2007).

Conforme por Si et al. (2008), a avaliação de edifícios sustentáveis precisa lidar com estes fatores subjetivos e não lineares, com ruído de informação, e a correlação entre vários indicadores não pode ser completamente evitada. Para os autores, o melhor método de avaliação incluiria a avaliação de especialistas, mas o processamento manual se tornaria um sistema cada vez maior e complexo. Além do que, os pesos gerados, usando métodos subjetivos e opiniões de diferentes especialistas, podem ser muito distintos.

O método apresentado por Si et al. (2008), propôs analisar os casos de 38 edifícios de escritórios por meio das RNAs com retropropagação. Conforme apresentado na Tabela 6, o estudo partiu de um conjunto de 33 indicadores subdivididos em outros dois tipos, a qualidade ambiental (Q) e a carga ambiental (L - *Load*), sendo que a eficiência é diretamente proporcional a Q e inversamente proporcional a L. Há quatro indicadores de primeiro nível do tipo Q e cinco do tipo L, incluindo 15 e 18 indicadores de segundo nível, respectivamente. Entretanto, ao se investigar o desempenho dos indicadores do tipo L de edifícios, L não é usado diretamente, mas convertido em redução de carga ambiental do edifício (LR - *Load Reduction*). A pontuação total dos indicadores do sistema é 5. De acordo com a fórmula $vL = 5 - vLR$, a pontuação do índice LR pode ser convertida na pontuação do índice L.

Shi et al. (2009) apresentaram um conjunto de indicadores para avaliação de alternativas para a construção sustentável, levando em conta a utilização de recursos, a proteção ambiental e a gestão da construção, de acordo com o detalhamento na Tabela 7. Os autores propuseram a análise de correlação entre 22 indicadores, através da associação híbrida entre as Redes Neurais Artificiais do tipo *Backpropagation* (RNAs BP) e os Algoritmos Genéticos (AG), aplicados em um estudo de caso de uma obra corporativa com 142.000 m², a fim de verificar a adaptabilidade do modelo proposto.

Na concepção de Zhi et al. (2010), para construir um modelo de avaliação de edifícios sustentáveis, devem ser combinados múltiplos fatores para determinar uma matriz de avaliação contendo indicadores relevantes. A avaliação deve ser sistematizada, modelada e quantificada, sendo um método científico de tomada de decisão, que combina a análise qualitativa e quantitativa. Para os autores, os métodos de avaliação abrangentes, tais como Delphi, AHP (*Analytic Hierarchy Process*) e Fuzzy, que requerem opiniões de especialistas, contêm fortes defeitos por avaliação subjetiva.

Tabela 6. Indicadores propostos por Si et al. (2008).

Classe	Indicador de primeiro nível	Indicadores de segundo nível	DS
Q Qualidade ambiental	Q1 Qualidade ambiental externa	Q11 Proteção e melhoria do ambiente nativo	A
		Q12 Projeto do sistema viário	S
		Q13 Projeto de iluminação externa	S
		Q14 Padrões de ruído ambiental externo	S
	Q2 Qualidade ambiental interna	Q21 Ambiente acústico	S
		Q22 Ambiente lumínico	S
		Q23 Ambiente térmico	S
	Q3 Qualidade do ar interno	Q31 Ventilação interna	S
		Q32 Projeto do sistema de ar condicionado e ventilação	S
		Q33 Projeto de arquitetura e decoração	S
		Q34 Exaustão e ventilação	S
	Q4 Serviços e funções	Q41 Funcionalidade arquitetônica	S
		Q42 Acessibilidade	S
		Q43 Sistema de abastecimento e drenagem	S
		Q44 Coleta de lixo	S
LR Redução do nível de cargas ambientais	LR1 Impacto ambiental no entorno	LR11 Impacto ambiental no entorno ecológico	A
		LR12 Impacto ambiental no entorno físico	A
	LR2 Poluição atmosférica	LR21 Controle de emissões de CO ₂	A
		LR22 Emissões de substâncias depletoras de ozônio	A
		LR23 Poeiras	S
		LR24 Hidróxidos	S
		LR25 Sulfetos	S
	LR3 Consumo de energia	LR31 Economia de energia do edifício principal	A
		LR32 Melhoria de eficiência energética	A
		LR33 Utilização de energia renovável	A
	LR4 Materiais e recursos primários	LR41 Controle dos processos construtivos	S
		LR42 Redução de consumo de materiais e recursos	A
		LR43 Reaproveitamento de materiais e resíduos	A
		LR44 Reciclagem e redução de resíduos	A
	LR5 Recursos hídricos	LR51 Tratamento de água poluída	A
		LR52 Uso racional de água da chuva	A
		LR53 Aproveitamento de água no paisagismo	A
		LR54 Equipamentos economizadores	A

DS: Principal dimensão da sustentabilidade. A = Ambiental; S = Social; E = Econômica. Fonte: Adaptado de Si et al. (2008).

Em resposta, os autores destacam que o método das RNAs permite aprendizado por meio de uma série de amostras, assim, depois de inserir os parâmetros característicos do problema real na rede, a saída da rede neural pode dar a resolução do problema. Ao comparar os Processos de Análise Hierárquica e as Redes Neurais Artificiais, usando os casos de edifícios reais como exemplo, os autores defenderam que o método das RNAs elimina a subjetividade da avaliação feita por especialistas no método AHP.

Tabela 7. Indicadores propostos por Shi et al.(2009).

Objetivo	Índice 1º grau	Índice 2º grau	Índice 3º grau	DS
Construção sustentável	A Utilização de recursos	A1 Utilização de energia	A11 Economia de energia	A
			A12 Utilização de energia renovável	A
		A2 Utilização de água	A21 Economia de água	A
			A22 Utilização de água reciclada	A
		A3 Recursos naturais	A31 Utilização de recursos naturais	A
		A4 Utilização de materiais	A41 Seleção de materiais	S
			A42 Economia de materiais	A
			A43 Utilização de resíduos de construção	A
	B Proteção ambiental	B1 Poluição sonora	B11 Controle da poluição sonora	S
		B2 Resíduos sólidos	B21 Controle de resíduos sólidos	A
		B3 Poeira	B31 Controle da poeira	S
		B4 Poluição da água	B41 Controle da água de chuva	S
			B42 Controle de águas residuais	S
		B5 Poluição lumínica	B51 Controle da poluição lumínica	S
		B6 Conservação do solo	B61 Barreiras e tratamento da terraplenagem	A
			B62 Poluição do solo	A
	C Gestão da construção	C1 Gestão ambiental	C11 Sistema de certificação ambiental	A
			C12 Sistema de gestão ambiental	A
		C2 Gestão local	C21 Instalações provisórias	S
			C22 Plano de gestão de tráfego	S
		C3 Gestão de pessoas	C31 Segurança e saúde ocupacional	S
			C32 Segurança em uso do edifício	S

DS: Principal dimensão da sustentabilidade. A = Ambiental; S = Social; E = Econômica. Fonte: Adaptado de Shi et al. (2009).

Tabela 8. Indicadores propostos por Zhi et al. (2010).

Alvo	Critérios	Indicadores	Unidade	DS
A Desempenho ecológico	B1 Consumo de recursos	B11 Consumo anual de energia por unidade de área	kWh/m ²	A
		B12 Consumo anual de calor por unidade de área	kJ/m ²	A
		B13 Consumo anual de gás por unidade de área	m ³ /m ²	A
		B14 Área disponível per capita	m ² /pessoa	S
		B15 Consumo anual de água por unidade de área	m ³ /m ²	A
	B2 Qualidade ambiental interna	B21 Concentração de CO ₂	mg/m ³	S
		B22 Concentração de gases nocivos	mg/m ³	S
		B23 Temperatura ambiente	°C	S
		B24 Umidade relativa do ar	%	S
		B25 Iluminamento	lx	S
		B26 Ruído de fundo	dB	S
		B27 Grau de satisfação do usuário	1 a 5	S

DS: Principal dimensão da sustentabilidade. A = Ambiental; S = Social; E = Econômica. Fonte: Adaptado de Zhi et al. (2010).

Zhi et al. (2010) definiram um conjunto de indicadores a partir de vários sistemas de avaliação e o dividiram em três níveis, alvo, de critério e de indicador. O nível de desempenho ecológico pode ser analisado a partir dos critérios, que incluem o consumo de recursos e a qualidade ambiental interna. O último nível é composto por 12 indicadores, conforme apresentado na Tabela 8.

Qi et al. (2012) propuseram um método para avaliação de edifícios sustentáveis com base em Redes Neurais Artificiais com retropropagação (*Backpropagation* - BP). Por meio da rede treinada, vários planos de construção sustentável foram discutidos, avaliados e selecionados para verificar a praticidade e a confiabilidade dos modelos. Para os autores, as RNAs são amplamente utilizáveis nos principais campos da engenharia, além das ciências naturais, economia social, etc., pois podem lidar bem com as muitas relações difusas, incertas e não lineares entre diversas variáveis.

Os pesquisadores também destacaram quatro princípios a serem observados para o desenvolvimento de modelos de avaliação da sustentabilidade: o princípio do desenvolvimento sustentável, que visa a atender às diversas necessidades humanas contemporâneas sem prejudicar os interesses fundamentais das gerações futuras; o princípio do ciclo de vida, que considera as etapas desde o planejamento, passando pelas fases de projeto e construção e por fim de manutenção dos edifícios; o princípio de operabilidade, determina que se devem selecionar indicadores que tenham um impacto maior no ambiente construído, sem aumentar o custo e o tempo de avaliação, exigindo que o método seja simples e fácil de operar; e, finalmente, o princípio da dinâmica considera que a avaliação de edifícios sustentáveis está em constante mudança, por consequência, deve levar em conta novas condições e requisitos sociais, técnicos e ecológicos.

No método proposto por Qi et al. (2012) a avaliação do edifício sustentável está dividida em três níveis, conforme apresentado na Tabela 9, incluindo nível alvo (W), mais três indicadores de primeiro nível (U), que consideram o consumo de recursos, a adequação do ambiente construído e a durabilidade do sistema construtivo. Estes resultam desdobrados em outros oito indicadores no segundo nível (Vij).

Tabela 9. Indicadores propostos por Qi et al. (2012).

Índice nível alvo (W)	Indicadores nível 1 (Ui)	Indicadores nível 2 (Vij)	DS
W Avaliação do edifício sustentável	U1 Consumo de recursos	V11 Utilização de recursos terrestres	A
		V12 Utilização de recursos de energia	A
		V13 Aproveitamento de recursos hídricos	A
		V14 Utilização de materiais de construção	A
	U2 Adequação do ambiente construído	V21 Carga ambiental	S
		V22 Ambiente de convivência	S
	U3 Durabilidade do sistema construtivo	V31 Otimização no ciclo de vida da construção	S
		V32 Implementação de medidas de salvaguarda	S

DS: Principal dimensão da sustentabilidade. A = Ambiental; S = Social; E = Econômica. Fonte: Adaptado de Qi et al. (2012).

Zhang e Shi (2012) propuseram utilizar as RNAs como uma abordagem para analisar prioritariamente o aspecto econômico da sustentabilidade dos edifícios, uma vez que os sistemas de análise qualitativa não enfatizam tal aspecto, como o *Leadership in*

Energy and Environmental Design (LEED), por exemplo. Assim, novos padrões para avaliação econômica de edifícios podem permitir que os consumidores, investidores e projetistas entendam melhor qual edifício é mais econômico, mais favorável, e tomem decisões mais consistentes quanto aos investimentos. Os autores acrescentam que a avaliação econômica dos edifícios deve combinar análise quantitativa com análise qualitativa, eliminando, tanto quanto possível, a subjetividade, como acontece em métodos, tais como Delphi, AHP e Fuzzy.

Os indicadores utilizados por Zhang e Shi (2012) foram divididos em três níveis (U, Ui e Uij). Além do nível meta, que é o indicador de sustentabilidade econômica, outros dois níveis estruturam a análise. No primeiro nível vê-se a subdivisão entre três indicadores: a relação custo-desempenho na fase de construção; a relação custo-benefício na fase de uso e operação do edifício; e, por último, a relação de valor resíduos-reciclagem, na fase de descarte do edifício. No segundo nível, os autores apresentam outros 16 indicadores, conforme se pode ver detalhado na Tabela 10.

Xia e Liu (2013) adotaram o modelo de avaliação para edifícios associando dois métodos, a Avaliação do Ciclo de Vida (LCA - *Life Cycle Assessment*) e as Redes Neurais Artificiais (ANN - *Artificial Neural Network*). O modelo proposto pelos autores, toma por base a teoria do pensamento do ciclo de vida completo, levando em consideração que há uma variedade de fatores que afetam o sistema, combinando análise qualitativa e quantitativa ao aproveitar as vantagens da autoaprendizagem das Redes Neurais Artificiais, como um recurso adaptativo para absorver o conhecimento e a experiência de especialistas, evitando a unilateralidade. Os autores reafirmam que a análise de muitos fatores contém incertezas, que são difíceis de quantificar, e muita confiança na experiência subjetiva pode resultar em distorção. Desse modo, a avaliação de um edifício sustentável torna-se tarefa complexa e árdua.

O sistema de índice de avaliação de edifícios sustentáveis proposto demonstrou ser melhor e mais preciso que os modelos de regressão linear, sendo composto por indicadores divididos em quatro níveis, que Xia e Liu (2013) nomearam como a camada alvo (saída da rede neural), a camada subalvo, a camada de diretrizes e a camada de indicadores básicos (vetor de entrada da rede neural). A Tabela 11 apresenta como estas camadas podem ser sobrepostas. Os autores consideraram dentro das diretrizes dois aspectos fundamentais, qualidade do ambiente construído e o nível dos serviços providos aos usuários (Q - *Quality*); as cargas de energia, recursos e meio ambiente (L - *Load*). Estes aspectos são considerados nas principais fases do ciclo de vida, planejamento, projeto, construção e uso e operação.

Ding et al. (2008) desenvolveram um algoritmo tendo por base o conceito de RNAs com aprendizado não supervisionado, para determinar cientificamente um índice, um coeficiente de resumo, que considera as relações entre os diversos indicadores, de modo a fornecer um método de análise abrangente e profundo para avaliação de edifícios sustentáveis. Segundo os autores, a construção sustentável refere-se às edificações harmônicas com a natureza em todo seu ciclo de vida (planejamento, projeto, construção, operação, desmontagem ou reutilização), que maximizam a conservação dos recursos (energia, água, solo, madeira), protegendo o meio ambiente, reduzindo a poluição, proporcionando saúde e conforto às pessoas com uso eficiente do espaço.

Conforme descrito pelos pesquisadores, um sistema de índice pode resumir e estabelecer as diferenças de desempenho entre um edifício de referência e o edifício sustentável. Para tanto, deve ser objetivo e os dados devem ser genuínos e confiáveis, para que projetistas, construtores, e mesmo usuários, melhor direcionem seus esforços, maximizando o retorno dos investimentos. Por isso, devem considerar, além da avaliação técnica, dentre outros aspectos, também a avaliação econômica da construção.

Tabela 10. Indicadores propostos por Zhang e Shi (2012).

Índice alvo (U)	Indicadores nível 1 (Ui)	Indicadores nível 2 (Uij)	DS
U Avaliação econômica	U1 Custo-Desempenho na fase de construção	U11 Economia de terreno	E
		U12 Economia de energia	E
		U13 Economia de recursos hídricos	E
		U14 Economia de materiais de construção	E
		U15 Ambiente externo	E
		U16 Ambiente interno	E
		U17 Custos ambientais indiretos	E
		U18 Preferência política	E
	U2 Custo-Benefício na fase de uso e operação	U21 Dissipação diária de energia	E
		U22 Emissões diárias da operação	E
		U23 Custo de manutenção de desempenho	E
		U24 Benefícios ambientais	E
		U25 Benefícios indiretos aos usuários	E
		U26 Nível da gestão da operação	E
	U3 Resíduos-Reciclagem na fase de desconstrução	U31 Reciclagem de materiais	E
		U32 Valor social dos recursos	E

DS: Principal dimensão da sustentabilidade. A = Ambiental; S = Social; E = Econômica. Fonte: Adaptado de Zhang e Shi (2012).

O desafio de configurar um sistema de índice de avaliação de edifícios sustentáveis depende de se estabelecer, a partir do índice de primeiro nível, o desdobramento em vários indicadores de segundo, terceiro ou mais níveis, até se conseguir reunir as características de uma determinada categoria. Naturalmente, com isso, o sistema de indexação passa a ser grande e complexo, conforme ilustrado na Tabela 12. Ding et al. (2008) citam como exemplo que um índice de primeiro nível, como a conservação de recursos, inclui vários indicadores secundários, tais como conservação de energia, conservação de solo e subsolo, conservação de água, conservação de matéria prima, dentre outros. Por sua vez, a conservação de água é dividida em duas categorias: uso da água e sistema de drenagem. Na categoria de uso da água, se pode incluir o balanço hídrico, aproveitamento indireto de lençóis freáticos e taxa de economia de água.

Por fim, Shama e Motlak (2019) não utilizaram abordagem pelas RNAs, mas propuseram um grupo de indicadores que passou pela avaliação de especialistas, atribuindo pesos e aplicando métodos estatísticos para determinar a importância de cada indicador. A análise resultou em um conjunto de 26 indicadores, conforme resumido na Tabela 13.

Shama e Motlak (2019) usaram como referência um conjunto de características desejáveis para uma construção ser classificada como sustentável, dentre elas estão saudável, confiável, segura e protegida; acessível para todo o espectro de rendas; usa tecnologia e materiais de construção ecológicos de baixa potência e acessíveis; resiliente para aliviar potenciais desastres naturais e mudanças climáticas; conectado a instalações

seguras e acessíveis de energia, saneamento e reciclagem; usa energia e irrigação de forma mais eficaz e equipado com recursos de geração de vida renovável e reciclagem de água no local; não polui o meio ambiente e protege das poluições associadas; bem adaptado a empregos, mercado, cuidados com a saúde, educação e outros serviços; adequadamente unificado ao tecido social, cultural e econômico do local; e renovados e adaptados em tempo hábil.

Tabela 1. Indicadores propostos por Xia e Liu (2013).

Alvo	Subalvo	Diretrizes (Q/L)	Indicadores básicos	DS
Índice de Avaliação dos Edifícios	Fase I Planejamento	Q: Qualidade e serviços do ambiente construído	Qualidade da localização	S
			Serviços e recursos	S
			Ambiente físico externo	S
		L: Consumo de recursos e impacto ambiental	Impacto sobre o entorno vizinho	S
			Consumo de energia	A
			Materiais e recursos	A
			Recursos hídricos	A
	Fase II Projeto	Q: Qualidade e serviços do ambiente construído	Qualidade do ambiente externo	S
			Meio ambiente	A
			Qualidade do ar interno	S
			Serviços e recursos	S
		L: Consumo de recursos e impacto ambiental	Impacto sobre o entorno vizinho	S
			Poluição atmosférica	A
			Consumo de energia	A
			Materiais e recursos	A
			Recursos hídricos	A
	Fase III Construção	Q: Segurança do trabalho e qualidade da construção	Segurança e saúde do trabalhador	S
			Qualidade do projeto	S
		L: Consumo de recursos e impacto ambiental	Impacto sobre o entorno vizinho	S
			Consumo de energia	A
			Materiais e recursos	A
			Recursos hídricos	A
	Fase IV Uso e operação	Q: Qualidade e serviços do ambiente construído	Qualidade do ambiente externo	S
			Ambiente físico interno	S
			Qualidade do ar interno	S
			Serviços e recursos	S
			Vegetação, serviços e resíduos	A
		L: Consumo de recursos e impacto ambiental	Impacto sobre o entorno vizinho	S
			Consumo de energia	A
			Recursos hídricos	A
			Conservação de energia e água	A

DS: Principal dimensão da sustentabilidade. A = Ambiental; S = Social; E = Econômica. Fonte: Adaptado de Xia e Liu (2013).

Tabela 12. Indicadores exemplificados por Ding et al. (2008).

Nível 1	Nível 2	Nível 3	DS
Índice de Avaliação dos Edifícios	Conservação de recursos	Conservação de energia	A
		Conservação de solo e subsolo	A
		Conservação de água	A
		Conservação de matéria prima	A
		...	...
	Qualidade ambiental	Qualidade do ar	S
		Qualidade da água	S
		Qualidade lumínica	S
		Qualidade acústica	S
		Qualidade térmica	S
		...	...
	Viabilidade econômica	Valor presente líquido do investimento	E
		Taxa de retorno do investimento	E
		Análise de sensibilidade	E
		Custos de manutenção no ciclo de vida	E
		...	...

DS: Principal dimensão da sustentabilidade. A = Ambiental; S = Social; E = Econômica. Fonte: Adaptado de Ding et al. (2008).

Metassíntese da literatura

Os edifícios, quando sustentáveis, dentre tantos outros atributos, priorizam a harmonia e proteção ao meio ambiente ao longo de seu ciclo de vida, maximizando a conservação dos recursos de todos os tipos, reduzindo a poluição, proporcionando saúde e conforto às pessoas com uso eficiente do espaço.

Os modelos de avaliação da sustentabilidade para edifícios devem levar em conta o desenvolvimento sustentável, visando a não prejudicar os interesses das gerações futuras ao atender às necessidades contemporâneas. Igualmente têm de considerar o ciclo de vida, contemplando desde o planejamento, passando pelas fases de projeto, construção e manutenção e até desconstrução dos edifícios, ao mesmo tempo, necessitam selecionar indicadores dos impactos do ambiente construído, sem aumentar o custo e o tempo de avaliação, e também precisam considerar que a avaliação de edifícios é dinâmica, por isso, em constante mudança, sempre sujeita a novas condições e requisitos.

As muitas características desejáveis para uma construção ser classificada como sustentável, podem ser representadas por indicadores que, em geral, requerem a opinião de especialistas atribuindo pesos por meio de métodos estatísticos para determinar a importância relativa de cada indicador, transformando problemas qualitativos em quantitativos. Contudo, os pesos gerados podem ser muito divergentes, pois inevitavelmente sofrem influência de fatores subjetivos, tal como acontece nos métodos Delphi, AHP e Fuzzy.

Um método científico de tomada de decisão deve se afastar das falhas por avaliação subjetiva. Além disso, o processamento manual das informações pode se tornar cada vez maior, logo, complexo e inviável, a depender da qualidade e da quantidade de variáveis envolvidas.

Tabela 13. Indicadores propostos por Shama e Motlak (2019).

Nível 1	Nível 2	Nível 3	DS
Índice de Avaliação dos Edifícios	1 Econômico	Serviços disponíveis (água, esgoto, drenagem, energia, telecomunicação, refrigeração e aquecimento)	S
		Variedade de tipos e características de unidades residenciais no mercado imobiliário	S
		Linhas de financiamento para pessoas de baixa e média renda	S
		Custo total das unidades habitacionais	E
		Aumento anual do número de unidades habitacionais (setor público e privado)	S
		Número de pessoas que não têm unidades residenciais	S
		Aluguel médio como porcentagem da renda per capita	E
	2 Habitabilidade	Alta densidade habitacional	S
		Qualidade de acomodação	S
		Número médio de indivíduos por dormitório	S
		O tamanho da lacuna entre a oferta e a demanda de habitação	S
	3 Social	Disponibilidade de espaços abertos em relação às densidades habitacionais - acesso mínimo	S
		Disponibilidade de serviços de saúde com fácil acesso	S
		A qualidade do transporte público e a eficiência da circulação de pedestres	S
		A disponibilidade de escolas de boa qualidade	S
		Segurança (baixos níveis de criminalidade)	S
		Disponibilidade de instalações de entretenimento e serviços públicos	S
	4 Ambiental	Qualidade do ar interno e externo, conforto térmico, acústico e visual	S
		Uso de materiais de construção locais nos projetos	S
		O impacto da poluição, emissões, lixo doméstico, etc. no meio ambiente	A
		A possibilidade de reciclar materiais locais	A
	5 Físico/Tangível	Fornece usos mistos da terra com fácil acesso	S
		Compatibilidade do desenho urbano com as características locais e condições naturais	S
		A disponibilidade de altas densidades de construção (exploração racional do terreno)	S
	6 Político Cultural	Ambiente legislativo que regulamenta o setor residencial e imobiliário	S
		Nível de serviços do governo local	S

DS: Principal dimensão da sustentabilidade. A = Ambiental; S = Social; E = Econômica. Fonte: Adaptado de Shama e Motlak (2019).

As RNAs podem lidar bem com as muitas relações difusas e incertas entre diversas variáveis por meio da autoaprendizagem e treinamento, integrando abordagens qualitativas e quantitativas, mesmo com dados ruidosos ou incompletos. Trata-se de um recurso adaptativo, com forte tolerância a falhas, capaz de absorver o conhecimento e a experiência de especialistas, evitando perspectivas unilaterais, onde há certas relações não lineares entre o desempenho de cada indicador e o desempenho total, como na avaliação de edifícios.

Um sistema de índice, cujos dados sejam genuínos e confiáveis, pode resumir as diferenças de desempenho entre um edifício de referência e o edifício sustentável. Padrões mais precisos para avaliação de edifícios podem permitir que investidores, consumidores,

projetistas e construtores verifiquem qual edifício, por exemplo, é mais econômico por seu melhor desempenho e, assim, tomem decisões mais consistentes, maximizando o retorno dos investimentos.

Considerações finais

O objetivo geral desta pesquisa foi revisar, de forma sistemática e estruturada, a literatura voltada à aplicação de Redes Neurais Artificiais para a obtenção de índices de sustentabilidade de edifícios habitacionais, por meio de bancos de dados contendo indicadores ambientais, sociais e econômicos.

Verificou-se, através desta revisão, que as RNAs aplicadas à avaliação da sustentabilidade vêm sendo mais intensamente estudadas desde 2015, predominantemente por autores e instituições de ensino e pesquisa de origem asiática. Sendo que ocorreu maior produção na área de engenharia, cujas aplicações deram-se principalmente na análise da eficiência energética dos edifícios, na avaliação da sustentabilidade da construção, na predição e análise do comportamento de componentes, materiais e sistemas, seguidos pela aplicação em sistemas de apoio às decisões de projetos, assim como na seleção de componentes e fornecedores.

A abordagem pelas RNAs para fins de predição, generalização, comparação, otimização e classificação, foram encontradas em 61 dos 134 artigos analisados. Contudo, a aplicação envolvendo efetivamente a avaliação da sustentabilidade dos edifícios, segundo a análise de aderência realizada, foi notada em poucos desses artigos.

Apesar dos pesquisadores, de modo geral, afirmarem a capacidade das RNAs para lidar com grande quantidade de dados, isto não pareceu incontestado, pois foram apresentados conjuntos com poucos indicadores objetivos, ou seja, efetivamente relacionados com o desempenho dos edifícios. Restou, portanto, incerteza quanto aos casos onde houve grande quantidade de fatores de desempenho a analisar.

Constatou-se haver certo equilíbrio entre os indicadores propostos nos contextos ambiental, social e econômico, todavia, muitos deles classificam-se mais como indicadores de diretrizes do que indicadores de desempenho, pois representam, em sua maioria, ações e soluções aplicáveis com a intenção de promover a sustentabilidade dos edifícios ao invés de expressar a performance produzida pelas soluções a eles aplicadas.

Ao se tratar da avaliação de edifícios, evidenciou-se a necessidade de comparações por meio de referências. Isto significa o quão importante é definir o edifício que melhor retrataria o modo convencional de construção habitacional no Brasil, considerado insustentável. Sugere-se adotar como referencial o Projeto Padrão R8-N, conforme a NBR 12721:2006 (ABNT, 2006), cujas especificações dão origem ao Custo Unitário Básico (CUB/m²) da construção civil.

Nesse mesmo sentido, é necessário entender e ampliar o conjunto ideal de indicadores de desempenho que melhor representaria as muitas peculiaridades e inerentes impactos e danos produzidos pelo edifício de referência, com o qual se poderia fazer tais comparações e gerar índices de sustentabilidade para outros edifícios por meio das Redes Neurais Artificiais (RNAs).

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12721: Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edifícios**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- Agopyan, V.; John, V. M. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. São Paulo: Blucher, 2011. (Série sustentabilidade, 5).
- Chen, J. G.; Min, Z. Y. A green construction evaluation model based on BP Neural Networks. **Optimization of Capital Construction**, v. 28, n. 5, p. 169-172, 2007.
- Costa, C. A. **O potencial das redes neurais artificiais como suporte para o desenvolvimento de índices de sustentabilidade para edifícios habitacionais (ISE-H)**. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2021. (Tese de doutorado).
- Ding, Q.; Tong, Q. L.; Tong, H. Q. Evaluation of index for green zoology building and its definite algorithm in path analysis. Proceeding of the 4th International Conference on Natural Computation, IEEE Computer Society, Los Alamitos, 2008.
- Dong, B.; Cao, C.; Lee, S. E. Applying support vector machines to predict building energy consumption in tropical region. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 5, p. 545-553, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.09.009>
- Foucquier, A.; Robert, S.; Suard, F.; Stéphan, L.; Jay, A. State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 272-288, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.004>
- Galvão, M. C. B.; Ricarte, I. L. M. Revisão sistemática da literatura: conceituação, produção e publicação. **LOGEION Filosofia da Informação**, v. 6, p. 57-73, 2019. <https://doi.org/10.21728/logcion.2019v6n1.p57-73>
- Hernandez Neto, A.; Fiorelli, F. A. S. Comparison between detailed model simulation and artificial neural network for forecasting building energy consumption. **Energy and Buildings**, v. 40, p. 2169-2176, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.013>
- IEA - International Energy Agency. **World energy statistics and balances (Database)**. IEA, 2019. Disponível em: <<http://www.iea.org/statistics>>. Acesso em: 09 fev. 2021.
- JRC - Joint Research Center. **Best environmental management practice for the building and construction sector**. Sevilla: JRC, 2012.
- Köche, J. C. **Fundamentos de metodologia científica: teoria da ciência e iniciação à pesquisa**. Petrópolis: Vozes, 2011.
- MPT - Ministério Público do Trabalho; OIT - Organização Internacional do Trabalho. Observatório de Segurança e Saúde no Trabalho. **Promoção do meio ambiente de trabalho guiada por dados**. 2020. Disponível em: <<https://smartlabbr.org/sst>>. Acesso em: 09 fev. 2021.
- Perez-Lombard, L.; Ortiz, J.; Pout, C. A review on buildings energy consumption information. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 3, p. 394-398, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>
- Qi, B.; Niu, C.; Zhao, J.; Shao, S. Sustainable building evaluation method and its application based on the BP neural network. **Journal of Shenyang Jianzhu University (Social Science)**, v. 14, p. 152-156, 2012.

- Shama, Z. S.; Motlak, J. B. Indicators for sustainable housing. **Materials Science and Engineering**, v. 518, 022009, 2019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/518/2/022009>
- Shi, Q.; Xu, Y.; Chen, S. Green construction alternatives evaluation using GA-BP hybrid algorithm. *Proceeding of International Conference on Management And Service Science*, New Jersey, IEEE Computer Society, 2009.
- Si, T. G.; Song, H. P; Liu, J. Y. Artificial neural network in green building assessment. **Journal of Shandong Jianzhu University**, v. 23, p. 355-360, 2008.
- Silva, V. G. Indicadores de sustentabilidade de edifícios: estado da arte e desafios para desenvolvimento no Brasil. **Ambiente Construído**, v. 7, n. 1, p. 47-66, 2007.
- UNEP - United Nations Environment Programme. **Global guidance for life cycle impact assessment indicators**. Paris: UNEP, 2019. v. 2. Disponível em: <<https://www.lifecycleinitiative.org/training-resources/global-guidance-for-life-cycle-impact-assessment-indicators-volume-2/>>. Acesso em: 09 fev. 2021.
- Xia, L. M.; Liu, J. J. Research on green building assessment system based on BP Neural Network and Life Cycle Assessment (LCA). **Applied Mechanics and Materials**, v. 357/360, p. 508-514, 2013. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.357-360.508>
- Zhang, H.; Shi, X. Economic evaluation of green buildings: A neural network approach. *Proceeding of the International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*, Sanya, IEEE Computer Society, v. 2, p. 327-330. 2012. <https://doi.org/10.1109/ICIII.2012.6339845>
- Zhao, H.; Magoulès, F. A review on the prediction of building energy consumption. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 3586-3592, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.049>
- Zhi, J.Q.; Zhao, J.; Li, N. Green building assessment based on Artificial Neural Network. **Urban Environment & Urban Ecology**, v. 23, p. 44-47, 2010.