COMO OS EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO RESPONDERÃO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS? - UMA REVISÃO

Emeli Lalesca Aparecida Guarda (1); Renata Mansuelo Alves Domingos (2); Martin Ordenes Mizgier (3); Fernando Oscar Ruttkay Pereira (4)

(1) MEng em Engenharia de Edificações e Ambiental, Doutoranda do Programa de Pós graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina, emeli@labcon.com

(2) MEng em Engenharia Civil, Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, renata@labcon.ufsc.br

(3) PhD, Professor Adjunto da Universidade Federal de Santa Catarina, martin.ordenes@ufsc.br

(4) PhD, Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, ruttkay.pereira@ufsc.br, Universidade Federal de Santa Catarina, LabCon/ARQ, Florianópolis–SC, 88040-900

RESUMO

Como medida de mitigação das mudanças climáticas, os Edifícios de Energia Zero (ZEB) têm desempenhando um papel importante na redução energética do ambiente construído. Assim, este trabalho tem como objetivo revisar, identificar e classificar as diferentes medidas projetuais aplicadas aos edifícios de energia zero, frente aos desafios das mudanças climáticas. O procedimento metodológico consiste em buscas por meio de *string* em banco de dados científicos e, posteriormente realizou-se triagem das buscas, resultando em 138 artigos de periódicos. Os resultados mostram que a literatura existente sobre este tópico, relata que as mudanças climáticas estão influenciando significativamente as temperaturas internas dos edifícios e, que os ZEB estarão mais quentes em períodos como o verão, sendo necessário a implementação de estratégias bioclimáticas passivas. Assim, inúmeros estudos aplicaram estratégias bioclimáticas de projeto, como ventilação natural e sombreamento, bem como, medidas de eficiência energético, como isolamento térmico nas paredes externas, coberturas e vidros duplos nos edifícios. No entanto, verificou-se que sob as novas condições climáticas futuras, os edifícios de energia zero apresentam condições de desconforto térmico em seu interior, bem como não suprem a demanda energética futura, sendo necessário a implementação de novas medidas mitigadoras. Conclui-se que, os ZEB são um instrumento importante para a mitigação das mudanças climáticas, porém, há a necessidade de investigar esses edifícios sob condições climáticas futuras, ou seja, utilizando de arquivos climáticos recentes e/ou em prospecção climática, para que de modo que os edifícios possam responder de maneira mais resiliente as mudanças climáticas futura.

Palavras-chave: Medidas de Mitigação, Eficiência Energética, ZEB, Alterações Climáticas, Climas Futuros.

ABSTRACT

As a climate change mitigation measure, Zero Energy Buildings (ZEB) has been playing an important role in energy reduction in the built environment. Thus, this work aims to review, identify and classify the different design measures applied to zero energy buildings, facing the challenges of climate change. The methodological procedure consists of searches using strings in a scientific database and, subsequently, the searches were screened, resulting in 138 articles from journals. The results show that the existing literature on this topic reports that climate change is significantly influencing the internal temperatures of buildings and that the ZEB will be warmer in periods such as summer, requiring the implementation of passive bioclimatic strategies. Thus, numerous studies applied bioclimatic design strategies, such as natural ventilation and shading, as well as energy efficiency measures, such as thermal insulation in external walls, roofs, and double glazing in buildings. However, it was found that under the new future climate conditions, zero energy buildings present conditions of thermal discomfort in their interior, as well as not supplying the future energy demand, requiring the implementation of new mitigating measures. It is concluded that the ZEB is an important instrument for the mitigation of climate change, however, there is a need to investigate these buildings under future climatic conditions, that is, using recent climatic files and/or in climate prospecting, so that buildings can respond more resiliently to future climate change.

Keywords: Mitigation Measures, Energy Efficiency, ZEB, Climate Change, Future Climate.

1. INTRODUÇÃO

Caracterizar as tendências futuras do clima e sua incerteza é crucial para entender como as mudanças climáticas influenciarão o bem-estar das pessoas nas residências. As mudanças climáticas vêm se tornando um desafio chave nos dias atuais, principalmente no quesito de consumo energético e poluição atmosférica. Assim, com o objetivo de compor o conhecimento sobre as mudanças climáticas, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) publica relatórios com base nas ações antrópicas e nas emissões de GEE. Conforme o Quarto Relatório (AR4), nas últimas três décadas, a superfície terrestre foi sucessivamente mais quente do que 1850, com destaque para o período de 1983 a 2012 sendo o mais quente nos últimos 300 anos (IPCC, 2007, 2014). Assim, o primeiro relatório em 1990, do IPCC vem alertando para projeções de aumento da temperatura média global 0,15°C para 0,30°C por década.

Com as alterações climáticas, as altas temperaturas no futuro levarão a um aumento na demanda energética de resfriamento nos edifícios para manter as suas condições de conforto (VAN HOOFF et. al. 2016). Assim, com o acrescimento dos sistemas de condicionamento de ar nos edifícios, com o intuito de manter as condições de conforto aos ocupantes no futuro, podem resultar em aumento da queima de combustíveis fosseis, bem como aumento da demanda energética, potencializando os riscos das mudanças climáticas (VAN HOOFF et. al. 2016). Assim, as alterações nas condições climáticas impõem novos impactos sobre os edifícios e cidades, não só pelo aumento da temperatura média global, mas também por alterações nas demais variáveis climatológicas, que consequentemente aumentam a demanda energética dos edifícios. Nesse contexto, o consumo energético em edifícios tem desempenhando um papel crucial nos requisitos globais de energia. Conforme o relatório do *Energy Information Administration* (2013), os totais globais de consumo energético aumentaram cerca de 85% de 1980 para 2012, apresentando aumentos médios anuais de até 2%. Assim, pesquisas concluem que o uso mundial de energia no setor residencial está entre 16% e 50% (SAIDUR et al., 2017; AL AJMI et al., 2016 e HONG et al., 2018). Diante destes cenários, economias significativas de energia podem ser alcançadas se os edifícios forem adequadamente projetados, construídos e operados.

Em contraste às medidas ativas, as medidas passivas são aquelas que quando são instaladas não consomem energia ou consomem o mínimo de energia. Dessa forma, a eficiência energética de edifícios pode ser vista como um importante instrumento para lidar com a demanda energética de edifícios. Assim, esforços significativos têm sido realizados para implementar tecnologias inovadores de conservação de energia e formular políticas de construção verdes ou até mesmo de consumo zero de energia. Dessa maneira, destaca-se que o conceito de Edifício de Energia Zero (ZEB) apresentou maior interesse nas últimas décadas, como medida de mitigação do aumento da demanda energética.

Segundo Torcellini et al. (2006) o conceito de ZEB foi mencionado pela primeira vez em 2000 e tornou-se uma ideia dominante em 2006. Edifícios de Energia Zero, estão sendo consideradas como solução de mitigação dos impactos da demanda energética futuro, principalmente atrelado às mudanças climáticas (CAO, DAI e LIU, 2016). Existem várias definições e metodologias para cálculo de ZEBs (MARSZAL et al., 2011), que consideram diferentes métricas e parâmetros projetuais. A *Directive on Energy Performance* of Buildings (EPBD) define ZEB, como sendo um edifício de energia nula e de alto desempenho energético, utilizando energia de fontes renováveis em seu consumo energético. Assim, ZEB é um conceito que combina geração de energia renovável com edifícios, podendo se tornar uma medida de mitigação às mudanças climáticas. Além que, a inserção de energias limpas e renováveis no contexto das fontes de energia é uma forma de reduzir o consumo de recursos fosseis e as emissões de gases de efeito estufa (GUARDA, et al. 2020).

Inúmeros estudos foram realizados utilizando medidas de mitigação para a crescente demanda energética. Huang e Hwang (2016) investigaram edifícios residenciais típicos em Taiwam, os quais previam 89% de aumento na demanda energética para resfriamento no final do século e, apresentam que aplicação de medidas mitigadoras em telhados apresentam maiores potenciais de economia de energia, seguido das paredes externas e aberturas. Taleb e Sharples (2011) realizaram uma avaliação da demanda energética em residências na Arábia Saudita, e apresentou redução na demanda de até 32,4%, integrando a tecnologia a medidas passivas de projeto aos edifícios. Ndiaye (2018), avalia doze medidas passivas e, as medidas que utilizam de geração de energia renovável contribuíram positivamente para a redução da demanda energética, alcançando valores de até 70%, considerando o clima futuro.

Assim, são necessárias medidas para reduzir as alterações climáticas, bem como a demanda energética para resfriamento por meio de medidas passivas de projetos e de tecnologias, como o ZEB, afim de aproveitar os recursos da energia renovável como fornecimento principal dos edifícios (CASCONE et al., 2018; FATHALIAN e KARGARSHARIFABAD, 2016). Dessa forma, o ambiente construído é um dos setores que oferecem maiores potenciais de economia de energia com ótima relação de custo-benefício, bem como também

reduções da de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), contribuindo para mitigação das mudanças climáticas (ROBERT e KRUMMERT, 2012).

Dessa maneira, novos edifícios devem implementar não somente envoltórias adequadas, mas também tecnologias como os sistemas de energia renováveis, como fonte de uso principal, para reduzir a demanda energética e, consequentemente, manter melhores condições térmicas internas aos ocupantes. Segundo Cao, Dai e Liu (2016), o consumo energético dos edifícios, podem alcançar reduções energéticas utilizando de medidas adequadas de eficiência energética, bem como os sistemas de geração de energia renovável também serão necessários para compensar o consumo de energia.

Sabe-se que o ZEB pode suprir a demanda energética por um período de tempo ou até mesmo em toda a vida útil do edifício. Assim, considerando que o clima está alterando e que será um fator importante para a adequabilidade climática das edificações, levanta-se o seguinte questionamento: considerando a variabilidade climática futura, os ZEB responderão às alterações climáticas?. Por fim, este artigo tem o intuito de verificar quais medidas projetuais têm sido aplicadas aos edifícios ZEB, bem como, se esses edifícios têm respondido às alterações climáticas futuras.

2. OBJETIVO

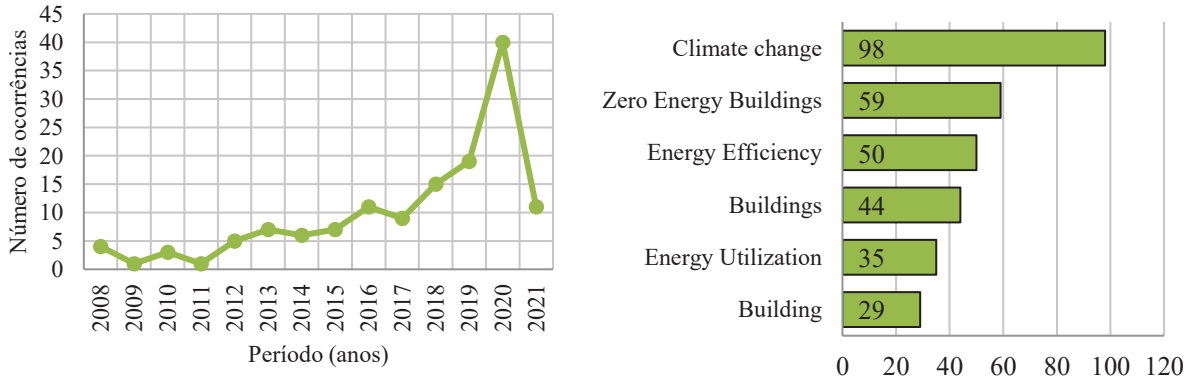
Este trabalho tem como objetivo revisar, identificar e classificar as diferentes medidas projetuais aplicadas aos Edifícios de Energia Zero (ZEB), frente aos desafios das mudanças climáticas.

3. MÉTODO

Foram considerados artigos publicados em revistas revisadas por pares publicadas em inglês até abril de 2021. O banco de dados científico Scopus foi considerado para busca. As palavras-chave e critérios booleanos foram utilizados, levando em consideração as palavras ZEB, NZEB, Zero Energy, mudanças climáticas e climas futuros. Considerando os critérios booleanos e títulos, resumos e palavras-chave, na plataforma Scopus, temos a seguintes *Strings*: *((ZEB OR "Zero Energy" OR NZEB) AND ("Climate Change" OR "Climate Future"))*, resultando em 262 documentos científicos. Posteriormente iniciou-se o processo de triagem, categorizado por ordem de citação e considerando somente artigos publicados em periódicos e na língua inglesa.

Após a categorização e aplicação dos filtros, a triagem dos documentos se deu por meio da leitura de títulos, resumos e palavras-chave. Assim, para esta triagem selecionou-se somente artigos que tratam da aplicação das mudanças climáticas em edifícios de energia zero, sendo desconsideradas pesquisas que não utilizassem da temática, bem como estudos duplicados, resultando em 138 artigos de periódicos. A Figura 1 apresenta uma visão geral dos resultados da pesquisa.

(A) (B)



(C)

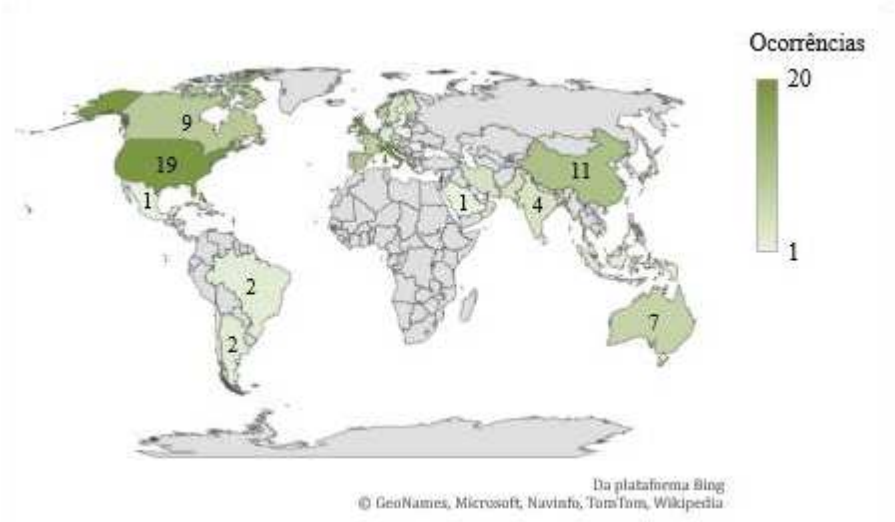


Figura 1: Visão geral das 138 publicações: (A) número de publicações por ano; (B) As seis palavras-chaves e frequência de ocorrência e (C) Países

As revistas Renewable and Sustainable Energy Reviews e Energy and Buildings lideram as publicações sobre o tema. Além disso, seis dos dez artigos mais citados são publicados nestes dois periódicos (Tabela 1).

Tabela 1: Top 10 artigos

#	Título	Autores	Periódico	Ano	Número de citações
1	A global review of energy consumption, CO2 emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO2 emitting countries)	Nejat et al.	Renewable and Sustainable Energy Reviews	2015	637
2	Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade	Cao, Dai e Liu	Energy and Buildings	2016	345
3	Zero energy buildings and sustainable development implications - A review	Li, Yang e Lam	Energy	2013	291
4	Improving the energy efficiency of the existing building stock: A critical review of commercial and institutional buildings	Ruparathna, Hewage e Sadiq	Renewable and Sustainable Energy Reviews	2016	159
5	Innovating to zero the building sector in Europe: Minimising the energy consumption, eradication of the energy poverty and mitigating the local climate change	Santamouris	Solar Energy	2016	128
6	Designing net-zero energy buildings for the future climate, not for the past	Roberto e Kummert	Building and Enviromental	2012	113
7	A review on current advances in the energy and environmental performance of buildings towards a more sustainable built environment	Soares, et al.	Renewable and Sustainable Energy Reviews	2017	94
8	A framework for the cost-optimal design of nearly zero energy buildings (NZEBs) in representative climates across Europe	D'Agostino e Parker	Energy	2018	75
9	Climate benefits of natural gas as a bridge fuel and potential delay of near-zero energy systems	Zhang et al.	Applied Energy	2016	57
10	Energy retrofit of educational buildings: Transient energy simulations, model calibration and multi-objective optimization towards nearly zero-energy performance	Ascione et al.	Energy and Buildings	2017	55

Os dez primeiros artigos mostram diferentes abordagens de potencial de mitigação das mudanças climáticas utilizando de edifícios de energia zero, sendo que cinco desses artigos são de revisão (LI, YANG e LAM, 2013; NEJAT et. al., 2015; RUPARATHNA, HEWAGE e SADIQ, 2016; CAO, DAI e LIU, 2016 e SOARES, et. al., 2017). Além disso, excluiu-se dessa pesquisa dois trabalhos, pois os autores não consideram os cenários das mudanças climáticas em suas avaliações (SANTAMOURIS, 2016, ZHANG et al., 2016 e

ASCIONE et. al., 2017). Assim, duas pesquisas investigam o potencial de mitigação dos edifícios de energia zero, principalmente na demanda energética em diferentes localidades de implantação (ROBERT e KUMMERT, 2012; D'AGOSTINO e PARKER, 2018). Assim, com base nesse método de triagem, os trabalhos selecionados foram revisados para entender como os edifícios ZEB são utilizados como estratégia de potencial mitigação da demanda energética, considerando as mudanças climáticas.

4. EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO RESPONDERÃO POSITIVAMENTE AOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS?

De acordo com o relatório do IPCC, os sistemas de energia renovável serão influenciados por eventos climáticos extremos (IPCC, 2011). Esses tipos de sistemas estão diretamente relacionados às intempéries, principalmente a velocidade do vento, radiação solar, temperatura, entre outros (WANG et al., 2014; SCHAEFFER et al., 2012; KHARE, NEMA e BAREDAR, 2016).

Além disso, em relação a interação à rede, as mudanças climáticas podem influenciar no consumo energético de ZEB e, assim, podem piorar as flutuações e aumentar o valor de pico da troca do ZEB com a rede, impondo estresse no equilíbrio da rede ao fornecimento de energia para o edifício (CHAI, HUANG e SUN, 2019). Assim, espera-se que esses edifícios desempenhem papel fundamental no combate às mudanças climáticas no futuro. No entanto, o clima está se alterando e os padrões de projetar e operar os edifícios atuais podem não ser satisfatórios no futuro.

Neste contexto, diferentes medidas são adotadas para mitigar os impactos das mudanças climáticas no desempenho de ZEB, bem como são avaliadas a eficácia dessas medidas por meio, muita das vezes, de simulação computacional. Assim, a implementação de tecnologias passivas para reduzir a demanda energética, tem se tornando um instrumento fundamental para melhorar a eficiência energética dos edifícios. Sadineni et al. (2011) resumiu que essas tecnologias podem melhorar a eficiência energética, por meio dos sistemas construtivos da envoltória, bem como das estratégias passivas de aquecimento ou resfriamento e no armazenamento de energia (CAO, DAI e LIU, 2016).

Dessa forma, a envoltória dos edifícios são cruciais para as condições de conforto térmico e demanda energética, pois sofrem influência direta do meio externo, impactando em seu interior. Com o intuito de mitigar, principalmente os impactos das mudanças climáticas, os edifícios devem implementar não apenas envoltórias adequadas, mas também sistemas de produção de energia a partir de fontes renováveis e sistemas solares passivos (CABEZA e CHAFER, 2020; ULPIANI; SUMMA e DI PERNA, 2019). Conforme Cao, Dai e Liu (2016), a melhoria da envoltória depende principalmente de duas abordagens: reduzir as transmitâncias térmicas e combinar com resfriamento ou aquecimento passivo.

Attia e Gobin (2020) investigaram um edifício com energia quase zero na Bélgica, considerando os cenários de emissões RCP 4.5, RCP 6.0 e RCP 8.5, adotadas no quinto relatório do IPCC. A edificação em análise utiliza de isolamento térmico nas paredes externas com condutividade baixa, as janelas são de vidro triplo. Além disso, utilizou-se resfriamento noturno por meio de aberturas das janelas, quando a temperatura for superior a 22,00°C. Assim, o número de horas com a temperatura operacional interna excedente a 25°C, aumenta em 5,4%, 7,9% e 12,5% para os respectivos cenários em 2050, ou seja, os ocupantes estão sujeitos ao desconforto térmico por calor. Os resultados do estudo confirmam que ocorre um superaquecimento no ZEB, ventilado naturalmente e que será necessário implementação de medidas mitigadoras, como as estratégias bioclimáticas de projeto.

Summa et al. (2020) consideraram os mesmos cenários de emissões mencionados acima e avaliaram um edifício residencial de três pavimentos, caracterizado como ZEB em Roma, o qual contém isolamento térmico nas paredes externas, laje de concreto com isolante de poliestireno expandido. As janelas são em vidro duplos e de baixa emissividade e contém dispositivos de sombreamento com controle de luz solar. Assim, o consumo anual de energia aumenta em torno de 18% considerando os cenários de aquecimento, devido a ativação prolongada do sistema de condicionamento de ar. Embora o condicionamento de ar seja apenas uma fração de todos os usos de energia nos edifícios, o sistema se torna o principal impulsionador do pico de demanda energética. Assim, reduzir com medidas de eficiência adequadas às necessidades do uso do condicionamento, pode tornar os ZEB mais resilientes ao futuro.

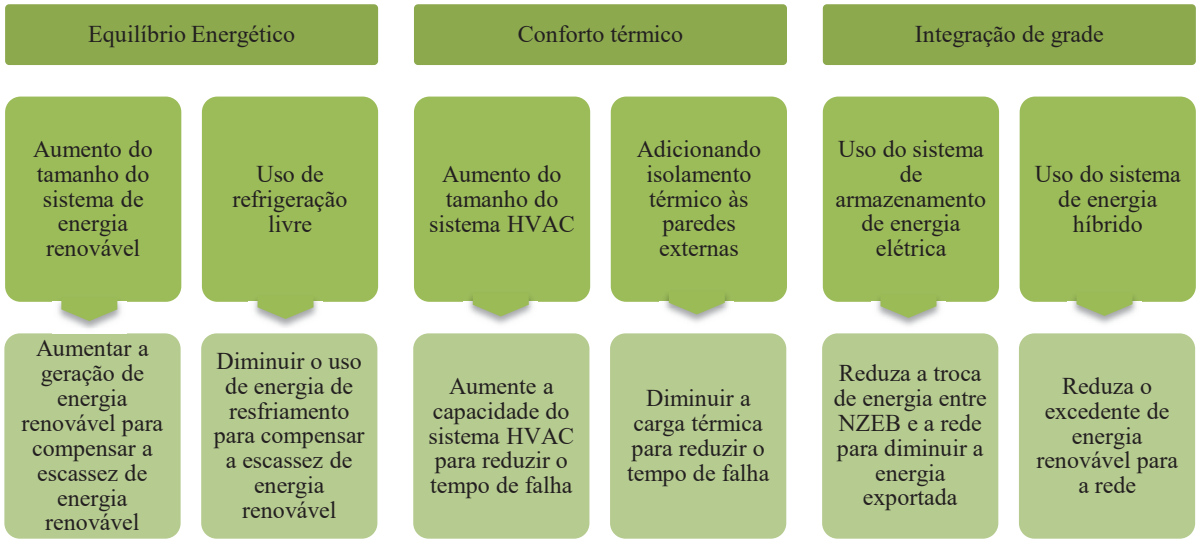
Sobhani, Shahmoradi e Sajadi (2020) investigaram um edifício no Irã, o qual utiliza de isolamento térmico de poliestireno nas paredes externas e cobertura, janelas em vidro duplo com baixa transmitância térmica e, incluíram estratégias passivas de projeto como a ventilação natural e sombreamento das janelas com

controle da luz solar. No entanto, a carga de resfriamento anual aumenta em torno de 19,90% enquanto a necessidade de aquecimento reduz em 14,38% em 2038. Essas mudanças significativas na demanda de resfriamento e aquecimento futuro ocorrem não apenas devido ao aumento da temperatura externa, mas também às mudanças nos potenciais ganhos solares e na perda de calor através dos edifícios. Entretanto, devido ao aumento da radiação solar, a geração do sistema de energia renovável (painéis fotovoltaicos) aumenta no futuro, indicando confiabilidade no sistema em uma perspectiva a longo prazo.

Salem, Bahadori-Jahromi e Mylona (2019) avaliaram dois ZEB, sendo uma construção nova e um *retrofit* na Inglaterra e, concluíram que o superaquecimento ocorre nas projeções climáticas de 2050 e 2080. Destaca-se que certas medidas devem ser aplicadas, principalmente ao *retrofit*, como dispositivos de sombreamento, vidros duplos de baixa emissividade e utilização da ventilação natural, as quais podem atuar como medidas mitigadoras e reduzir significativamente o superaquecimento dos edifícios.

Carrilho et al. (2012) utilizou de simulação térmica dinâmica para investigar a viabilidade técnica e econômica de ZEB na Europa, em duas residências com diferentes níveis de envidraçamento (moderadamente envidraçado e altamente envidraçado) e, verificou-se que os altos níveis de envidraçamento contribuem para um aumento do superaquecimento, sendo que a temperatura da sala de estar da residência altamente envidraçado excedeu 28°C por mais de 46% das horas anuais no verão. Chai, Huang e Sun (2019), investigaram três formas de desempenho, como equilíbrio energético, conforto térmico e integração de grade, considerando um ZEB e as suas formas de mitigação, bem como o potencial benefício para que o edifício respondesse às alterações climáticas futuras (Figura 2).

Figura 2: Medidas de mitigação e potenciais benefícios



Fonte: Adaptado de Chai, Huang e Sun (2019)

Assim, os autores relatam que a geração de energia renovável pode não atender às demandas energéticas no futuro, prejudicando o equilíbrio energético em cenários de alterações climáticas. Para manter as condições de conforto térmico, foi necessário aumentar o tamanho e as horas de uso do sistema de condicionamento de ar. Sendo atribuído principalmente à temperatura externa, as quais apresentaram aumento significativo quando consideradas as mudanças climáticas. Destaca-se também que adicionar isolamento térmico não era tão eficaz. Por fim, a interação da rede é relativamente estável sob as mudanças climáticas, e os impactos associados são positivos, pois a diminuição da energia exportada nos períodos de resfriamento pode superar o aumento da energia exportada nos períodos de aquecimento (CHAI, HUANG e SUN, 2019).

Rey-Hernández et al. (2018) avaliaram um ZEB que incorpora medidas passivas de projeto, como orientação solar, ganhos solares no inverno, controle solar no verão, ventilação natural, isolamento térmico nas paredes e aberturas de vidros duplos com câmara de ar. Os autores observaram que à medida que o clima se torna mais quente, a demanda por refrigeração aumenta. A contribuição da energia solar fotovoltaica deverá permanecer constante durante todo o período, pois embora a radiação solar deva aumentar ligeiramente, a temperatura externa também aumentará, causando menor eficiência dos painéis fotovoltaicos.

No contexto brasileiro, existem estudos de ZEB sob condições de mudanças climáticas, as quais são relativamente recentes e poucos difundidas no país. Guarda et al. (2020), avalia um ZEB localizada em Cuiabá-

MT, caracterizada como clima de savana tropical com chuvas de verão. O edifício utiliza de Poliestireno Expandido (EPS) nas paredes externas, laje de concreto na cobertura e absortância solar de 0,30 em toda envoltória do edifício, representando cor clara. Assim, os resultados mostram que os efeitos das mudanças climáticas podem modificar o consumo de energia de refrigeração das habitações brasileiras. Assim, portanto, no futuro, será necessária a implementação de estratégias para minimizar o desconforto por calor e, consequentemente, reduzir a demanda por energia de resfriamento. Os autores observaram que mesmo com o leve aumento da radiação solar, o aumento da demanda energética fará que a geração apresente uma lacuna de até 40,20% para o período de 2080, assim portanto, o aumento da geração não é proporcional ao aumento da demanda energética futura. Assim, os autores recomendam, como forma de minimizar as perdas dessa fonte de geração de energia, uma análise de projeção do aumento do consumo de energia ao longo dos anos, para que a edificação continue sendo zero.

Outros estudos analisaram a ventilação natural diurna *versus* noturna, concluindo que a ventilação noturna é a opção mais eficaz como forma de mitigação do superaquecimento (ARTMANN, MANZ e HEISELBERG, 2007 e PANAYIOTOU et al., 2010). O sombreamento externo vem se destacando como medida eficaz na redução de ganhos solares e, consequentemente na redução das temperaturas internas dos edifícios (ROAF, CRICHTON e NICOL, 2009; ATZERI, CAPPELLETTI e GASPARELLA, 2014). Fosas et al. (2018), sugere que o isolamento térmico nas paredes apresenta melhor desempenho quando se comparado a edifícios não isolados, em condições de superaquecimento. Roaf et al. (2009), investigaram as vantagens de se utilizar formas passivas de reduzir o risco de superaquecimento em residências construídas com alto padrão de eficiência energética e conclui que essa é uma forma eficaz de mitigar esse risco. Para manter as condições de conforto térmico, as medidas de eficiência energética devem atingir um equilíbrio entre a demanda energética de resfriamento e aquecimento (SALEM, BAHADORI-JAHROMI e MYLONA, 2019). Portanto, embora a aplicação de altos níveis de isolamento permaneça necessária durante em países mais frios, deve-se considerar o desempenho do edifício durante a estação de não aquecimento por meio da aplicação de estratégias de resfriamento adequadas.

Neste contexto, observa-se que as mudanças climáticas estão influenciando significativamente na temperatura interna das edificações. Assim, em cenários de aquecimento, os ZEB estarão mais quentes em períodos como o verão, sendo necessário a implementação de estratégias bioclimáticas passivas como, sombreamento, resfriamento evaporativo e inércia térmica para evitar ganhos solares e dissipar o calor interno das edificações. Além disso, será necessário a adaptação climática dos ocupantes às novas condições de clima de futuro (ATTIA e GOBIN, 2020).

Por fim, observa-se que inúmeros estudos aplicaram estratégias bioclimáticas de projeto, sendo as mais utilizadas ventilação natural e sombreamento com controle solar, além disso, medidas de eficiência também têm sido amplamente aplicadas nos edifícios, como isolamento térmico nas paredes externas e coberturas e janelas com vidros duplos ou triplos. Verificou-se que sob as novas condições climáticas futuras, os edifícios de energia zero apresentam condições de desconforto térmico em seu interior, bem como não suprem a demanda energética futura, sendo necessário a implementação de novas medidas mitigadoras. No entanto, os ZEB apresentam papel importante no desenvolvimento sustentável e também como forma de mitigação das mudanças climáticas, assim, aborda-se a necessidade de estudos que correlacione as alterações climáticas futuras e os seus impactos sobre edifícios de alta eficiência energética.

5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados apresentados, observa-se que a investigação de edifícios de energia zero considerando as mudanças climáticas apresenta histórico recente na literatura. Os estudos começaram a ser publicados em 2008 e teve o seu pico, até o momento, em 2018. Tal fato demonstra a lacuna que esse assunto apresenta e os resultados desse artigo reforçam a importância de estudos sobre essa temática.

Dessa forma, obteve-se com a literatura levantada que à medida que o clima se torna mais quente, a demanda por refrigeração aumenta e, consequentemente a demanda por aquecimento reduz. Além disso a radiação solar deve aumentar ligeiramente em cenários de clima futuros, contribuindo para a geração de energia renovável por meio de painéis fotovoltaico.

No entanto, com isso a temperatura externa também sofrerá aumento, influenciando nas condições internas das edificações, as quais podem resultar em impactos na eficiência dos painéis. Assim, os autores recomendam, como forma de minimizar as perdas dessa fonte de geração de energia, uma análise de projeção

do aumento do consumo de energia ao longo de anos e, até mesmo incluir o contexto das mudanças climáticas é necessário, para que a edificação continue sendo zero.

Neste contexto, observou-se que a aplicação de medidas de eficiência energética nos edifícios, têm respondido positivamente no clima atual, no entanto, em climas futuros o desempenho muita das vezes são negativos, tornando o ZEB não resiliente as mudanças climáticas. Assim, sendo necessário a implementação de estratégias bioclimáticas passivas como, sombreamento, resfriamento evaporativo e inércia térmica para evitar ganhos solares e dissipar o calor interno das edificações.

Diante desse contexto, conclui-se que os ZEB apresentam papel importante no desenvolvimento sustentável e também como forma de mitigação das mudanças climáticas, porém torna-se necessária a investigação utilizando de arquivos climáticos em prospecção, com o intuito de investigar a demanda energética futura dos edifícios, bem como sua resiliência aos impactos das mudanças climáticas.

Além disso, as mudanças climáticas podem ter impacto direto no desempenho de todo sistema ZEB pois as condições climáticas externas são cruciais para as estimativas das cargas térmicas e elétricas do edifício, bem como a geração de energia renovável, ou seja, tais alterações afetarão todo o projeto dos sistemas. Por fim, aponta-se para a necessidade de estudos que correlacione as alterações climáticas futuras e os seus impactos sobre edifícios de alta eficiência energética, bem como a inclusão de estratégias bioclimáticas de projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL AJMI, A; ABOU-ZIYAN, H; GHONEIM, A. Achieving annual and monthly net-zero energy of existing building in hot climate. **Applied Energy**, 165: 511–521. 2016.

ANWAR, M.W., ALI, Z., JAVED, A. et al. Analysis of the effect of passive measures on the energy consumption and zero-energy prospects of residential buildings in Pakistan. **Build. Simul**. 2020.

ARTMANN, N, MANZ, H, HEISELBERG, P. Climatic potential for passive cooling of buildings by night-time ventilation in Europe. **Applied Energy**, v. 84, p. 187–201, 2007.

ATTIA, S.; GOBIN, C. Climate Change Effects on Belgian Households: A Case Study of a Nearly Zero Energy Building. **Energies** v. 13, p. 5357, 2020.

ATZERI, A, CAPPELLETTI, F, GASPARELLA, A. Internal versus external shading devices performance in office buildings. **Energy Procedia**, v. 45, p. 463–472, 2014.

CABEZA, L.F.; CHÀFER, M. Technological options and strategies towards zero energy buildings contributing to climate change mitigation: A systematic review. **Energy Build**. v. 219, p. 110009, 2020

CAO, X; DAI, X; LIU, J. Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. **Energy and Buildings**, v.128, p.198-213, 2016

CARRILHO DA GRAÇA, G, AUGUSTO, A, LERER, M. Solar powered net zero energy houses for southern Europe: feasibility study. **Solar Energy**, v. 86: 634–646, 2012.

CASCONE, S; CATANIA, F; GAGLIANO, A; SCIUTO, G. A comprehensive study on green roof performance for retrofitting existing buildings. **Building and Environment**, 136: 227–239. 2018.

CHAI, J.; HUANG, P.; SUN, Y. Investigations of climate change impacts on net-zero energy building lifecycle performance in typical Chinese climate regions. **Energy**, v. 185, p. 176-189, 2019.

D'AGOSTINO, D; PARKER, D. A framework for the cost-optimal design of nearly zero energy buildings (NZEBs) in representative climates across Europe. **Energy**, v. 149, pp.814-826, 2018

FATHALIAN, A; KARGARSHARIFABAD, H. Actual validation of energy simulation and investigation of energy management strategies (Case Study: An office building in Semnan, Iran). **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 12, p. 510–516. 2018.

FOSAS, D, COLEY, D, NATARAJAN, S, et al. Mitigation versus adaptation: Does insulating dwellings increase overheating risk?. **Build Environ**., v. 143, p. 740–759, 2018.

GUARDA, E.L.A. DE; DOMINGOS, R.M.A.; JORGE, S.H.M.; DURANTE, L.C.; SANCHES, J.C.M.; LEÃO, M.; CALLEJAS, I.J.A. The influence of climate change on renewable energy systems designed to achieve zero energy buildings in the present: A case study in the Brazilian Savannah. **Sustainable Cities and Society**, v. 52, 101843, 2020

HONG, T; LANGEVIN, J; SUN, K. Building simulation: Ten challenges. **Building Simulation**, 11: 871–898. 2018.

HUANG, K. T; HWANG, R. L. Future trends of residential building cooling energy and passive adaptation measures to counteract climate change: The case of Taiwan. **Applied Energy**, 184: 1230–1240. 2016

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2007: **Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva, Switzerland, 2007.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2014: Synthesis Report. **Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva, Switzerland, 2014.

IPCC. Special report on renewable energy sources and climate change mitigation. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **IPCC**, Cambridge, UK/New York, USA, 2011.

KHARE, V; NEMA, S; BAREDAR. P. Solar–wind hybrid renewable energy system: a review. **Renewable Sustainable Energy Rev**, v. 58, p. 23-33, 2016.

LI, D. H. W; YANG, L; LAM, J. C. Zero energy buildings and sustainable development implications – A review. **Energy**, v.54, p.1-10, 2013

MARSZAL, A. J; HEISELBERG, P; BOURRELLE, J; MUSALL, E; VOSS, K; SARTORI, I; NAPOLITANO, A. Zero Energy Building – a review of definitions and calculation methodologies, Energy Build., V. 43, p. 971-979, 2011.

NDIAYE, D. The impact of building massing on net-zero achievability for office buildings. **Building Simulation**, 11: 435–438. 2018

NEJAT, P; JOMEHZADEH, F; TAHERI, M. M; GOHARI, M; MAJID, M. Z. A. A global review of energy consumption, CO2 emissions and policy in the residential sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, 2015.

PANAYIOTOU G, KOUKKOULI A, GELEGENIS J E KALOGIROU S. Night ventilation for passive cooling of residences: A case study for Cyprus, In: **Proceedings of the 8th EuroSun Conference of ISES Europe**, 28 de setembro - 1 de outubro de 2010. Graz, pp.1–8, 2010

REY-HERNÁNDEZ, J. M; YOUSIF, C; GATT, D; VELASCO-GOMEZ, E; JOSÉ-ALONSO, J. S; REY-MARTINEZ, F. J. Modelling the long-term effect of climate change on a zero energy and carbon dioxide building through energy efficiency and renewables. **Energy and Buildings**, v.174, p.85-96, 2018

ROAF, S, CRICHTON, D, NICOL, F. Adapting buildings and cities for climate change. A 21st Century survival guide. **Archit Press**, v. 2 p. 15–21, 2009.

ROBERT, A; KUMMERT, M. Designing net-zero energy buildings for the future climate, not for the past. **Building and Environmental**, v.55, p. 150-158, 2012

RUPARATHNA, R; HEWAGE K; SADIQ, R. Improving the energy efficiency of the existing building stock: A critical review of commercial and institutional buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, 2016.

SADINENI, S. B; MADALA, R. F. Passive building energy savings: a review of building envelope components Renew. **Sustain. Energy Rev**., v, 15,, p. 3617-3631, 2018.

SAIDUR, R; MASJULI, H. H; JAMALUDDIN, M. Y. An application of energy and exergy analysis in residential sector of Malaysia. **Energy Policy**, 35: 1050–1063. 2007.

SALEM, R.; BAHADORI-JAHROMI, A.; MYLONA. A. Investigating the impacts of a changing climate on the risk of overheating and energy performance for a UK retirement village adapted to the nZEB standards. **Build. Serv. Eng. Res. Technol**., v. 40, p. 470-491, 2019.

SCHAEFFER, R; SZKLO, A.S; PEREIRA DE LUCENA, A.F; MOREIRA CESAR BORBA, B.S; PUPO NOGUEIRA, L.P; FLEMING, F.P; et al. Energy sector vulnerability to climate change: a review. **Energy**, v. 38. pp. 1-12, 2012.

SHEN, P; LIOR, N. Vulnerability to climate change impacts of present renewable energy systems designed for achieving net-zero energy buildings. **Energy**, v. 114, p. 1288-1305, 2016

SOARES, N; BASTOS, J; DIAS PERERIRA, L; SOARES, A; AMARAL, A. R; ASADI, E; RODRIGUES, E; LAMAS, F. B; MONTEIRO, H; LOPES, M. A. R; GASPAR, A. R. A review on current advances in the energy and environmental performance of buildings towards a more sustainable built environment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 77, p. 845-860, 2017.

SOBHANI, H.; SHAHMORADI, F.; SAJADI. B. Optimization of the renewable energy system for nearly zero energy buildings: A future-oriented approach. **Energy Convers Manage**, v. 224 p. 113370, 2020.

SUMMA, S.; TARABELLI, L.; ULPIANI, G.; DI PERNA, C. Impact of Climate Change on the Energy and Comfort Performance of nZEB: A Case Study in Italy. **Climate** v. 8, p.125, 2020.

TALEB, H. M; SHARPLES, S. Developing sustainable residential buildings in Saudi Arabia: A case study. **Applied Energy**, 88: 383–391. 2011.

TORCELLINI, P; PLESS, S; DERU, M; CRAWLEY, D. Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition National Renewable Energy Laboratory and Department of Energy, US, 2006.

ULPIANI, G.; SUMMA, S.; DI PERNA, C. Sunspace coupling with hyper-insulated buildings: Investigation of the benefits of heat recovery via controlled mechanical ventilation. **Solar Energy**, v.181, p. 17–26, 2019.

VAN HOOFF, T; BLOCKEN, B; TIMMERMANS, H. J. P; HESEN J. L. M. Analysis of the predicted effect of passive climate adaptation measures on energy demand for cooling and heating in a residential building. **Energy**, 94: 811–820. 2016

WANG, B; KE, R.-Y; YUAN, X.-C; WEI. Y.-M; China's regional assessment of renewable energy vulnerability to climate change. **Renew Sustain Energy Rev**, v. 40 p. 185-195, 2014

YANG, X; ZHANG, S; XU, W. Impact of zero energy buildings on medium-to-long term building energy consumption in China. **Energy Policy**, v. 129, p. 574-586, 2019.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq), Processo: 309394/2020-1, pelo suporte financeiro.