DO PARADIGMA INTERNACIONAL AOS DESAFIOS DE IMPLEMENTACAO DOS *ZERO ENERGY BUILDINGS* NO BRASIL: UMA REVISÃO DA LITERATURA

Larissa Angueth (1) Caio Frederico e Silva (2) Joára Cronemberger (3) Cláudia Amorim (4)

(1) Arquiteta e Urbanista, Especialista em Reabilitação Ambiental, larissa.angueth@gmail.com, UnB.
(2) Doutor em Arquitetura e Urbanismo, Professor do PPG FAU UnB, caiosilva@unb.br, UnB.
(3) Doutora em Arquitetura e Urbanismo, Professora do PPG FAU UnB, joaracronemberger@unb.br, UnB.
(4) Doutora em Arquitetura e Urbanismo, Professora do PPG FAU UnB, clamorim@unb.br, UnB.

RESUMO

O desenvolvimento das cidades, associado ao crescimento econômico e social, atua como agente propulsor da demanda energética em diversas escalas. Portanto, o investimento em tecnologias sustentáveis, fontes alternativas de energia limpa e a aplicação de técnicas da arquitetura bioclimática tornam-se fundamentais para que ocorram avanços no sistema energético. Nesse cenário, os *Zero Energy Buildings* (ZEBs) mostram-se alinhados com as metas de redução dos impactos ambientais negativos, uma vez que adotam soluções passivas e ativas de eficiência energética, bem como a geração própria de energia limpa. Assim, o objetivo desse artigo consiste em explorar os desafios para a implementação de ZEBs, a partir de uma a análise do contexto brasileiro e das regiões cujas contribuições são mais significativas para a pesquisa desse tema. Para tanto, a revisão de literatura considerou subtemas que traduzem o panorama dos ZEBs no Brasil e em alguns dos territórios de influência. A pesquisa direta da literatura foi realizada com o uso de palavras-chave e adotou o Scopus (Elsevier) como sua principal base de dados. Além disso, também foram elencados outros trabalhos por meio da pesquisa indireta de artigos correferenciados. Os resultados obtidos abordam um breve panorama sobre políticas públicas e regulamentações de incentivo à eficiência energética, bem como alguns dos desafios encontrados para a implementação dos ZEBs, em especial, no Brasil, Estados Unidos, União Europeia e China. Enquanto o Brasil apresenta resultados pouco expressivos com relação aos ZEBs, as demais regiões possuem metas ambiciosas para a redução do consumo de combustíveis fósseis. Em todos os casos, a evidência leva a concluir que os ZEBs tem uma função crucial para a proteção ao meio ambientes e como agente mitigatório das mudanças climáticas.
Palavras-chave: balanço energético nulo, viabilidade econômica, desafios.

ABSTRACT

The development of cities, associated with economic and social growth, acts as a driving force for energy demand in several scales. Therefore, investment in sustainable technologies, alternative sources of clean energy and the application of bioclimatic architecture strategies has become fundamental for advances to occur in the energy system. In this scenario, Zero Energy Buildings (ZEBs) are aligned with the goals of reducing negative environmental impact since they adopt passive and active energy efficiency solutions, as well as their own generation of clean energy. Thus, the objective of this article is to explore the challenges of the implementation of ZEBs, based on an analysis of the Brazilian context and the regions whose contributions are most significant for research on this topic. To this end, the literature review considered sub-themes that translate the panorama of ZEBs in Brazil and in some of the territories of influence. A direct literature search was performed using keywords and adopted Scopus (Elsevier) as its main database. In addition, other works were also listed through the indirect search of co-referenced articles. The results obtained address a brief overview of public policies and regulations to encourage energy efficiency, as well as some of the challenges encountered for the implementation of ZEBs, especially in Brazil, the United States, the European Union and China. While Brazil presents little expressive results in relation to ZEBs, the other regions have ambitious targets for reducing the consumption of fossil fuels. In all cases, the evidence leads to the conclusion that ZEBs play a crucial role in protecting the environment and as a mitigating agent for climate change.
Keywords: zero energy balance, economic viability, challenges.

1. INTRODUÇÃO

A energia é considerada indispensável para assegurar a qualidade de vida dos seres humanos e fundamental para o desenvolvimento econômico e social (ALMEIDA, 2009). No entanto, a geração energética é um dos principais agentes responsáveis por significativos impactos ambientais negativos, com consequente influência nas mudanças climáticas (BARBOSA et al., 2016).

Até 2050, estima-se que teremos cerca de 70% da população mundial vivendo em áreas urbanas, o que torna a cidade cada vez mais consumidora de energia e de recursos naturais (IEA, 2021). Por isso, o investimento em tecnologias sustentáveis, fontes alternativas de energia limpa e o resgate de conceitos da arquitetura bioclimática se faz necessário para que ocorram melhorias no sistema energético brasileiro.

Só em 2019, o setor da construção civil foi o responsável por 38% das emissões de dióxido de carbono e por consumir 35% da energia no mundo, segundo o Relatório Global de Edifícios e Construções (UNITED ENVIRONMENT PROGRAMME, 2020). No Brasil, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) demonstra que as edificações consomem cerca de 50% da eletricidade no país. (EPE, 2021). Diante desse cenário, cresce a preocupação e o interesse global em discutir questões ambientais e propor compromissos para mitigar o impacto negativo dessa ação antrópica no meio ambiente, sobretudo na busca por edifícios mais eficientes e com menor impacto energético.

Um projeto com baixo consumo de energia se inicia com a compreensão do edifício: suas necessidades de conforto e o estudo das condicionantes ambientais. Nesse sentido, as melhorias na eficiência energética dos edifícios podem ser alcançadas com estratégias passivas ou ativas. De uma forma geral, incrementos na envoltória dos edifícios podem ser classificados como estratégias passivas. Já as atualizações dos sistemas de climatização, ventilação e iluminação artificial são consideradas estratégias ativas (SADINENI; MADALA; BOEHM, 2011; RUIZ; JIMENEZ; CARVAJAL, 2022) Inicialmente, é fundamental reduzir a demanda de energia (estratégias passivas) da edificação. Em seguida, o edifício deve adotar sistemas energeticamente eficientes (estratégias ativas) e por fim, considerar a geração de energia proveniente de recursos renováveis, com o intuito de alcançar o balanço energético nulo. (CAO; DAI; LIU, 2016; D'AMANZO; MERCADO; KARLEN, 2020; HARKOUSS; FARDOUN; BIWOLE, 2017).

Nesse contexto, o setor da construção civil apresenta melhorias promissoras para enfrentar as mudanças climáticas. Há mais de duas décadas, pesquisas e projetos vêm demonstrando que é possível desenvolver construções eficientes, cujo consumo de energia pode ser até 80% menor (KEELER; VAIDYA, 2018). Assim, uma das alternativas para diminuir o impacto das construções no meio ambiente são os *Zero Energy Buildings* (ZEBs).

Os ZEBs são edificações autônomas, com demanda energética reduzida, ao ponto de que seu abastecimento possa ser suprido por geração própria de energia, proveniente de fontes limpas. Em comparação às edificações convencionais, os ZEBs trazem benefícios significativos, tanto para o meio ambiente, quanto para os usuários. Por isso, políticas, legislações e métodos para alcançar o balanço energético nulo estão sendo difundidas mundialmente, particularmente na União Europeia, Estados Unidos e China (OHENE; CHAN; DARKO, 2022).

Com relação à contribuição científica, Ohene, Chan e Darko (2022) classificaram as regiões do globo terrestre cujas contribuições são mais significativas para a pesquisa dos ZEBs. Enquanto os países da União Europeia ocupam boa parte do ranking, o Brasil é o primeiro país da América Latina a aparecer e ocupa a vigésima nona posição. Além disso, um estudo desenvolvido por Urge-Vorsatz e colaboradores (2020) identifica, em um mapa global, os casos de ZEBs e de Passivhaus certificadas que foram encontrados na literatura. De acordo com essa pesquisa, a maioria dos edifícios de energia zero ou quase zero encontra-se na Europa. Wei e Skye (2021) também demonstram, em sua pesquisa, que a maioria dos ZEBs são edifícios residenciais e estão localizados, principalmente, na Europa e nos Estados Unidos.

Todavia, Domingos e Gabriel (2020) abordam a falta de parâmetros para que uma construção seja classificada como ZEB, principalmente quanto aos critérios normativos de desempenho desse tipo de empreendimento. Além disso, os ZEBs enfrentam outros desafios ao longo do seu ciclo de vida (NDUKA et al., 2019; HARKOUSS; FARDOUN; BIWOLE, 2017), particularmente, no que diz respeito aos custos iniciais do projeto. Nesse sentido, Kock, Theiss e Filho (2020) ressaltam a importância da viabilidade econômica em uma atividade sustentável e argumentam que todo produto desenvolvido necessita ter um preço justo para que não gere exploração, nem desequilíbrio ecossistêmico.

2. OBJETIVO

O objetivo dessa revisão de literatura consiste em explorar os desafios para a implementação dos ZEBs no Brasil, a partir de uma análise do contexto brasileiro e das regiões cujas contribuições são mais significativas para a pesquisa desse tema.

3. MÉTODO

De início, foi realizado um vasto levantamento bibliográfico, particularmente, por meio de artigos científicos. Em uma segunda etapa, parte-se para uma revisão de literatura sobre as medidas de eficiência energética e os desafios para implementação dos ZEBs. Também foram levantadas normativas, metas e políticas públicas relacionadas a energia, tanto no contexto nacional como no internacional. Com isso, foi possível compreender o estado da arte atual e averiguar os potenciais de pesquisa que podem ser explorados.

Esta pesquisa bibliográfica possui objetivos exploratórios inerentes ao cenário ZEB. Assim, a análise foi realizada com base em subtemas que traduzem o panorama dos ZEBs no Brasil e em alguns dos territórios cuja influência é relevante nesse assunto. Esses aspectos discutem os principais desafios para a implementação dos ZEBs, bem como políticas e regulamentações de incentivo à eficiência energética.

A pesquisa direta da literatura adotou o Scopus (Elsevier), como sua principal base de dados, e selecionou artigos publicados no intervalo de 2019 a 2023. O critério de seleção para a escolha desses artigos foi a presença de palavras-chave como *"zero energy buildin, ZEB, genergy-efficient measures, challenges* e *barriers"* no título, no resumo e nas palavras-chave dos textos. Dessa forma, foram encontrados 186 artigos, os quais foram submetidos a uma triagem minuciosa para eliminar tópicos não relacionados e estreitar o banco de dados.

Além disso, outros trabalhos também foram selecionados por meio da pesquisa indireta de artigos correferenciados. Nesse caso, a seleção foi feita por afinidade ao tema abordado previamente. Além disso, também foram consultados livros, relatórios, legislações, normativas e sites com base de dados, complementarmente. Por fim, os critérios adotados para a seleção da leitura foram associados à qualidade e à abrangência dos dados relacionados aos subtemas dessa pesquisa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ZEBs mostram-se alinhados com as metas de redução dos impactos ambientais negativos. Esse tipo de construção deve ter a sua demanda energética reduzida por meio da adoção de estratégias passivas de conforto e pelo uso de sistemas mais eficientes (TORCELLINI et al., 2006). Além disso, o atendimento a essa demanda é feito por meio de fontes renováveis de baixo custo, disponíveis localmente. Isso significa que os ZEBs devem fornecer um ambiente confortável, de maneira eficiente, ao mesmo tempo que propiciam um balanço energético nulo, ao longo de um ano (ATHIENITIS; O'BRIEN, 2015).

Assim, esse trabalho partiu de uma análise do panorama internacional das regiões cujas contribuições são mais significativas para a temática ZEB, a fim de identificar sua influência no contexto brasileiro. Dessa forma, são abordados temas sobre políticas públicas e regulamentações de eficiência energética, bem como alguns dos desafios para implementação dos ZEBs.

4.1. Políticas públicas e regulamentações de incentivo à eficiência energética: Brasil, União Europeia Estados Unidos e China

Segundo Ruiz, Jimenez e Carvajal (2022), o sucesso dos ZEBs depende das diretrizes que os países integram em seus governos, por meio de normas e regulamentos. Nesse contexto, a revisão bibliográfica dessa parte da presente pesquisa se concentra em apresentar as políticas e regulamentações energéticas para o Brasil e para algumas das regiões que mais contribuíram com os avanços de ZEBs nos últimos anos, particularmente, a União Europeia (UE), os Estados Unidos (EUA) e a China.

4.1.1. Contexto internacional: Estados Unidos, União Europeia e China

E contexto internacional, observa-se que a UE apresenta um grande conjunto de metas para garantir o aumento da eficiência no parque imobiliário da Europa (MATA et al., 2020). Entre eles, destaca-se a Diretiva 2010/31/EU, cujo objetivo consiste em promover o avanço do desempenho energético dos edifícios. Essa normativa estabelece que, a partir de 2021, todos os edifícios novos deverão ter necessidades quase nulas de energia (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Para Mata e colaboradores (2020), a Diretiva de Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD, sigla em inglês), de 2018, é a principal ferramenta política da UE, uma vez que complementa a Diretiva 2010/31/EU e estabelece uma meta de redução de 40% dos Gases de Efeito Estufa (GEE), até 2030, e entre 80% e 95%, até 2050 (EUROPEAN COMMISSION, 2018). Ademais, a maioria dos Estados-Membros da UE apresenta regulamentos implementados a nível nacional, que seguem as orientações da Comissão Europeia e das diretivas locais.

Nos EUA, a Lei de Independência e Segurança Energética foi outorgada em 2007 e estabelece que todos os edifícios comerciais devem ser de energia zero até 2050. Outro ponto relevante é o *Planning for Federal Sustainability in the Next Decade*, uma ordem presidencial de 2015 que determina que, a partir de 2020, todos

os novos edifícios governamentais devem ser projetados para alcançar energia líquida zero (MATA et al., 2020; PANAGIOTIDOU; FULLER, 2013; UNITED STATES OF AMERICA, 2015).

Além das metas governamentais americanas, os códigos e padrões desempenham um papel importante para o estabelecimento de requisitos mínimos para projetos e construções com foco em eficiência energética (WANG et al., 2021). Nesse sentido, destaca-se o *Zero Code 2.0*, cujo objetivo é estabelecer requisitos mínimos de eficiência energética de edifícios e exigir sistemas de energia renovável, visando a redução das emissões de carbono. Porém, outros padrões, com nível de exigência maior ou igual, podem ser adotados igualmente, como é o caso do Padrão ASHRAE 90.1-2016[1] e do *International Energy Conservation Code*[2] 2021 (CHARLES ELEY, 2020; WANG et al., 2021).

Os EUA também dispõem de planos e normativas ao nível estadual, principalmente em relação aos códigos de construção, que possuem maior agilidade para decretar planos mais sustentáveis e políticas de ZEB dentro de suas jurisdições. A cidade de Los Angeles, por exemplo, lançou o *Green New Deal*, um plano que, entre outras facetas, exige que todos os edifícios novos e existentes sejam de emissão de carbono zero até 2050 (MATA et al., 2020).

Outro país com grande potencial de implementação de projeto e construções ZEBs, em larga escala, é a China. Entre os anos de 2000 e 2015, devido ao crescimento anual do PIB, a China se tornou o maior consumidor de energia do mundo e, consequentemente, o maior emissor de carbono (YUAN et al., 2017). Assim, torna-se inevitável a busca pelo equilíbrio entre a demanda energética e as melhorias de conforto no ambiente construído. Em 2019, foi apresentada a nova versão do *Technical Standard for Nearly Zero Energy Buildings* (GB/T 51350-2019). Esse documento propõe para o país que 30% dos novos edifícios sejam de energia ultrabaixa, 30% dos edifícios antigos sejam remodelados para atingir energia ultrabaixa e que o abastecimento de 30% de todos os edifícios seja proveniente de fonte renováveis (LUO et al., 2020). Além disso, as diferentes zonas climáticas desse país contribuem para que o desenvolvimento de tecnologias de eficiência energética atenda a diferentes demandas (CAO; DAI; LIU, 2016).

Ademais, a China possui várias autoridades governamentais responsáveis pela supervisão e gestão das atividades de conservação de energia, que se complementam, para promover a eficiência energética das edificações, acordo com as responsabilidades delegadas pelo Conselho de Estado. Entre esses órgãos, destacam-se o *National Development and Reform Commission* (NDRC), responsável pela conservação de energia e o *Ministry of Housing and Urban-Rural Development* (MOHURD), que atua na gestão da construção civil (YUAN et al., 2017; ZHANG et al., 2021). Enquanto as leis especificam os requisitos de desempenho energético, a partir de aspectos relacionados à construção, seleção de materiais e implementação de energias renováveis, os regulamentos apresentam conteúdos mais específicos e atuam como complementos das leis nacionais (YUAN et al., 2017).

Sob a ótica das políticas públicas, observa-se a influência do contexto internacional no Brasil, a medida em que incentiva a criação de diretrizes e padrões relacionados à eficiência energética na construção civil: um terreno fértil para o desenvolvimento dos *zero energy buildings.*

4.1.2. Contexto brasileiro

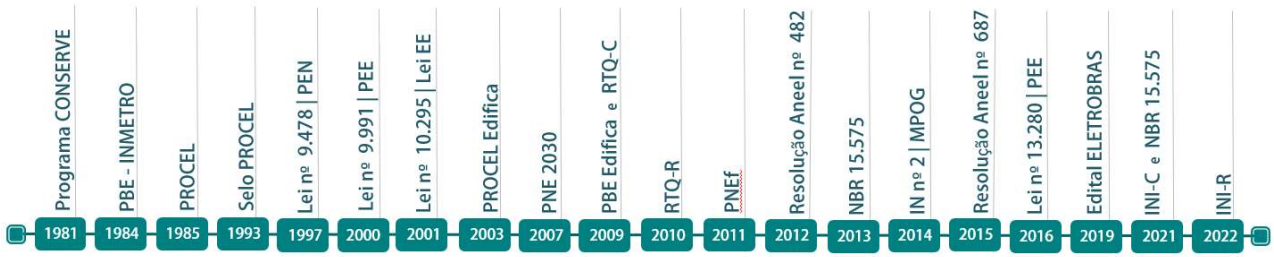
Assim como nos países desenvolvidos, a demanda de energia, no Brasil, cresce proporcionalmente ao desenvolvimento econômico e ao surgimento de novas tecnologias (OLIVEIRA et al., 2017). Em 2020, houve um aumento de 4,6% no consumo total de energia no país (EPE, 2022). Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2022), 44% da energia gerada no território nacional é consumida por edifícios, sendo que o setor residencial corresponde a 10,9%, o industrial a 32,2% e o de serviços a 4,8%.

No que diz respeito às políticas e regulamentações nacionais, o Brasil apresentou, nos últimos anos, um conjunto de normativas, ações e programas relacionados à eficiência energética (figura 1). Entre elas destaca-se o Programa Brasileiro de Etiquetagem em Edificações (PBE Edifica) e as nova Instruções Normativas Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-R e INI-C).

[1] A ASHRAE 90.1-2016 é a base para os códigos de construção. Apresenta os requisitos mínimos de eficiência energética para edifícios comerciais (WANG *et al.*, 2021).

[2] *International Energy Conservation Code 2021* é um código que apresenta requisitos mínimos de desempenho para edifícios energeticamente eficientes (ICC, 2022).

Figura 1 – Principais legislações e regulamentos de incentivo à eficiência energética no Brasil.



O Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), coordenado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), deu início às discussões sobre programas de avaliação de desempenho, com foco no uso racional de energia no Brasil. Seu objetivo consiste em informar aos consumidores brasileiros, por meio de uma Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), o nível de consumo dos equipamentos elétricos. Essas etiquetas classificam os produtos do mais eficiente para o menos eficiente. Atualmente, o PBE é composto por quarenta Programas de Avaliação da Conformidade, cuja etiquetagem abrange desde produtos até edificações. Entre esses procedimentos, destaca-se o Programa Brasileiro de Etiquetagem em Edificações (PBE Edifica), criado em 2009. Seu objetivo é avaliar a eficiência energética de edificações e, em parceria com o INMETRO, atribuir a etiqueta PBE Edifica (PROCEL, 2020).

Nesse mesmo ano, o processo de etiquetagem para edificações comerciais, de serviços e públicos foi oficializado com a publicação do RTQ-C. Porém, somente no ano seguinte, em 2010, foi publicado o RTQ-R com uma metodologia distinta para edifícios residenciais. Em ambos os regulamentos, as edificações são classificadas em uma escala que varia de "A" (maior eficiência) até "E" (menor eficiência) (CARDOSO, 2015; LABEEE, 2022; MME, 2011; PROCEL, 2006). No entanto, após a constatações de limitações do RTQ-C e o RTQ-R, o Inmetro aprovou novas Instruções Normativas Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços, Públicas (INI-C) e Residenciais (INI-R), nos anos de 2021 e 2022, respectivamente. (INMETRO, 2022; PROCEL, 2020).

Com relação aos ZEBs, o Brasil apresenta normativas pouco expressivas. No entanto, a INI-C e a INI-R avaliam o consumo de energia térmica e elétrica da edificação, bem como a geração de energia local proveniente de fonte renovável (PACHECO; FOSSATI, 2020), o que favorece o desenvolvimento de edificações com baixo ou zero consumo de energia.

Nesse sentido, a *Green Building Council* Brasil (GBC) Brasil lançou, em 2017, a certificação GBC *Zero Energy*, cujo objetivo é garantir o cumprimento das metas da COP Paris, acelerar a transformação do mercado nacional de eficiência energética e a geração de fontes renováveis, além de desenvolver novas tecnologias e promover ambientes saudáveis (GBC BRASIL, 2023a). Atualmente, existem 21 projetos com essa certificação, no país (GBC BRASIL, 2023).

Outro marco relevante para os ZEBs no país foi lançado, pela Eletrobrás, em 2019: a chamada pública PROCEL Edifica – NZEB Brasil, para a seleção de projetos de edificações. O objetivo desse edital é a construção ou *retrofit* de 4 NZEBs em território nacional, além de fomentar o conhecimento, estudo e desenvolvimento de projetos dessa natureza (ELETROBRAS, 2019).

4.2. Desafios para implementação de ZEBs

A aplicabilidade de projetos e construções de ZEB enfrentam vários desafios inter-relacionados (NDUKA *et al.*, 2019). Ruiz, Jimenez e CarvajaL (2022) identificam esses desafios como resultado das medidas de eficiência ativas e passivas. Os desafios ativos estão ligados à falta de integração entre os serviços prediais e os de automação. Já os desafios passivos vão desde a necessidade de criação de materiais construtivos adaptados ao clima regional, até às ações do usuário que, em busca de conforto, afetam a eficiência energética da edificação.

Além disso, Harkouss, Fardoun e Biwole (2017) mostram que muitos trabalhos abordam as barreiras encontradas para o desenvolvimento de um ZEB. Como exemplo, é possível citar a qualificação profissional, o alto custo inicial, as incertezas quanto ao retorno dos investimentos, a ausência de uma metodologia comum, falta de espaço nas edificações para geração de energia, edifícios com envoltória pouco eficiente e o consequente superdimensionamento fotovoltaico, entre outros que serão abordados a seguir.

4.2.1. Conceito ZEB

É possível encontrar muitos exemplos de conceitos ZEB na literatura, porém o grande desafio é definir um entendimento sobre esses termos, uma vez que existem mais de setenta definições em todo o mundo

(WILLIAMS et al., 2016). Essa falta de definição abre um ponto cego para que edifícios energeticamente ineficientes, que possuam uma quantidade exacerbada de módulos fotovoltaicos, possam ser considerados ZEB (DOMINGOS; GABRIEL, 2020). Para o Brasil, essas autoras ressaltam que as pesquisas nessa área ainda não geraram uma base de dados suficientemente sólida para desenvolver uma referência de ZEB que atenda toda a extensão territorial do país.

Da mesma forma, para D'Agostino e Mazzarella (2019, p. 203), não existe uma definição clara sobre edifícios energeticamente eficientes, mas é possível limitar a terminologia ZEB a "edifícios que demonstrem, através de medições anuais, que a energia fornecia é menor ou igual a energia produzida no local". A *American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) concorda quando adota o termo *Net Zero Energy Building* (nZEB) e propõe uma definição única: um edifício que produz tanta energia proveniente de fonte renovável quanto consome, ao passo que mantém os níveis aceitáveis de funcionalidade. Essas edificações também podem trocar energia com a rede elétrica, desde que o balanço energético anual seja nulo (ASHRAE, 2008; CAO; DAI; LIU, 2016).

Com relação aos projetos de ZEB, existe uma gama de informações disponíveis para auxiliar nesse processo, mas as fontes são dispersas e variadas. Por isso, as informações existentes devem ser coletadas, avaliadas e organizadas para que se tornem mais acessíveis (MCNABB, 2013). Além disso, cada país deve desenvolver sua própria definição de acordo com o seu contexto (ZHANG et al., 2021).

Sob essa ótica, as Instruções Normativas Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços, Públicas (INI-C) e Residenciais (INI-R) trouxeram, pela primeira vez o conceito de "edificação de energia quase zero (NZEB)" e de "edificação de energia positiva (EEP)". Enquanto no primeiro caso a geração de energia corresponde a, no mínimo, 50% da sua demanda, no segundo, a geração precisa ser superior à sua demanda energética anual (INMETRO, 2022; PROCEL, 2020).

4.2.2. Processo de projeto para ZEB

De uma forma geral, a maioria dos projetistas segue o processo de projeto tradicional, que pode ser entendido como um processo linear com rotinas de trabalho sequenciais (LÖHNERT; DALKOWSKI; SUTTER, 2003; ZHANG et al., 2021). Kwok e Grondzik (2018), consideram esse processo como uma "passagem de bastão" de um especialista para outro. O problema é que essa forma de projetar, geralmente, impede que os edifícios ultrapassem os níveis convencionais de desempenho o que, consequentemente, acarreta altos custos operacionais (LÖHNERT; DALKOWSKI; SUTTER, 2003).

Por outro lado, quando o objetivo é projetar e construir um ZEB, surgem novas preocupações quanto ao conforto, ao consumo de energia e ao impacto ambiental (ATHIENITIS; O'BRIEN, 2015). Por isso, o desenvolvimento desse tipo de edificação exige uma combinação de expertises associada a uma organização adequada das diversas etapas do processo de projeto. Uma das chaves para a promoção em larga escala dos ZEBs seria a transformação do processo tradicional para um processo de projeto integrado (PPI), que incorpore uma abordagem mais colaborativa entre os profissionais (ZHANG et al., 2021).

O PPI considera a edificação como um sistema e enfatiza a integração dos conceitos de projeto desde o início, por meio de uma equipe coordenada de especialistas (LÖHNERT; DALKOWSKI; SUTTER, 2003). Aplica distintas habilidades, conhecimentos e integra diferentes sistemas de construção para produzir edifícios mais eficientes e responsáveis, com um custo operacional mais baixo. Além disso, promove ciclos de *feedback* crescentes entre todas as partes interessadas do projeto, desde o proprietário, arquitetos, engenheiros e construtores, até os usuários e operadores da edificação. Isso permite compartilhar o aprendizado, descobrir soluções com múltiplos benefícios, além de aperfeiçoar o processo como um todo (ATHIENITIS; O'BRIEN, 2015; KWOK; GRONDZIK, 2018).

4.2.3. Papel dos usuários no desempenho energético das edificações

A forma como o edifício é operado e o comportamento de seus ocupantes representam um papel crítico no desempenho energético e pode ser considerado tão importante quanto os avanços tecnológicos (BUTERA, 2013; VINÍCIUS et al., 2019). Ademais, uma das necessidades das pessoas em relação a uma edificação é o conforto humano (CARVAJAL QUINTERO, 2022). Por isso, o comportamento do usuário influencia diretamente a demanda de energia para resfriamento e aquecimento, da mesma forma que o consumo de eletrodomésticos e a iluminação artificial (ZHANG et al., 2021).

Os edifícios de energia zero geralmente possuem sistemas prediais avançados que incluem o controle de sistemas de refrigeração, iluminação, incêndio, segurança, entre outros (ZHANG et al., 2021). Diante disso, pode-se argumentar que edifícios eficientes, totalmente automatizados, são fundamentais para alcançar a eficiência energética, uma vez que não dependem das incertezas relacionadas ao comportamento humano. No entanto, tecnologias e sistemas que excluem as pessoas dos processos de tomada de decisão são pouco aceitos,

o que consolida a necessidade de interação harmônica entre os aspectos técnico e comportamentais (VINÍCIUS et al., 2019).

Independente dos esforços da indústria para aprimorar tecnologias de desempenho, nenhuma aplicação será assertiva sem o envolvimento de todas as partes interessadas (projetistas, proprietários, operadores, construtores etc.). Por isso, os usuários do edifício devem ser educados quanto ao uso de tais tecnologias e notificados constantemente sobre o tipo de dados que estão sendo coletados e de que maneira essas informações estão sendo usadas para melhorar o desempenho do edifício (VINÍCIUS et al., 2019). Além disso, também devem integrar rotinas sobre o uso adequado de equipamentos (SOULEY AGBODJAN et al., 2022). O conhecimento desses dados permite a detecção precoce de problemas, incluindo configurações inadequadas de controle e mau comportamento dos ocupantes (BUTERA, 2013).

4.2.4. Perspectivas ZEB para edificações novas e existentes

As edificações de energia zero proporcionam oportunidades tanto para os edifícios novos, quanto para os existentes (OHENE; CHAN; DARKO, 2022; RUIZ; JIMENEZ; CARVAJAL, 2022). No entanto, a maioria dos trabalhos de pesquisa está relacionada aos novos edifícios, enquanto os *retrofits* de energia recebem pouco destaque. São raros os estudos que levam em consideração a manutenção de ZEB e a integração de edifícios eficientes com novas tecnologias (HARKOUSS; FARDOUN; BIWOLE, 2018).

As edificações existentes possuem um papel importante nas metas de redução do consumo de energia, uma vez que se apresentam em maior número (RUIZ; JIMENEZ; CARVAJAL, 2022). No caso dos *retrofits*, as características reais do edifício devem ser consideradas e analisadas sob uma perspectiva multidomínio. Dessa forma, todas as soluções técnicas devem estar integradas entre si e com o ambiente construído (BELUSSI *et al.*, 2019).

No entanto, para Belussi e colaboradores (2019), muitos edifícios existentes estão sendo excluídos da otimização energética. Na Europa, por exemplo, aplicar os novos padrões energéticos em seus edifícios históricos pode ser muito caro e, por vezes, não aplicável. Já nos países em desenvolvimento, o foco está em novas construções e os *retrofits* também apresentam pouco progresso em direção à eficiência energética (URGE-VORSATZ et al., 2020). Ohene, Chan e Darko (2022), em sua exploração sistemática sobre ZEBs, também constataram uma maior ênfase dos estudos nos projetos de novas edificações, uma vez que oferecem maior flexibilidade quanto ao uso de novas tecnologias.

4.2.5. Desafios tecnológicos

As inovações tecnológicas estão no cerne da concepção de um NZEB, tanto do que diz respeito aos recursos para redução do consumo energético, quando à geração de energia limpa local. (CIELO; SUBIANTORO, 2021) Por outro lado, WEI e colaboradores (2023) argumentam sobre a dificuldade de se projetar utilizando apenas essas tecnologias. Como os ZEBs são produzidos em diferentes escalas, utilizando diversos métodos e custos distintos, o compartilhamento de informações e tecnologias torna-se complexo. Por isso, edificações eficientes são difíceis de popularizar.

Quando o abastecimento dos ZEB é feito por energia solar fotovoltaica, surgem outras barreiras tecnológicas, uma vez que a produção de energia está limitada à área disponível para instalação dos sistemas, bem como à geometria e à orientação dos edifícios (SOULEY AGBODJAN et al., 2022). Essa limitação do projeto à escala do edifício impõe um limite máximo de consumo de energia (BELUSSI et al., 2019). Por isso, Butera (2013) defende que os ZEBs precisam avançar para a escala da cidade. Dessa forma, o passo seguinte seria o distrito de energia zero, onde é mais fácil atender à demanda energética por meio de diferentes formas de geração e armazenamento, com menores custos.

4.2.6. Desafios econômico-financeiros

Questões relacionadas ao custo da eficiência energética são frequentemente levantadas (URGE-VORSATZ et al., 2020). De acordo com Kock, Theiss e Filho (2020), um empreendimento sustentável e socialmente justo também precisa ser economicamente viável. No entanto, Marszal e colaboradores (2011) argumentam que o viés econômico é deixado de lado nos ZEB, mas é de grande importância para a implementação deste conceito, uma vez que os custos também influenciam na tomada de decisão.

Nesse contexto, o custo-benefício da adoção de medidas energéticas ainda é uma questão debatida pelos profissionais da construção civil. Principalmente, porque o sucesso de um ZEB depende das condições climáticas e locais, o que traz condicionantes específicas para cada projeto. Além disso, as medidas de eficiência energética são individuais, o que dificulta a reprodução exata das estratégias passivas e do dimensionamento de geradores de energia renovável. Para Kapsalaki, Leal e Santamouris (2012), a existência de vários ZEBs construídos pelo mundo indica que essas edificações são passíveis de acontecer. Porém não há

comprovação de que as escolhas de projeto sejam eficientes do ponto de vista econômico. Por isso, a análise da viabilidade econômica para esse tipo de edificação torna-se tão necessária (DOMINGOS; GABRIEL, 2020).

Para usuários, fornecedores, equipes de projeto e proprietários de edifícios, os custos iniciais são uma barreira significativa para alcançar edificações de alto desempenho (TORCELLINI; PLESS; LEACH, 2015; ZHANG et al., 2021), particularmente nos países em desenvolvimento (COSTA; AMORIM; SILVA, 2020) Da mesma forma, para muitos investidores, esses gastos iniciais elevados são sinônimo de insegurança e ocorrem devido aos altos custos de tecnologias e equipamentos eficientes (NDUKA et al., 2019). No entanto, essa percepção considera, apenas, o custo inicial do empreendimento e descarta a redução do consumo energético e a recuperação do valor investido (DOMINGOS, 2020).

5. CONCLUSÕES

Uma das consequências do elevado consumo energético do setor da construção civil são os impactos ambientais negativos e sua consequente influência nas mudanças climáticas Nesse sentido, os ZEBs demonstram grande potencial para mitigar os impactos negativos relacionados ao meio ambiente, uma vez que são edificações de baixo consumo e sua demanda energética é suprida por geração própria de energia limpa.

Para o desenvolvimento de um ZEB, é fundamental reduzir a demanda energética da edificação (estratégias passivas), adotar sistemas eficientes (estratégias ativas) e, por último, considerar a geração de energia limpa, com o intuito de alcançar o balanço energético nulo, ao longo de um ano. Além disso, a aplicabilidade de um projeto ZEB encontra vários desafios inter-relacionados, como por exemplo, a inexistência de uma definição clara sobre edifícios energeticamente eficientes e os altos custos iniciais. Já a forma tradicional como o edifício é projetado, sem a integração de expertises profissionais, é outro obstáculo que impede que os níveis convencionais de desempenho sejam ultrapassados. Outras dificuldades esbarram em questões que vão desde o modo como edifício é operado pelos seus ocupantes e os altos custos para *retrofit*, até a análise das superfícies disponíveis para a geração de energia limpa.

Os resultados também trouxeram algumas políticas e regulamentações energéticas para o Brasil, a União Europeia (UE), os Estados Unidos (EUA) e a China. Diferentemente do contexto internacional, o Brasil não apresenta nada muito concreto com relação aos ZEB, apesar das várias normativas de incentivo à eficiência energética. As demais regiões pesquisadas apresentaram, por sua vez, metas ambiciosas para o controle de emissões de GEE, que apostam na redução do consumo de energia e de combustíveis fósseis.

Assim, conclui-se que os ZEBs desempenham um papel cada vez mais importante para o meio ambiente e podem atuar como agentes mitigatórios das mudanças climáticas. Os desafios atuais e futuros deverão ser enfrentados por todas as partes envolvidas para que a temática ZEB esteja em constante atualização. Nesse sentido, pesquisas vindouras poderão abordar questões tanto metodológicas, relacionadas ao projeto ZEB, quanto econômicas, relacionadas à valoração dos custos e benefícios da construção de ZEB.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Alana Mello de. **Conforto térmico e eficiência energética em edifício multifamiliar na cidade de Maceió.** 222f. Dissertação (mestrado em Arquitetura e Urbanismo: Dinâmica do Espaço Habitado) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **ASHRAE Vision 2020: Producing Net Zero Energy Buildings**. Atlanta: ASHRAE, 2008. 28p.

ATHIENITIS, A.; O'BRIEN, W. **Modeling, design, and optimization of net-zero energy buildings**. Berlin: Ernst & Sohn, 2015.

BARBOSA, A. S. *et al.* **Energia e sustentabilidade**. Barueri: Manole Ltda, 2016. 396p.

BELUSSI, L. et al. A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions. **Journal of Building Engineering,** v. 25, p. 100772, 2019.

BUTERA, F. M. Zero-energy buildings: the challenges. **Advances in Building Energy Research**. n. February, v.7, n. 1, p. 37–41, 2013.

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**, Tianjin, v. 128, p. 198–213, 2016.

CARDOSO, R. B. **Etiquetagem e eficiência energética**. 1. ed. Curitiba: Appris, 2015.

CARVAJAL QUINTERO, S. X. Zero Energy Balance Buildings: Definitions, Current Challenges and Future Opportunities. **IEEE Latin America Transactions**, v. 20, n. 3, p. 417–429, 2022.

CIELO, D.; SUBIANTORO, A. Net zero energy buildings in New Zealand: Challenges and potentials reviewed against legislative , climatic , technological , and economic factors. **Journal of Building Engineering**, v. 44, p. 102970, 2021.

CHARLES ELEY. **ZERO Code 2.0: A national and international building energy standard for new commercial, institutional, and mid- to high-rise residential buildings**. 2020. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://zero-code.org/wp-content/uploads/2020/11/ZERO-Code-2.0.pdf>. Acesso em 23 fev. 2023.

COSTA, J. F. W.; AMORIM, C. N. D.; SILVA, J. C. R. Retrofit guidelines towards the achievement of net zero energy buildings for office buildings in Brasilia Brazilian Association of Technical Standards. **Journal of Building Engineering**, v. 32, p. 101680, 2020.

D'AGOSTINO, D.; MAZZARELLA, L. What is a nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions. **Journal of Building Engineering**, v. 21, n. 1, p. 200–212, 2019.

D'AMANZO, M.; MERCADO, M. V.; KARLEN, C. G. 10 preguntas de los edificios energía cero: revisión del estado del arte. **Revista Hábitat Sustentable**, v. 10, n. 2, p. 24–41, 2020.

DOMINGOS, R. M. A. **Análise comparativa do custo-benefício de medidas de eficiência energética e geração fotovoltaica em habitações de interesse social**. 89 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civi, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. 1–23 f. 2020.

DOMINGOS, R. M. A.; GABRIEL, E. Proposta de modelo Casa de Energia Zero (CEZ) de baixo padrão para Zona Bioclimática 07 com avaliação da viabilidade econômica. **E&S Engineering and Science**, v. 2, n. 9, p. 14–26, 2020.

ELETROBRAS. **Edital de Chamada Pública NZEB Brasil**. Rio de Janeiro, 2019

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional 2021: Relatório Síntese, ano base 2020**. EPE: 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022:** Ano base 2021. EPE, 2022.

EUROPEAN COMMISSION. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council, of 19 May 2010, on the energy performance of buildings. **Official Journal of the European Union**, p.29, 19 mai. 2010.

EUROPEAN COMMISSION. Directive 2018/844/EU of the European Parliament and of the Concil, of 30 May 2018, on the energy performance of buildings. **Official Journal of the European Union,** p. 17, 30 mai. 2018.

GREEN BUILDING COUNCIL BRASIL (GBC). **Empreendimentos GBC Zero Energy**. [*S. l.*], 2023a. Disponível em: <https://www.gbcbrasil.org.br/certificacao/zero-energy/empreendimentos/>.Acesso em: Acesso em: 15 mar. 2023.

GREEN BUILDING COUNCIL BRASIL (GBC). **GBC Brasil Zero Energy: Prédios Autossuficientes em Energia**. 2023a. Disponível em: <https://www.gbcbrasil.org.br/certificacao/zero-energy>. Acesso em: 15 mar. 2023.

HARKOUSS, F.; FARDOUN, F.; BIWOLE, P. H. Optimization approaches and climates investigations in NZEB - A review. **Building Simulation**, v. 1, p. 923-952, 2017.

INTERNATIONAL CODE COUNCIL (ICC). **2021 International Energy Conservation Code (IECC)**, 2022. Disponível em: <https://codes.iccsafe.org/content/IECC2021P1/preface>. Acesso em: 26 fev. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Outlook 2021**. Paris, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>. Acesso em: 24 fev.2023.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Portaria n° 309, de 6 de setembro de 2022. Aprova as Instruções Normativas e os Requisitos de Avaliação da Conformidade para a Eficiência Energética das Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas e Residenciais – Consolidado.** 2022.

KAPSALAKI, M.; LEAL, V.; SANTAMOURIS, M. A methodology for economic efficient design of Net Zero Energy Buildings. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 765–778, 2012.

KEELER, M.; VAIDYA, P. **Fundamentos de projetos de edificações sustentáveis**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2018.

KOCK, R. V.; THEISS, V.; FILHO, S. P. Análise econômica financeira do emprego de cobertura vegetada em edifícios públicos. **Navus: Revista de Gestão e Tecnologia**, Florianópolis, v. 11, p. 01–17, 2020.

KWOK, A. G.; GRONDZIK, W. **The Green Studio Handbook: Environmental Strategies For Schematic Design**. 3. ed. Routledge, 2018.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES (LABEEE). **NBR 15575-2021 - Desempenho térmico**. 2022. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/NBR15575-2020>. Acesso em: 24 fev.2023.

LÖHNERT, G.; DALKOWSKI, A.; SUTTER, W. **Integrated Design Process: A guideline for sustainable and solar-optimised building design.** International Energy Agency, 2003.

LUO, Y. *et al.* Towards net zero energy building: The application potential and adaptability of photovoltaic-thermoelectric-battery wall system. **Applied Energy**, v. 258, p. 114066, 2020.

MARSZAL, A. J. et al. Zero Energy Building - A review of definitions and calculation methodologies. **Energy and Buildings,** v. 43, n. 4, p. 971–979, 2011.

MATA, É. et al. A map of roadmaps for zero and low energy and carbon buildings worldwide. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 11, 2020.

MCNABB, N. **Strategies to Achieve Net-Zero Energy Homes:** A Framework for Future Guidelines. National Institute of Standards and Technology, 2013.

NDUKA, D. O. et al. Awareness, benefits and drawbacks of net zero energy building practices: Construction industry professional's perceptions. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 640, n. 1, 2019.

OHENE, E.; CHAN, A. P. C.; DARKO, A. Review of global research advances towards net-zero emissions buildings. **Energy and Buildings**, v. 266, p. 112142, 2022.

OLIVEIRA, C. T. et al. GHG reduction and energy efficiency analyses in a zero-energy solar house archetype. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, São Paulo, v. 12, p. 225–232, 2017.

PACHECO, F.; FOSSATI, M. Avaliação de Edifícios de Energia Zero Pela Nova Proposta de Etiquetagem Residencial. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. **Anais…** Porto Alegre: ANTAC, 2020

PANAGIOTIDOU, M.; FULLER, R. J. Progress in ZEBs-A review of definitions, policies and construction activity. **Energy Policy**, v. 62, p. 196–206, 2013.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (PROCEL). **PBE Edifica**. 2020. Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br/>. Acesso em: 24 fev 2023.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (PROCEL). **PROCELINFO**. 2006. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp>. Acesso em: 24 fev 2023.

SADINENI, S. B.; MADALA, S.; BOEHM, R. F. Passive building energy savings: A review of building envelope components. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 8, p. 3617–3631, 2011.

SOULEY AGBODJAN, Y. et al. Bibliometric analysis of zero energy building research, challenges and solutions. **Solar Energy**, v. 244, p. 414–433, 2022.

TORCELLINI, P. et al. **Zero Energy Buildings:** A Critical Look at the Definition. California: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2006. Disponível em: <http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39833.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2023.

TORCELLINI, P.; PLESS, S.; LEACH, M. A pathway for net-zero energy buildings: Creating a case for zero cost increase. **Building**

Research and Information, v. 43, n. 1, p. 25–33, 2015.

UNITED ENVIRONMENT PROGRAMME. **2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction SectorGlobal Status Report**. Nairobi, 2020. Disponível em: <https://globalabc.org/resources/publications/2020-global-status-report-buildings-and-construction>. Acesso em: 24 fev.2023.

UNITED STATES OF AMERICA. Executive Order 13693 of March 19, 2015 Planning: Planning for Federal Sustainability in the Next Decade. **Presidential Documents.** p.14, 19 mar. 2015.

URGE-VORSATZ, D. et al. Advances toward a net-zero global building sector. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 5, p. 227–269, 2020.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Office of Energy Efficiency & Renewable Energy**. Washington, 2022. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/office-energy-efficiency-renewable-energy>. Acesso em: 24 fev. 2023.

VINÍCIUS, M. et al. Technological innovations to assess and include the human dimension in the building-performance loop: A review. **Energy & Buildings.** v. 202, 2019.

WANG, R. et al. A comprehensive evaluation of zero energy buildings in cold regions: Actual performance and key technologies of cases from China, the US, and the European Union. **Energy**, v. 215, p. 118992, 2021.

WEI, J. et al. Hot Topics and Trends in Zero-Energy Building Research: A bibliometrical analysis based on citespace. **Buildings**, v. 13, p. 479, 2023.

WEI, W.; SKYE, H. M. Residential net-zero energy buildings: Review and perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 142, p. 110859, 2021.

WILLIAMS, J. et al. Less is more: A review of low energy standards and the urgent need for an international universal zero energy standard. **Journal of Building Engineering.** v. 6, p. 65-74, 2016.

YUAN, X. et al. The development of building energy conservation in China: A review and critical assessment from the perspective of policy and institutional system. **Sustainability**, v. 9, n. 9, p. 1–22, 2017.

ZHANG, S. *et al.* Policy recommendations for the zero energy building promotion towards carbon neutral in Asia-Pacific Region. **Energy Policy**, v. 159, n. July, p. 112661, 2021.