ANÁLISE DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES: ATUALIZAÇÃO DO ESTADO DA ARTE

Lucas Niehuns Antunes (1); Enedir Ghisi (2)
(1) Mestre, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, lucas_niehuns@hotmail.com
(2) PhD, Professor do Departamento de Engenharia Civil, enedir.ghisi@ufsc.br
Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Cx Postal 476, Florianópolis–SC, 88040-900, Tel.: (48) 3721 5184

RESUMO

A construção e operação de edifícios é responsável por aproximadamente 36% do uso final global de energia e quase 40% das emissões de dióxido de carbono relacionadas à geração de energia. Sabe-se que todas as fases de uma edificação (desde a extração das matérias primas até a disposição final) contribuem com o consumo energético. Dessa forma, estudos que levam em consideração o pré e pós- uso das edificações, por meio da análise do ciclo de vida energético (ACVE), vêm se tornando cada vez mais necessários. Este artigo tem como objetivo realizar uma revisão sistemática sobre análise energética do ciclo de vida de edificações e trazer ao leitor uma visão atualizada do estado da arte sobre o assunto, visto que os dados relacionados ao consumo energético de edificações vêm mudando significativamente ao longo dos últimos anos. De forma geral, nota-se que a energia embutida na fase de pré-uso das edificações vem desempenhando papel cada vez mais expressivo na análise do ciclo de vida, e, assim, não deve ser desprezada ao se avaliar a eficiência energética de uma edificação.

Palavras-chave: eficiência energética, avaliação do ciclo de vida, edificações.

ABSTRACT

Construction and operation of buildings are responsible for approximately 36% of the global end-use of energy and almost 40% of the carbon dioxide emissions related to power generation. All phases of a building (from the extraction of raw materials to the final disposal) contribute to energy consumption. Thus, studies that take into account the pre and post-use of buildings, through the life cycle energy analysis (LCEA), are becoming increasingly necessary. This paper aims to carry out a systematic review on life cycle energy analysis of buildings, bringing to the reader an updated view of the state of the art on the subject, since the data related to the energy consumption of buildings has been changing significantly over the past few years. In general, the embodied energy of the buildings' pre-use phase has been playing an increasingly important role in the life cycle analysis, and, therefore, should not be neglected when assessing the energy efficiency of a building.

Keywords: energy efficiency, life cycle assessment, buildings.

1. INTRODUÇÃO

O setor da construção civil tem impacto ambiental significativo e é responsável por uma proporção expressiva do consumo mundial de energia e recursos. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2017), a construção e operação de edifícios é responsável por aproximadamente 36% do uso final global de energia e quase 40% das emissões de dióxido de carbono relacionadas à geração de energia. No Brasil, o consumo energético em edificações segue a tendência mundial, respondendo por cerca de 52,0% do consumo de energia elétrica (26,1% do setor residencial e 25,8% dos setores comercial e público) (BRASIL, 2020).

Sabe-se que as edificações demandam energia em todo o seu ciclo de vida, tanto direta quanto indiretamente. Diretamente na sua construção, operação (energia operacional), manutenção e disposição final (demolição) e indiretamente através da produção dos materiais das quais são feitas (energia embutida). Artigos de revisão de décadas passadas (SARTORI; HESTNES, 2007; RAMESH ET AL., 2010) encontrados na literatura concluíam que as fases de construção, demolição e transporte de materiais podiam ser fixadas em aproximadamente 1% da necessidade energética total do ciclo de vida, ou até mesmo serem desprezadas. Entretanto, notava-se grande falta de consenso entre as metodologias adotadas pelos autores nos diferentes estudos de caso, com considerável heterogeneidade nas fases de definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação.

Devido à crescente conscientização sobre as preocupações ambientais e pressão de vários órgãos governamentais e ativistas ambientais, muitos estudos têm sido conduzidos para reduzir o consumo de energia da construção e seu impacto ambiental. Para reduzir a energia do ciclo de vida das edificações, têm-se buscado a redução da energia operacional por meio de projetos de construção aprimorados ou por meio de aparelhos mais eficientes (KARIMPOUR et al., 2014). Com isso, as edificações convencionais, que possuem, em geral, consumo energético na fase de operação entre 80% e 90% (RAMESH et al., 2010), após a adoção de estratégias para redução de consumo de energia, passam a ter maior proporção de consumo energético na fase pré-operacional. Isto se deve principalmente aos materiais intensivos em energia embutida usados nas estratégias para redução de consumo.

Com essa diminuição da parcela de consumo da fase operacional, diversos estudos vêm sendo realizados a fim de determinar a importância de cada fase do ciclo de vida no consumo energético de edificações. Dessa forma, é possível verificar os chamados *hotspots*, ou seja, processos dentro da cadeia do ciclo de vida de uma edificação que possuem maior potencial de redução de consumo energético e impactos ambientais. Nesse sentido, a análise do ciclo de vida energético (ACVE) de edificações vem sendo utilizada como ferramenta fundamental para melhor entendimento e melhor estimativa dos aspectos energéticos e dos recursos utilizados em edificações (NWODO; ANUMBA, 2019).

A ACVE é uma abordagem que considera todas as entradas de energia para uma edificação em seu ciclo de vida. São considerados os usos de energia nas seguintes fases: extração, fabricação, construção, uso e destinação final (demolição). A Figura 1 apresenta um esquema mostrando os limites do sistema de ACVE de edificações e todas as fases geralmente inclusas na análise.



Figura 1 - Limites do sistema da ACVE de edificações (Adaptado de RAMESH et al., 2010).

A ACVE é baseada na ACV (Avaliação do Ciclo de Vida) tradicional e é composta por quatro partes bem definidas dentro da análise: objetivo e escopo; inventário do ciclo de vida; avaliação de impactos; e interpretação dos resultados. A avaliação do ciclo de vida de produtos e sistemas é normatizada internacionalmente pelas ISOs 14040 e 14044 (ISO 2006a, 2006b). No Brasil, tem-se as versões nacionais, que seguem os mesmos princípios e requisitos: NBR ISO 14040 e 14044 (ABNT 2009a, 2009b). Na fase de objetivo e escopo é definida a função do sistema, horizonte de tempo, unidade funcional e limites do sistema. A fase de inventário do ciclo de vida envolve a coleta de dados para a quantificação das entradas e saídas de materiais e energia da edificação. Na fase de avaliação de impacto são computados os impactos ambientais potenciais com base no inventário.

Tendo em vista a teoria sobre ACVE e consumo energético de edificações apresentada até aqui, este artigo tem como objetivo realizar uma revisão sistemática a fim de atualizar o estado da arte sobre o assunto. É notável que os dados relacionados ao consumo energético em edificações

vêm mudando rapidamente nos últimos anos. Sendo assim,foram selecionados artigos de referência na área com base em *strings* de busca baseadas em palavras-chave relacionadas ao assunto, a fim de apresentar ao leitor uma revisão atualizada de dados e apontar as principais tecnologias e ferramentas que vêm sendo utilizadas por diversos autores para a realização de ACVEs de edificações.

2. OBJETIVO

O objetivo deste estudo é apresentar uma revisão da literatura atualizada sobre ACVE de edificações e discutir os principais desafios, estudos em andamento e possíveis soluções para resolver os problemas identificados.

3. MÉTODO

Para determinar os artigos selecionados para a revisão, foi utilizada a base de dados *Scopus* (o maior banco de dados de resumos e citações da literatura revisada por pares). A busca sistemática, realizada no dia 25/02/2021, envolveu as palavras-chave *life cycle, energy* e *building* no título dos artigos, e as palavras-chave *construct*, operat** e *"embodied energy"* em qualquer parte do texto. Os artigos que continham a palavra *rural* foram excluídos da amostra. Foram considerados somente artigos escritos em inglês das áreas de engenharia, ciência ambiental, energia e ciências sociais. Considerou-se na busca os periódicos mais relevantes (CiteScore (2019) maior ou igual a 4,0). Não houve limitação de espaço temporal. Foram excluídos artigos que focavam mais nos aspectos ambientais do que energéticos e também estudos de casos em edificações de ocupações diferenciadas, como escolas, universidades, museus, indústrias e hotéis, ou que não se classificassem na temática da revisão. Após a revisão sistemática, restaram 27 artigos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Energia embutida e energia operacional

O artigo de revisão conduzido por Ramesh et al. (2010), um dos artigos mais citados sobre ACVE de edificações (680 citações), analisou 73 estudos de caso da literatura. Os autores concluem que, em geral, a energia operacional tem a maior parte (80-90%) no uso de energia do ciclo de vida das edificações, seguida pela energia embutida (10-20%), enquanto a demolição e outras fases têm uma parcela insignificante ou pequena.

Segundo os autores, as reduções na energia do ciclo de vida das edificações em relação às convencionais são proporcionais ao grau e ao número de medidas de economia de energia utilizadas na edificação. A demanda reduzida de energia operacional e de ciclo de vida é alcançada por um pequeno aumento na energia embutida da edificação devido aos materiais intensivos em energia utilizados nas estratégias para redução de consumo. A Figura 2 ilustra a relação entre a energia consumida na fase operacional e a energia consumida durante todo o ciclo de vida das edificações. Nota-se tendência diretamente proporcional (linear) entre as duas variáveis.

Os autores constatam que há uma diferença distinta no uso de energia de edificações para países frios e tropicais e que estes devem ser analisados separadamente (embora a Figura 2 não faça essa separação). Outra conclusão é que o consumo energético do ciclo de vida de edificações autossuficientes pode ser maior do que algumas de suas versões de baixa energia (devido à energia embutida nas tecnologias de geração de energia).

Sartori e Hestnes (2007) publicaram um dos artigos pioneiros de revisão de ACVE de edificações possuindo o maior número de citações entre todos os artigos (1283 citações). Sessenta estudos de caso em nove países foram analisados (os autores também não separaram os países de acordo com os diferentes climas). Assim como no estudo de Ramesh et al. (2010), houve uma tendência diretamente proporcional entre a energia operacional e a do ciclo de vida (tanto nos estudos que consideraram a energia na forma primária ou secundária (energia de uso final)). Apesar de todas as diferenças entre os casos individuais, como materiais e técnicas de construção empregadas, tamanho e tipo de construção, clima e assim por diante, a tendência geral acabou sendo uniforme. Isso se deve ao papel dominante da energia operacional, que reduz a influência de todas as outras diferenças.

Nas edificações de baixo consumo de energia, a participação da energia embutida no total variou entre 9 e 46%. Nas edificações convencionais as participações variaram entre 2 e 38%. Embora os autores não tenham comentado, é importante ressaltar que, na maioria dos casos, não houve aumento real na energia embutida, e sim um aumento relativo (%), devido à diminuição da parcela da energia operacional.

Os autores também compararam uma casa solar autossuficiente com suas versões convencionais,

passiva e *low energy*. A casa solar autossuficiente diminuiu a demanda de energia do ciclo de vida pela metade em relação a uma versão convencional equivalente, quando a energia operacional foi expressa como energia de uso final e a vida útil assumida como sendo 50 anos. A casa passiva provou ser mais eficiente em termos de energia do que uma casa solar autossuficiente equivalente. A mesma casa passiva diminuiu a demanda de energia do ciclo de vida por um fator de três em relação a uma versão convencional equivalente, quando a energia operacional foi expressa como energia primária e a vida útil assumida como 80 anos. Grazieschi et al. (2020) também obtiveram resultado semelhante em um estudo de caso conduzido na Itália. Analisando diferentes configurações de projeto, observou-se que uma edificação *low energy* teve um desempenho melhor do que uma edificação autossuficiente em uma perspectiva de energia do ciclo de vida.

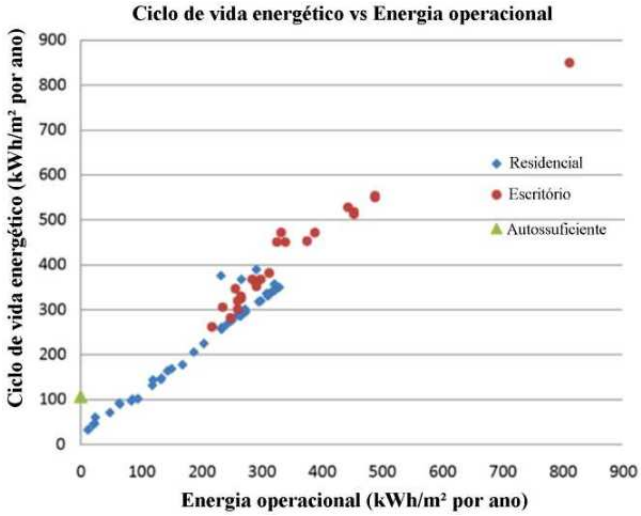


Figura 2 - Relação entre energia operacional e de ciclo de vida nos 73 estudos de caso analisados (RAMESH et al., 2010).

Yung et al. (2013) analisaram 38 trabalhos de pesquisa consistindo em 206 estudos de caso. A energia embutida média inicial em escritórios é de 10,47 GJ/m^2 e a de edificações residenciais igual a 4,10 GJ/m^2. Quando a energia embutida inicial é expressa como o número de anos de energia operacional, os resultados são 7,8 anos para escritórios e 7,5 anos para edifícios residenciais.

Wang et al. (2018) realizaram uma revisão de literatura com estudos de caso de dez arranha-céus reais em Hong Kong. Os resultados mostram que o consumo de energia do ciclo de vida é de 51,8 a 73,6 GJ/m² durante o período de estudo de 50 anos. A operação do edifício consome 78% a 89% e o restante (ou seja, de 11% a 22%) representa a energia embutida. Apesar da distinção em termos da quantidade de energia embutida entre prédios altos e seus equivalentes, nenhuma correlação clara é encontrada entre a altura do edifício e a intensidade de energia embutida.

Artigos mais recentes mostram que, como as novas edificações estão buscando diminuir a energia operacional, a energia embutida dos edifícios está ganhando mais importância. Dascalaki et al. (2021) mostram que a energia embutida inicial recorrente dos materiais de construção ao longo da vida útil de edificações residenciais pode chegar a cerca de 30%. Piccardo et al. (2020) concluíram, por meio de estudo de caso na Suécia, que a energia operacional de casas passivas pode diminuir em 63% a 78%, porém com aumento de até 21% nas outras fases da ACVE. Outros estudos também destacaram a importância da ACVE para as decisões de projeto de construções em fases iniciais (DEVI; PALANIAPPAN, 2014; TAKANO et al., 2015; AZZOUS et al., 2017).

4.2. ACVE em edificações *low energy* e a relação com certificações energéticas

Blengini e Di Carlo (2010) conduziram uma ACVE em uma casa *low energy* no norte da Itália. As estratégias utilizadas foram: contribuições solares passivas, otimização do isolamento térmico, minimização de fluxos de ar indesejados e uso de plantas (projetos) de alta eficiência. A forma da casa, a sua orientação e a utilização de barreiras solares (brises) permitiram aumentar o ganho solar no inverno e controlar o superaquecimento no verão. A necessidade anual de calor no inverno é de 10 kWh/m², enquanto a mesma unidade com isolamento padrão legal (convencional) exigiria 110 kWh/m². Notou-se grande diminuição do consumo energético na fase operacional (uso) e aumento na energia embutida (pré-uso), com diminuição de mais da metade no consumo total do ciclo de vida.

A fase de uso na casa convencional é responsável por mais de 80% do uso de energia do ciclo de vida, enquanto a contribuição da fase de uso na versão *low energy* é inferior a 50%. A necessidade de energia para aquecimento foi reduzida em uma proporção de 10:1, enquanto a energia do ciclo de vida foi reduzida apenas em 2,1:1 e a pegada de carbono em 2,2:1.

Os autores concluem que esquemas de certificação energética e ambiental, na Itália e em outros lugares, certamente se beneficiariam com a adoção de uma abordagem de ciclo de vida. Porém, deve-se ter em mente que simplificações excessivas, generalizações e confiança cega em ferramentas e bancos de dados não transparentes ainda permanecem uma ameaça real ao verdadeiro desenvolvimento sustentável.

Tendo em vista a constatação trazida por Blengini e Di Carlo (2010) de que as certificações

energética e ambiental se beneficiariam com a abordagem de ciclo de vida, o artigo elaborado por Weißenberger et al. (2014) traz um histórico da utilização de ACVE e a convergência desse tema em relação às edificações *"nearly zero-energy"* na Alemanha.

A Regulamentação Alemã de Economia de Energia considera apenas a utilização do consumo de energia primária na fase operacional e, portanto, desconsidera a energia embutida. A maioria dos regulamentos referem-se a "*net-zero*", concentrando-se apenas na demanda de energia em uso e ignorando a energia embutida.

Com base na revisão da literatura feita pelos autores, observou-se que, de forma geral, o consumo de matérias-primas para a produção e a destinação das edificações é desconsiderado ou ignorado. Ou seja, a ACVE não é levada em consideração, o que pode "maquiar" os resultados obtidos por edificações *"nearly zero-energy"* que possuam elevada energia embutida. Outro ponto destacado é a influência da consideração do ciclo de vida nos impactos ambientais de uma edificação. Nota-se que, quanto antes se considerar a ACVE nas etapas de projeto, maior é o potencial de interferência e, consequentemente, de redução nos impactos ambientais.

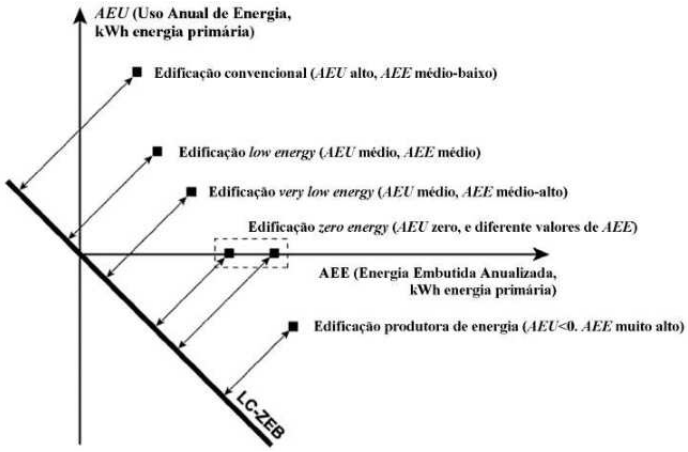


Figura 3 - Diferentes classificações de edificações com relação ao seu consumo energético (HERNANDEZ; KENNY, 2010).

Seguindo a relação entre ACVE e edificações "*zero-energy"*, Hernandez e Kenny (2010) propuseram uma metodologia para a reclassificação de edificações *"zero-energy"* de um ponto de vista da ACVE. Por convenção dos autores, o ciclo de vida da edificação com energia zero (*LC-ZEB*) é definido como: "a energia embutida mais a energia primária de operação ao longo da vida da edificação é igual ou menor que a energia produzida por seus sistemas de energia renovável". Os autores não levam em consideração as fases de manutenção e final de vida, o que pode ser considerado uma limitação da metodologia proposta.

A Figura 3 ilustra as diferentes classificações de edificações com relação ao seu consumo energético. Edificações convencionais costumam ter elevado consumo operacional e à medida que são classificadas como *low energy*, *very low energy*, *zero energy* e, por fim, *LC-zero-energy*, diminui-se o consumo operacional e se aumenta a energia embutida da edificação. Os autores propõem também o uso de um fator chamado *Net Energy Ratio* (*NER*) para auxiliar projetistas, de modo a facilitar a escolha de estratégias de eficiência energética do ponto de vista da ACVE. A *NER* é calculada por meio da Equação (1).

$$NER = (AEU_1 - AEU_2)/(AEE_2 - AEE_1) \quad (1)$$

em que: *NER* é a *Net Energy Ratio*; AEU_1 é o consumo energético operacional da edificação convencional; AEU_2 é o consumo energético operacional da edificação após a implantação da estratégia; AEE_2 é a energia embutida da edificação considerando a inclusão da estratégia; AEE_1 é a energia embutida da edificação convencional.

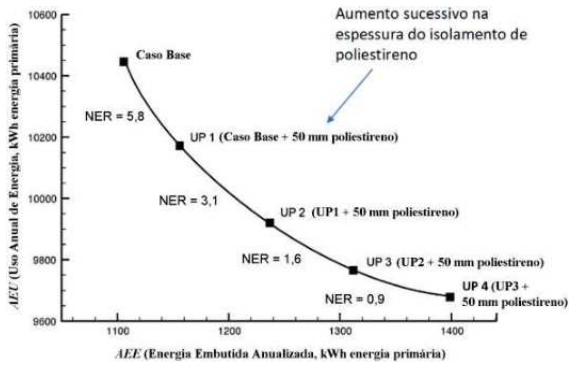


Figura 4 – Valores de *NER* (HERNANDEZ; KENNY, 2010).

Por meio da Figura 4, os autores exemplificam como utilizar a *NER*. No exemplo, é considerado o aumento sucessivo de 50 mm de poliestireno na espessura do isolamento da edificação, a fim de se obter melhor eficiência energética. Nota-se que, a cada aumento, a energia embutida aumenta de forma constante, enquanto a diminuição no consumo operacional também aumenta, porém de forma decrescente. Dessa forma, a *NER* da estratégia diminui a cada aumento da espessura, fazendo com que a eficiência da estratégia seja cada vez menor. Apesar de ser uma equação bastante trivial, a *NER* pode auxiliar

projetistas na escolha de estratégias visando a eficiência energética do ponto de vista da ACVE.

Ramesh et al. (2012) realizaram um estudo de ACVE em diferentes tipos de edifícios residenciais (um andar, dois andares, duplex e vários andares) na Índia. Dez casas com técnicas de economia de energia (isolamento térmico na parede e no telhado, vidro duplo para janelas) foram analisadas. Um desses edifícios foi examinado para avaliar o desempenho da ACVE com geração de energia no local. A ACVE dos edifícios variou de 240 a 380 kWh/m^2/ano dependendo do envelope e das condições climáticas. Economias de energia no ciclo de vida de cerca de 5% a 30% são observadas com isolamento térmico na parede e telhado, juntamente com vidro duplo para janelas. Verificou-se que a edificação com energia operacional líquida zero pode ser alcançada pela geração de energia no local a partir de painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas. O consumo energético do ciclo de vida do edifício com energia operacional líquida zero foi avaliado em 71,24 kWh/m^2/ano.

Paleari et al. (2016) compararam os impactos de energia operacional e de energia de pré-uso e manutenção realizando uma avaliação do ciclo de vida em uma edificação *nearly zero- energy* (*NZEB*), um complexo residencial com 61 apartamentos em quatro blocos, situado perto de Milão, na Itália. Foram consideradas todas as fases do ciclo de vida, incluindo produção, transporte, atividades do canteiro de obras, uso e manutenção; o inventário de materiais foi preenchido coletando dados de faturas pagas, relatórios de obra, desenhos de construção e fichas técnicas de produtos. Para tornar os resultados da avaliação comparáveis, foi definida uma unidade funcional de 1 m² de área útil de piso em 1 ano, em uma vida útil de 100 anos. Os resultados destacam o importante papel das fases de pré-uso e manutenção na vida da edificação: a fase de pré-uso responde por 56%, enquanto a energia operacional é de apenas 31% do total. Por esse motivo, se a avaliação ambiental do estudo de caso fosse reduzida ao consumo operacional, apenas um terço dos impactos seria considerado.

Tumminia et al. (2018) exploraram o desempenho energético e os impactos ambientais de uma construção modular pré-fabricada localizada em Messina (Itália) por meio da ACV. O edifício utiliza energias renováveis. Os resultados mostram que a edificação causa a emissão de 1,5 t de CO_2eq/m^2 e consome 29,2 GJ/m^2 de energia primária durante seu ciclo de vida. A construção atinge o selo de edificação *Net Zero Energy*, mesmo que tenha impactos ambientais relevantes na fase de produção de materiais (72% em média do total de impactos enquanto a fase de uso atinge a média de 23%). Tais resultados mostram a importância de estudos de ACVE na real análise de eficiência energética de edificações. Crawford et al. (2016), Moran et al. (2017) e Ingrao et al. (2018) também publicaram estudos envolvendo edificações *Net Zero Energy* e ACVE. Todos os autores concluem que a ACVE é ferramenta fundamental para certificações e classificações de eficiência energética de edificações. Ressalta-se que, logicamente, a energia embutida de edificações NZEB assume maior percentual do contexto energético, considerando a baixa ou nula energia operacional ao longo da vida útil da edificação.

4.3. Diferenças entre climas frios e quentes na realização da ACVE

As seções anteriores mostraram dados e estudos de caso de edificações localizadas em diferentes climas. Os artigos de revisão existentes na literatura correlacionam diversos estudos de caso sem distinção entre os climas de cada edificação. Percebe-se uma grande variedade nas metodologias utilizadas e resultados obtidos. Nesse sentido, o estudo realizado por Karimpouret al. (2014) é importante, pois avalia as edificações localizadas em diferentes climas separadas por um parâmetro que indica a quantidade de aquecimento e resfriamento necessária em um local, identificando a severidade do clima. O parâmetro utilizado é o HDD+CDD (*Heating Degree Days + Cooling Degree Days*). O estudo conclui que, de forma geral, a energia embutida é mais dominante em climas mais amenos (menores valores de HDD+CDD) do que em climas mais severos (maiores valores de HDD+CDD). A Figura 5 ilustra essa constatação.

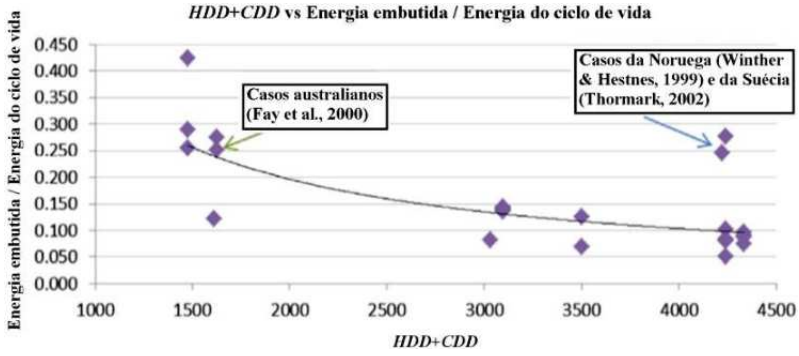


Figura 5 - Razão entre a energia embutida e energia total do ciclo de vida de acordo com o parâmetro *HDD+CDD* (KARIMPOUR et al., 2014).

O artigo produzido por Cellura et al. (2014), por sua vez, traz na introdução um gráfico com dados sobre energia embutida e energia operacional de edificações separando estas em climas quente e frio, fato não observado na maioria dos artigos da literatura até a data em questão (2014). A Figura 6 apresenta o gráfico citado. Nota-se que a energia embutida das edificações localizadas em clima frio variou de 10 a 55 kWh/m².ano, enquanto edificações localizadas em zonas de clima temperado e quente apresentam valores de 30 a cerca de 70 kWh/m².ano.

Os autores realizaram um estudo de caso em uma residência (*Leaf House*) localizada na Itália (clima frio). A edificação possui orientação Sul e foi projetada para ser uma *NetZEB*, possuindo geração de energia fotovoltaica, placas para aquecimento solar, isolamento térmico, entre outras estratégias. O estudo foi realizado a fim de determinar a eficiência energética da edificação considerando a ACVE. A vida útil considerada foi de 70 anos.

Primeiramente, o balanço energético da edificação foi avaliado em termos de energia secundária (uso final). O déficit de energia foi apenas 0,91 MWh/ano. Após a conversão de energia secundária para energia primária utilizando alguns fatores de conversão (fotovoltaica 1,07; rede de energia elétrica italiana 2,18), o déficit anual passou a ser de 31 MWh/ano.

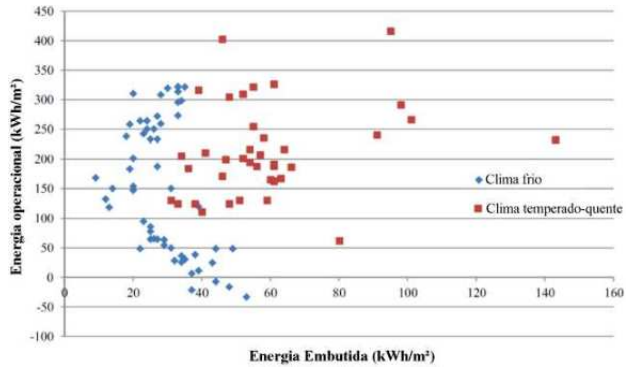


Figura 6 - Energia embutida e energia operacional para edificações localizadas em climas quentes e frios (CELLURA et al., 2014).

O último passo da análise foi verificar o déficit de energia ao se considerar as fases de pré e pós-uso (energia embutida e disposição final). Devido à energia embutida nas estratégias utilizadas (placas solares, geradores fotovoltaicos, isolantes térmicos), o déficit de energia passou de 31 para 97 MWh/ano. Dessa forma, fica claro que a ACVE deve se tornar prática comum nas avaliações de eficiência energética, visto que nas definições comuns de *NetZEB*, a perspectiva do ciclo de vida não é incluída nos balanços de energia, negligenciando assim a incidência do aumento de energia embutida na economia de energia operacional.

Alla et al. (2020) realizaram retrofit em edificações residenciais em dez cidades italianas a fim de diminuir o consumo de energia na fase de operação. O estudo mostrou uma profunda dependência da zona climática. O *payback* energético para as cidades do norte da Itália foi de cerca de 3 anos, contra 84 anos para a cidade de Palermo, no sul. Zhu et al. (2018) compararam o consumo energético do ciclo de vida de edificações pré-fabricadas e convencionais. Os autores concluíram que há evidências de que edificações pré-fabricadas possuem consumo menor durante o ciclo de vida, particularmente para regiões com um clima relativamente mais frio.

Sartori e Calmon (2019) realizaram um estudo de caso brasileiro em duas edificações residenciais multifamiliares localizadas em clima quente (Vitória/ES). A análise foi realizada para as etapas pré-operacional e operacional. As etiquetas de eficiência da envoltória das edificações foram classificadas de acordo com o método de simulação especificado pelo PBE Edifica (RTQ-R).

As seguintes estratégias foram selecionadas para as edificações:

- Substituição do telhado existente por telhado verde;
- Instalação de filme refletivo nas janelas e portas de vidro;
- Brise para sombreamento das aberturas;

• Absortância otimizada das superfícies opacas da envoltória (paredes e teto);
• Instalação de fachada ventilada.

Os autores utilizaram uma ferramenta BIM (*Building Information Modeling*) e o *software EnergyPlus* para auxiliar nas análises de consumo energético e quantificação de materiais. Para a edificação 1, os resultados das estratégias não foram satisfatórios, tendo sido obtida redução de 2,9% no consumo operacional, porém aumento de 2,4% na energia total do ciclo de vida. Na edificação 2, por sua vez, as estratégias surtiram efeitos positivos, obtendo-se redução de 14,7% no consumo operacional. Entretanto, devido ao aumento na energia embutida, a redução na energia total do ciclo de vida foi de apenas 6,4%. O *payback* do investimento para as estratégias propostas é de 10,4 anos. Mais uma vez, percebe-se que a ACVE foi ferramenta fundamental para verificar a verdadeira eficiência das estratégias propostas.

4.4. Integração entre ferramentas BIM e estudos de ACVE

Najjar et al. (2019) realizaram um estudo sobre a integração de ferramentas BIM com a ACVE a fim de otimizar as análises nas fases de pré-projeto e gerar edificações mais eficientes energeticamente. O estudo de caso foi realizado em uma edificação residencial multifamiliar no Rio de Janeiro. A ACVE considerou todo o ciclo de vida (desconsiderando apenas as atividades envolvidas na fase de construção). A vida útil da edificação foi considerada igual a 30 anos.

A ferramenta Tally, vinculada ao *software* Revit, foi utilizada. Tal ferramenta é considerada uma configuração inteligente que avalia os impactos ambientais dos materiais de construção e auxilia na otimização da vida útil das edificações. A ferramenta Tally vincula o conjunto de dados do ciclo de vida de materiais de construção, baseado no GaBi 6 usando o banco de dados GaBi, com os elementos do BIM de forma a avaliar os impactos ambientais dos materiais de construção.

A ferramenta *Autodesk Green Building Studio* também foi utilizada, juntamente com o programa DOE2, que é um mecanismo de simulação comprovado e validado para fornecer resultados relacionados ao uso de energia, uso de água e emissões de carbono. Os resultados neste nível da análise foram avaliados sob o padrão ANSI/ASHRAE 140. As estratégias para melhoria na eficiência energética propostas na edificação foram o aumento na espessura do isolamento de paredes, pisos e tetos, e instalação de portas e janelas com maior eficiência energética.

Para cada estratégia adotada, tem-se diferentes dados referentes ao consumo energético do ciclo de vida simulados pela ferramenta Tally. As mudanças nas paredes externas diminuem o uso de energia no ciclo de vida em cerca de 43%. Os pisos e tetos tiveram apenas um leve impacto na melhoria do uso da energia no ciclo de vida, em cerca de 2%. As janelas “mais eficientes” diminuíram o uso de energia no ciclo de vida em cerca de 16%. As portas “mais eficientes” tiveram apenas um leve impacto na melhoria do uso de energia do ciclo de vida, em cerca de 1%. Por fim, considerando todas as estratégias juntas, obteve-se diminuição do uso de energia no ciclo de vida em cerca de 57%. Notou-se que, apesar do aumento na energia embutida (de 36% para 56%, e aumento de massa de 3105 ton para 4265 ton), houve redução considerável na energia do ciclo de vida.

O estudo é importante para mostrar que novas ferramentas estão disponíveis para auxiliar os estudos de eficiência energética e ACVE, trazendo agilidade para as análises. Entretanto, deve-se evitar simplificações excessivas e generalizações. Sobretudo, os projetistas devem sempre analisar os dados armazenados nos bancos de dados utilizados, a fim de verificar a sua veracidade perante os materiais escolhidos para a construção.

4.5. Limitações e desafios da ACVE de edificações

Optis e Wild (2010) revisaram vinte artigos de periódicos que descrevem estudos de ACVE de edificações quanto à sua adesão aos principais requisitos da ISO 14041. Os resultados constataram que a maioria dos artigos tem documentação inadequada. Os artigos não estão sujeitos aos requisitos da ISO 14041 e, devido a limitações no tamanho do artigo, algumas documentações são omitidas. Segundo os autores, uma vez que os artigos de periódicos fornecem muitos dos dados publicamente disponíveis sobre a energia do ciclo de vida dos edifícios, um grau mínimo de documentação deve ser fornecido para permitir a comparação entre os resultados da ACVE.

Nwodo e Anumba (2019) publicaram um artigo de revisão mais atual sobre ACVE de edificações. O principal objetivo do artigo era discutir os principais desafios da ACVE de edificações, relatar os estudos em andamento e apontar possíveis soluções para resolver os problemas identificados.

De acordo com os autores, existe falta de consenso metodológico nas definições de objetivo e escopo, dificuldade na comparação dos resultados da ACV, necessidade de transparência na definição dos limites do sistema e das fontes de dados e há também falta de abrangência dos indicadores no âmbito das categorias de impacto resultantes de simplificações excessivas. Constata-se também subjetividade nas ponderações, que é introduzida aplicando ponderações para avaliar a importância relativa dos diferentes impactos ambientais para a construção da interpretação dos resultados da ACV. Uma abordagem mais científica é necessária para eliminar a subjetividade na caracterização durante a fase de avaliação do impacto do ciclo de vida.

Outras limitações encontradas se referem aos diferentes valores de vida útil da edificação adotados pelos autores, o que se confirma com os estudos revisados neste artigo (foram verificados valores de 30, 50, 70 e 75 anos nos estudos analisados). Outra conclusão é que há diferença nas análises que consideram uso de energia na forma primária e secundária. Alguns estudos não deixam claro qual está sendo considerada. Além disso, existem incertezas nos fatores de conversão utilizados.

5. CONCLUSÃO

Por meio da revisão dos artigos selecionados, observou-se que os dados publicados nos artigos de revisão vêm sofrendo modificações de forma cada vez mais rápida. A eficiência energética em edificações é tópico cada vez mais relevante e discutido, visto que estas consomem grande parcela da energia global. Dessa forma, com a redução na energia operacional e aumento na parcela da energia embutida e de outras fases das edificações, a ACVE torna-se ferramenta cada vez mais essencial ao se avaliar a eficiência energética de edificações.

Tendo em vista que o número de estudos envolvendo a avaliação do ciclo de vida tem aumentado extensivamente nos últimos anos, a ACVE tem sido aplicada para avaliar o desempenho energético de edificações em todas as fases: construção, uso, manutenção e descarte, avaliando, além do consumo energético, a quantidade de emissão de gases que provocam o efeito estufa, assim como o consumo de recursos naturais. Embora os estudos encontrados na literatura apresentem uma estimativa do consumo energético e sustentabilidade das estratégias de eficiência energética, ainda é notável a grande heterogeneidade nos métodos de avaliação e resultados encontrados.

Por isso, torna-se necessária a homogeneização das fases de definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação, definindo-se fases e processos da avaliação e quais são os dados mínimos a serem considerados na modelagem da ACVE. Dessa forma, evita-se a heterogeneidade nas unidades funcionais e demais componentes, trazendo resultados mais consistentes e que conduzam a uma real avaliação dos impactos causados pelo consumo energético das edificações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLA, S.; BIANCO, V.; TAGLIAFICO, L. A.; SCARPA, F. Life-cycle approach to the estimation of energy efficiency measures in the buildings sector. **Applied Energy**, 264, 114745, 2020.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. 21 p. Rio de Janeiro, 2009a

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. 46 p. Rio de Janeiro, 2009b.

AZZOUZ, A.; BORCHERS, M.; MOREIRA, J.; MAYROGIANNI, A. Life cycle assessment of energy conservation measures during early stage office building design: A case study in London, UK. **Energy and Buildings**, 139, pp. 547-568, 2017.

BLENGINI, G. A.; DI CARLO, T. The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings. **Energy and Buildings**, 42, 869–880, 2010.

BRASIL, **Balanço Energético Nacional 2020**: Relatório Síntese – Ano base 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-521/Relato%CC%81rio%20Si%CC%81ntese%20BEN%202020-ab%202019_Final.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2021.

CELLURA, M.; GUARINO, F.; LONGO, S.; MISTRETTA, M. Energy life-cycle approach in Net zero energy buildings balance: Operation and embodied energy of an Italian case study. **Energy and Buildings**, 72, 371–381, 2014.

CRAWFORD, R. H.; BARTAK, E. L.; STEPHAN, A.; JENSEN, C. A. Evaluating the life cycle energy benefits of energy efficiency regulations for buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 63, pp. 435-451, 2016.

DASCALAKI, E. G.; ARGIROPOULOU, P.; BALARAS, C. A.; DROUTSA, K. G.; KONTOYIANNIDIS, S. Analysis

of the embodied energy of construction materials in the life cycle assessment of Hellenic residential buildings. **Energy and Buildings**, 232, 110651, 2021.

DEVI, L.; PALANIAPPAN, S. A case study on life cycle energy use of residential building in Southern India. **Energy and Buildings**, 80, pp. 247-259, 2014.

GRAZIESCHI, G.; GORI, P.; LOMBARDI, L.; ASDRUBALI, F. Life cycle energy minimization of autonomous buildings. **Journal of Building Engineering**, 30, 101229, 2020.

HERNANDEZ, P.; KENNY, P. From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB). **Energy and Buildings**, 42, 815–821, 2010.

IEA, **World energy statistics and balances**, (2017). Disponível em: <https://www.iea.org/topics/energyefficiency/buildings>. Acesso em: 01 mar. 2021.

INGRAO, C.; MESSINEO, A.; BELTRANO, R.; YIGITCANLAR, T.; IOPOLLO, G. How can life cycle thinking support sustainability of buildings? Investigating life cycle assessment applications for energy efficiency and environmental performance. **Journal of Cleaner Production**, 201, pp. 556-569, 2018.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040:** Environmental Management — Life Cycle Assessment — Principles and Framework. 2006a.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14044:** Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. 2006b.

KARIMPOUR, M.; BELUSKO, M.; XING, K.; BRUNO, F. Minimising the life cycle energy of buildings: Review and analysis. **Building and Environment**, 73, 106-114, 2014.

MORAN, P.; GOGGINS, J.; HAJDUKIEWICZ, M. Super-insulate or use renewable technology? Life cycle cost, energy and global warming potential analysis of nearly zero energy buildings (NZEB) in a temperate oceanic climate. **Energy and Buildings**, 139, pp. 590-607, 2017.

NAJJAR, M.; FIGUEIREDO, K.; HAMMAD, A. W. A.; HADDAD, A. Integrated optimization with building information modeling and life cycle assessment for generating energy efficient buildings. **Applied Energy** 250, 1366–1382, 2019.

NWODO, M. N.; ANUMBA, C. J. 2019. A review of life cycle assessment of buildings using a systematic approach. **Building and Environment** 162, 106290.

OPTIS, M.; WILD, P. Inadequate documentation in published life cycle energy reports on buildings. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 15 (7), pp. 644-651, 2010.

PALEARI, M.; LAYAGNA, M.; CAMPIOLI, A. The assessment of the relevance of building components and life phases for the environmental profile of nearly zero-energy buildings: life cycle assessment of a multifamily building in Italy. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 21 (12), pp. 1667-1690, 2016.

PICCARDO, C.; DODOO, A.; GUSTAVSSON, L.; TETTEY, U. Y. A. Retrofitting with different building materials: Life-cycle primary energy implications. **Energy**, 192, 116648, 2020.

RAMESH, T.; PRAKASH, R.; SHUKLA, K. K. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. **Energy and Buildings**, 42, 1592–1600, 2010.

RAMESH, T.; PRAKASH, R.; SHUKLA, K. K. Life cycle approach in evaluating energy performance of residential buildings in Indian context. **Energy and Buildings**, 54, pp. 259-265, 2012.

SARTORI, I.; HESTNES, A. G. Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. **Energy and Buildings** 39, 249–257, 2007.

SARTORI, T.; CALMON, J. L. Analysis of the impacts of retrofit actions on the life cycle energy consumption of typical neighbourhood dwellings. **Journal of Building Engineering**, 21, 158–172, 2019.

TAKANO, A.; PAL, S. K.; KUITTINEN, M.; ALANNE, K.; HUGHES, M.; WINTER, S. The effect of material selection on life cycle energy balance: A case study on a hypothetical building model in Finland. **Building and Environment**, 89, pp. 192-202, 2015.

TUMMINIA, G.; GUARINO, F.; LONGO, S.; FERRARO, M.; CELLURA, M.; ANTONUCCI, V. Life cycle energy performances and environmental impacts of a prefabricated building module. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 92, pp. 272-283, 2018.

WANG, J.; YU, C.; PAN, W. Life cycle energy of high-rise office buildings in Hong Kong. **Energy and Buildings**, 167, pp. 152-164, 2018.

WEIßENBERGER, M.; JENSCH, W.; LANG, W. The convergence of life cycle assessment and nearly zero-energy buildings: The case of Germany. **Energy and Buildings**, 76, 551–557, 2014.

YUNG, P.; LAM, K. C.; YU, C. An audit of life cycle energy analyses of buildings. **Habitat International**, 39, pp. 43-54, 2013.

ZHU, H.; HONG, J.; SHEN, G. Q.; MAO, C.; ZHANG, H.; LI, Z. The exploration of the life-cycle energy saving potential for using prefabrication in residential buildings in China. **Energy and Buildings**, 166, pp. 561-570, 2018.