

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Candi Citadini de Oliveira

**UMA REVISÃO SOBRE ESTRATÉGIAS DE *RETROFIT* EM EDIFICAÇÕES PARA
MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E DA SUSTENTABILIDADE**

Florianópolis

2021

Candi Citadini de Oliveira

**UMA REVISÃO SOBRE ESTRATÉGIAS DE *RETROFIT* EM EDIFICAÇÕES PARA
MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E DA SUSTENTABILIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheira Civil.
Orientador: Prof. Enedir Ghisi, PhD.

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra

Oliveira, Candi Citadini de
Uma revisão sobre estratégias de retrofit em edificações
para melhoria da eficiência energética e da
sustentabilidade / Candi Citadini de Oliveira ;
orientador, EneDir Ghisi, 2021.
121 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Revisão sistemática. 3.
Estratégias de retrofit. 4. Edificações. 5. Eficiência
energética. I. Ghisi, EneDir. II. Universidade Federal de
Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Candi Citadini de Oliveira

**UMA REVISÃO SOBRE ESTRATÉGIAS DE *RETROFIT* EM EDIFICAÇÕES PARA
MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E DA SUSTENTABILIDADE**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheira Civil e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 03 de maio de 2021.

Banca Examinadora:

Prof. Enedir Ghisi, PhD.

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof^a. Liseane Padilha Thives, Dr^a.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Ricardo Forgiarini Rupp, Dr.

Technical University of Denmark

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Enedir Ghisi, por toda sua orientação e incentivo fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho; e por sua disponibilidade e ensinamentos compartilhados ao longo da minha graduação.

À Prof^a. Liseane Padilha Thives e ao Prof. Ricardo Forgiarini Rupp por aceitarem participar da banca de defesa do meu trabalho e por suas contribuições para o aprimoramento do mesmo.

Aos meus pais, Luciana Citadini de Oliveira e Juarez Inácio de Oliveira, por toda motivação, suporte e amor. À toda minha família, pelo apoio e carinho incondicionais.

A todos os amigos que estiveram presentes nesta jornada, por sua amizade, inspiração e momentos especiais. Agradeço a todos com quem tive a oportunidade de compartilhar experiências pessoais e profissionais que enriqueceram minha trajetória até aqui.

A todos os colegas do LabEEE pelo apoio e troca de experiências sobre a elaboração de pesquisas e trabalhos acadêmicos.

Aos professores da graduação e profissionais que marcaram meu caminho na Engenharia Civil e evidenciaram a sua importância para melhorar a sociedade em que vivemos. Meu sincero agradecimento a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a minha formação.

À UFSC pelas oportunidades e conhecimentos adquiridos ao longo da graduação.

A todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a minha trajetória pessoal e profissional.

RESUMO

Diante do elevado consumo de energia e emissão de gases de efeito estufa associados a edificações ao redor do mundo, é notável a importância de estratégias sustentáveis que proporcionem aproveitamento consciente dos recursos naturais e condições adequadas dos ambientes internos para os usuários. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi apresentar um panorama geral das estratégias de *retrofit* em edificações direcionadas à melhoria da eficiência energética e da sustentabilidade, a partir de uma revisão sistemática de literatura envolvendo estudos realizados em diversos países nos últimos cinco anos. Embora existam ainda diversos desafios e limitações que podem dificultar a realização de *retrofits* em determinadas regiões e tipos de edificação, destacam-se inúmeros benefícios quanto à redução do consumo energético, diminuição das emissões de poluentes e melhoria da qualidade do ambiente interno para os ocupantes. As estratégias de *retrofit* ativas estão relacionadas aos sistemas da edificação e ao uso de fontes renováveis de energia e geralmente resultam em redução significativa do consumo energético e da emissão de gases de efeito estufa, porém comumente apresentam elevado custo de instalação. Por outro lado, as estratégias passivas aproveitam recursos naturais de forma mais eficiente e geralmente com menor custo, sendo as principais: isolamento térmico do envelope, uso de materiais de mudança de fase, iluminação natural, ventilação natural, fachada ventilada, fachada verde, cobertura verde, cobertura fria e uso racional de água. O processo de análise e seleção das estratégias de *retrofit* envolve a utilização de métodos e programas computacionais para definir o melhor conjunto de alternativas para uma ou mais edificações. Destaca-se que a modelagem e simulação energética de edificações são fundamentais para avaliar o desempenho energético das edificações e a qualidade do ambiente interno, auxiliando a tomada de decisão por pesquisadores e profissionais. Diversos estudos ressaltam os benefícios de análises multidimensionais e consideração de escala regional para *retrofits*, a fim de melhorar a eficiência energética de forma completa e contribuir para o desenvolvimento sustentável da região de estudo. Este trabalho comparou e discutiu os resultados relevantes dos estudos de caso, que compreenderam 73,3% dos artigos selecionados para a revisão sistemática. Em todas as tipologias de edificação e climas dos locais de estudo, os principais aspectos considerados foram o ambiental e o econômico; e as estratégias de *retrofit* mais abordadas foram isolamento térmico do envelope, melhoria dos sistemas de climatização e iluminação e uso de fontes renováveis de energia – representando aproximadamente 70% do total. Verificou-se também significativa frequência de otimização da iluminação natural, ventilação natural e fachada ventilada em edificações não-residenciais ou outras tipologias, principalmente nos climas árido, temperado e mediterrâneo. Por fim, foram apresentadas recomendações para estudos futuros, como a consideração de particularidades dos distintos tipos de edificações, avaliação de diferentes cenários econômicos e investigação dos efeitos do *retrofit* sobre a qualidade do ambiente interno para os usuários. Além disso, ressalta-se a importância de haver políticas de suporte técnico e incentivo financeiro para realização de *retrofits* e conscientização dos usuários.

Palavras-chave: Revisão sistemática. Estratégias de *retrofit*. Edificações. Eficiência energética. Sustentabilidade.

ABSTRACT

In view of the high energy consumption and greenhouse gas emissions associated with buildings worldwide, it is noteworthy the importance of sustainable strategies that provide conscious use of natural resources and suitable conditions of indoor environments for users. In this sense, the objective of this work was to present an overview of retrofit strategies in buildings aimed at improving energy efficiency and sustainability, based on a systematic literature review involving studies carried out in several countries in the last five years. Although there are still several challenges and limitations that can make it difficult to carry out retrofits in certain regions and types of buildings, there are numerous benefits in terms of reducing energy consumption, decreasing pollutant emissions and improving the indoor environmental quality for the occupants. Active retrofit strategies are related to building systems and the use of renewable energy sources and generally result in a significant reduction in energy consumption and greenhouse gas emissions, although they usually have a high implementation cost. On the other hand, passive strategies use natural resources more efficiently and generally at a lower cost, the main ones being: building envelope insulation, use of phase change materials, natural lighting, natural ventilation and ventilated facade, green facade and green roof, and rational use of water. The process of analysis and selection of retrofit strategies involves using methods and software to define the best set of alternatives for one or more buildings. It is noteworthy that modelling and energy simulation of buildings are fundamental to assess buildings' energy performance and indoor environmental quality, helping decision-making by researchers and professionals. Several studies highlight the benefits of multidimensional analyses and consideration of regional scale for retrofits in order to improve energy efficiency completely and contribute to the study region's sustainable development. This work compared and discussed the case studies' relevant results, which comprised 73.3% of the papers selected for the systematic review. In all types of building and climates of the study regions, the main aspects considered were environmental and economic; and the most discussed retrofit strategies were building envelope insulation, improving the climatisation and lighting systems and using renewable energy sources – representing approximately 70% of the total. There was also a significant frequency of optimization of natural lighting, natural ventilation and ventilated facade in non-residential buildings or other types, mainly in arid, temperate, and Mediterranean climates. Finally, recommendations for future studies were presented, such as considering the particularities of the different types of buildings, evaluating distinct economic scenarios and investigating the effects of retrofit on the indoor environmental quality for users. In addition, the importance of having technical support and financial incentive policies to carry out retrofits and awareness of users is emphasized.

Keywords: Systematic review. Retrofit strategies. Buildings. Energy efficiency. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma do processo de revisão sistemática de literatura	20
Figura 2 – Número de artigos de acordo com o ano de publicação	23
Figura 3 – Número de artigos de acordo com o país do estudo	24
Figura 4 – Número de artigos de acordo com a região do estudo	24
Figura 5 – Distribuição das edificações dos estudos de caso de acordo com a categoria	26
Figura 6 – Melhoria no sistema de climatização a partir do isolamento dos dutos de ar	38
Figura 7 – Detalhe dos painéis fotovoltaicos integrados à edificação.....	41
Figura 8 – Painéis fotovoltaicos usados como dispositivos de sombreamento solar	41
Figura 9 – Instalação de painéis fotovoltaicos e coletores solares sobre a cobertura de uma edificação.....	43
Figura 10 – Isolamento térmico das paredes de uma edificação	45
Figura 11 – Substituição das janelas de uma edificação	46
Figura 12 – Manta de material de mudança de fase	48
Figura 13 – Aplicação de material de mudança de fase para isolamento das paredes de uma edificação.....	48
Figura 14 – Otimização da iluminação natural a partir do <i>design</i> adequado da edificação	50
Figura 15 – Sistema de sombreamento de uma edificação.....	51
Figura 16 – Sistema de fachada verde	52
Figura 17 – Sistema de cobertura verde	53
Figura 18 – Sistema de cobertura fria.....	54
Figura 19 – Modelagem da edificação a ser utilizada para simulação energética.....	58
Figura 20 – Número de artigos de acordo com o programa computacional utilizado.....	59
Figura 21 – Frequência de considerações dos aspectos abordados nos estudos de caso realizados em edificações residenciais	61
Figura 22 – Frequência de considerações das estratégias de <i>retrofit</i> abordadas nos estudos de caso realizados em edificações residenciais	61
Figura 23 – Distribuição dos aspectos considerados nos estudos de caso realizados em edificações residenciais, de acordo com o clima do local de estudo	62
Figura 24 – Distribuição das estratégias de <i>retrofit</i> consideradas nos estudos de caso realizados em edificações residenciais, de acordo com o clima do local de estudo.....	62
Figura 25 – Frequência de considerações dos aspectos abordados nos estudos de caso realizados em edificações não-residenciais	71

Figura 26 – Frequência de considerações das estratégias de <i>retrofit</i> abordadas nos estudos de caso realizados em edificações não-residenciais	71
Figura 27 – Distribuição dos aspectos considerados nos estudos de caso realizados em edificações não-residenciais, de acordo com o clima do local de estudo.....	72
Figura 28 – Distribuição das estratégias de <i>retrofit</i> consideradas nos estudos de caso realizados em edificações não-residenciais, de acordo com o clima do local de estudo.....	72
Figura 29 – Frequência de considerações dos aspectos abordados nos estudos de caso realizados em outras tipologias de edificação	82
Figura 30 – Frequência de considerações das estratégias de <i>retrofit</i> abordadas nos estudos de caso realizados em outras tipologias de edificação	83
Figura 31– Distribuição dos aspectos considerados nos estudos de caso realizados em outras tipologias de edificação, de acordo com o clima do local de estudo.....	83
Figura 32 – Distribuição das estratégias de <i>retrofit</i> consideradas nos estudos de caso realizados em outras tipologias de edificação, de acordo com o clima do local de estudo.....	84

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais limitações frente à implementação de <i>retrofits</i> em edificações.....	32
Quadro 2 – Principais vantagens e desvantagens das estratégias de <i>retrofit</i> abordadas nos artigos analisados.....	35
Quadro 3 – Principais considerações para estudos futuros sobre <i>retrofit</i>	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Clima dos locais de estudo, conforme a classificação climática de Köppen-Geiger	25
Tabela 2 – Caracterização dos estudos de caso abordando estratégias de <i>retrofit</i> em edificações	111

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
BAPV	<i>Building Attached Photovoltaic</i>
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
BIPV	<i>Building Integrated Photovoltaic</i>
BIPVT	<i>Building Integrated Photovoltaic Thermal Systems</i>
GSHP	<i>Ground Source Heat Pump</i>
HVAC	<i>Heating, Ventilating and Air-Conditioning</i>
LCA	<i>Life Cycle Analysis</i>
MCDA	<i>Multi-Criteria Decision Analysis</i>
MVHR	<i>Mechanical Ventilation with Heat Recovery</i>
NZEB	<i>Net Zero Energy Building</i>
PCM	<i>Phase Change Materials</i>
WWR	<i>Window-to-Wall Ratio</i>
ZEB	<i>Zero Energy Building</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Justificativa	15
1.2. Objetivos	17
1.2.1. Objetivo geral	17
1.2.2. Objetivos específicos	17
1.3. Estrutura do trabalho	17
2. MÉTODO	19
2.1. Revisão sistemática de literatura	19
2.2. Análise e comparação dos estudos	20
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
3.1. Visão geral dos estudos sobre <i>retrofits</i>	22
3.2. Caracterização de <i>retrofits</i> de edificações.....	26
3.2.1. Definição e importância de <i>retrofits</i>	27
3.2.2. Aspectos considerados em <i>retrofits</i>	28
3.2.3. Desafios e limitações nos estudos de <i>retrofits</i>	30
3.2.4. O caso especial das edificações históricas.....	32
3.3. Principais estratégias de <i>retrofit</i>	34
3.3.1. Estratégias ativas	37
3.3.1.1. <i>Melhoria dos sistemas da edificação</i>	37
3.3.1.2. <i>Fontes renováveis de energia</i>	39
3.3.2. Estratégias passivas	43
3.3.2.1. <i>Isolamento térmico do envelope</i>	44
3.3.2.2. <i>Materiais de mudança de fase</i>	47
3.3.2.3. <i>Iluminação natural</i>	49
3.3.2.4. <i>Ventilação natural e fachada ventilada</i>	51
3.3.2.5. <i>Fachada verde, cobertura verde e cobertura fria</i>	52
3.3.2.6. <i>Uso racional de água</i>	54
3.4. Métodos de análise e seleção das estratégias de <i>retrofit</i>	54
3.4.1. Métodos e técnicas para seleção de estratégias	55
3.4.2. Modelagem e simulação energética com utilização de programas computacionais	57
3.5. Análise dos estudos de caso	59

3.5.1. Edificações residenciais.....	60
3.5.2. Edificações não-residenciais.....	70
3.5.3. Outras tipologias.....	82
3.5.4. Síntese dos resultados.....	87
3.6. Considerações para estudos futuros sobre <i>retrofit</i>	88
4. CONCLUSÕES.....	91
4.1. Limitações do trabalho.....	93
4.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	93
REFERÊNCIAS.....	95
APÊNDICE A – Caracterização dos estudos de caso sobre <i>retrofits</i> em edificações.....	111

1. INTRODUÇÃO

1.1. Justificativa

Diversos autores exploraram o significado de "edificação sustentável" (em inglês, *sustainable building* ou *green building*), que se refere à edificação que apresenta *design* integrado com estratégias sustentáveis, operação adequada pelos usuários e gerenciamento correto dos recursos naturais (RISPOLI; ORGAN, 2019; ROBICHAUD; ANANTATMULA, 2011; SIMONS; ROBINSON; LEE, 2014; ZUO; ZHAO, 2014). Assim, permite redução do consumo de recursos naturais como energia, água e materiais, aumento do uso de iluminação e ventilação natural e melhoria da saúde e do bem-estar dos ocupantes a partir de adequada qualidade do ar e conforto térmico, visual e acústico.

Os termos em inglês “*retrofit*”, “*retrofitting*” e “*refurbishment*” referem-se a uma reforma, adaptação ou ajuste das condições atuais de uma edificação existente de modo a modernizar e readequar seus componentes e instalações para melhorá-la e adequá-la às exigências atuais, além de expandir sua vida útil (DOUGLAS, 2006; JAGARAJAN *et al.*, 2017; MA *et al.*, 2012; MICKAITYTE *et al.*, 2008). Assim, compreendem a adição de novas tecnologias ou ferramentas para melhoria da eficiência energética, da gestão de recursos naturais, dos aspectos estruturais, das condições de operação, da qualidade do ar e do conforto térmico, visual e acústico dos usuários. Desta forma, estes termos designam uma modificação parcial ou total de uma edificação existente, sendo uma oportunidade de modernização de sua performance técnica e de implementação de estratégias eficazes para promover a sustentabilidade.

A construção e a operação de edificações representam grande parte do consumo de energia em todo o mundo (AUSTRÁLIA, 2019; BRASIL, 2020; ESTADOS..., 2012), sendo que a maior parte da demanda energética provém das edificações existentes, uma vez que novas edificações representam apenas 1% a 3% ao ano do estoque de edificações em diversos países (ANNEX 50, 2011; BARLOW; FIALA, 2007; ROBERTS, 2008; THOMAS, 2010). Estudos identificaram que *retrofits* apresentam o potencial de melhoria da eficiência energética e, conseqüentemente, redução das emissões de poluentes como o dióxido de carbono, resultando em melhor qualidade do ambiente interno e conforto térmico dos ocupantes (ARDENTE *et al.*, 2011; ASADI *et al.*, 2012; GOHARDANI; BJORK, 2012; MA *et al.*, 2012; NEMRY *et al.*, 2010).

Atualmente, o setor de edificações representa significativo percentual do consumo total de energia, variando de 18% na China (ENERGY..., 2018), 41% nos Estados Unidos (ESTADOS..., 2012), 46% no Brasil (BRASIL, 2020), até 87% nos Emirados Árabes Unidos (AFSHARI; NIKOLOPOULO; MARTIN, 2014). O elevado consumo de energia em edificações ao redor do mundo impulsiona o aumento da demanda por estratégias sustentáveis que permitam redução no consumo de recursos naturais, sendo que políticas promovendo a eficiência energética em edificações têm ganhado espaço e se desenvolvido de diferentes formas e níveis (EL-DARWISH; GOMAA, 2017).

Sabe-se que a vida útil dos elementos estruturais de uma edificação é geralmente igual a 50 anos, enquanto os demais componentes apresentam vida útil reduzida – como 20 ou 30 anos para revestimentos, esquadrias, entre outros (KONSTANTINOU; KNAACK, 2011; MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011). Assim, a realização de *retrofits* também se torna necessária para readequar a funcionalidade e a durabilidade dos elementos que compõem as edificações existentes.

Em comparação à demolição e reconstrução, a realização de *retrofits* apresenta benefícios econômicos, sociais e ambientais (LANGSTON, 2011; POWER, 2008) – como a geração de menos lixo e o consumo de menos recursos naturais. Além disso, pesquisas afirmam que *retrofits* de edificações são geralmente menos custosos em comparação à demolição e reconstrução e à própria construção de uma nova edificação (CAMPBELL, 1996; GORSE; HIGHFIELD, 2009; LANGSTON, 2011; POWER, 2008). Portanto, a prática de *retrofit* em edificações existentes proporciona redução do consumo energético e diminuição das emissões de gases poluentes, sendo uma forma de alcançar a sustentabilidade no ambiente construído com custos relativamente baixos.

Estudos apontam que diferentes condições ambientais e tipos de edificação requerem distintas estratégias de *retrofit* de modo a atingir resultados viáveis em termos ambientais, econômicos, sociais e técnicos (GIVONI, 1992; KIM; YU, 2018). Diante disso, é fundamental identificar e selecionar quais estratégias são mais adequadas para cada situação, considerando as condições do local e clima, além das características da edificação. O conhecimento das principais estratégias comumente empregadas em *retrofits* de edificações, aliado à utilização de métodos e critérios específicos, auxilia no processo de tomada de decisão para a escolha do conjunto de estratégias ideal para a melhoria da eficiência energética e da sustentabilidade em cada contexto.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é apresentar um panorama geral das estratégias de *retrofit* em edificações direcionadas à melhoria da eficiência energética e da sustentabilidade, a partir de uma revisão de literatura envolvendo estudos realizados em diversos países nos últimos cinco anos.

1.2.2. Objetivos específicos

Este trabalho busca alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Identificar a importância, as principais limitações e os aspectos considerados nos estudos sobre *retrofits* de edificações realizados nos últimos cinco anos;
- Apresentar e discutir as vantagens e desvantagens das principais estratégias de *retrofit* direcionadas à melhoria da eficiência energética e da sustentabilidade;
- Investigar os principais métodos utilizados nos estudos para análise e seleção das estratégias de *retrofit*;
- Analisar e comparar os principais resultados obtidos quanto à aplicação de estratégias de *retrofit* em diferentes tipologias de edificação;
- Sugerir considerações para estudos futuros sobre *retrofit*, a partir das observações dos artigos selecionados.

1.3. Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado em quatro capítulos. O primeiro trata da Introdução, em que constam a justificativa, o objetivo geral e os objetivos específicos do estudo.

No segundo, é apresentado o Método empregado para a realização da revisão sistemática de literatura e uma breve descrição das análises e comparações entre os artigos considerados.

O terceiro capítulo, de Resultados e Discussão, mostra uma visão geral dos trabalhos selecionados a partir da revisão sistemática de literatura e a caracterização dos *retrofits* de edificações quanto à sua importância, limitações e aspectos considerados nos estudos. São

apresentadas e discutidas as principais estratégias ativas e passivas identificadas nos estudos sobre *retrofits*, bem como os métodos e técnicas para seleção das alternativas. Além disso, é realizada uma análise dos estudos de caso desenvolvidos em diferentes tipologias de edificações, comparando-se os resultados relevantes. Também constam as principais considerações para estudos futuros obtidas a partir dos artigos selecionados.

Por fim, o quinto capítulo constitui as Conclusões oriundas das análises realizadas neste estudo, além de limitações do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2. MÉTODO

Neste capítulo, é exposto o método em que se baseou este estudo. Foi realizada uma revisão sistemática de literatura para identificar e selecionar trabalhos relacionados ao tema desta pesquisa. Além disso, é apresentada uma explicação geral sobre as principais análises realizadas com base nos artigos considerados.

2.1. Revisão sistemática de literatura

A revisão de literatura permite assimilar o conhecimento científico já publicado e as lacunas a serem exploradas acerca de determinados assuntos. Uma revisão sistemática de literatura é definida por processos estruturados para identificar, selecionar, coletar e analisar informações sobre um tema definido, de forma a limitar vieses e erros aleatórios, conforme definido por alguns autores. Além disso, estabelece estratégias para definição de critérios de inclusão e exclusão de dados de maneira prévia e objetiva (BIOLCHINI *et al.*, 2007; FERENHOF; FERNANDES, 2016; MOHER *et al.*, 2009).

Assim, realizou-se uma busca sistemática no banco de dados Scopus a fim de encontrar e identificar trabalhos relacionados ao tema “estratégias de *retrofit* em edificações para melhoria da eficiência energética e da sustentabilidade”. Em título, resumo e palavras-chave, aplicou-se o seguinte filtro no dia 19 de dezembro de 2020, envolvendo termos e operadores booleanos:

(strateg* OR alternative) AND (retrofit* OR refurbish*) AND building AND "energy efficien*" AND (sustainab* OR green)

Onde:

AND significa que o resultado da pesquisa deve conter todos os termos;

OR significa que o resultado da pesquisa deve conter ao menos um dos termos;

* representa distintas terminações do termo, podendo substituir qualquer caractere.

Além deste filtro, foram considerados apenas trabalhos em inglês e publicados entre janeiro de 2016 e dezembro de 2020, uma vez que este estudo tem por objetivo investigar o conhecimento científico sobre o tema nos últimos cinco anos. Desta forma, resultaram 241

trabalhos. Desconsiderando capítulos de livros (10), foram considerados apenas artigos de revistas (138) e de conferências (93) – isto é, um total de 231 artigos.

Selecionados os 231 artigos no banco de dados, utilizou-se o programa computacional Mendeley como organizador de referências. Para refinar a busca, efetuou-se a leitura de título, resumo e palavras-chave de todos os artigos, sendo excluídos aqueles cujo conteúdo destoou do tema principal deste trabalho (41). Também foram desconsiderados nove documentos que apresentavam um número ou volume completo de revista ou anais de eventos, além de sete artigos duplicados ou com conteúdo semelhante de mesma autoria e nove indisponíveis – seja por ausência de documento para *download* ou por restrição de acesso. Assim, restaram 165 artigos, que foram lidos na íntegra para compôr os resultados desta pesquisa. Destaca-se que, além dos artigos selecionados, outras referências complementares foram consideradas neste estudo – incluindo conteúdos referentes a legislação, dados de consumo de diferentes países e definições de termos específicos.

A Figura 1 apresenta um fluxograma do processo de revisão sistemática de literatura empregado, mostrando as etapas consideradas neste trabalho.

Figura 1 – Fluxograma do processo de revisão sistemática de literatura



2.2. Análise e comparação dos estudos

Com base nos artigos selecionados para a revisão sistemática de literatura, apresenta-se uma visão geral dos estudos, classificando-os conforme o ano de publicação, país e região do estudo, tipologia da edificação analisada, entre outras categorias. Também são discutidas a importância, as limitações e os aspectos considerados nos estudos sobre *retrofits* de edificações.

Na sequência, são apresentadas e discutidas as principais estratégias ativas e passivas identificadas nos estudos sobre *retrofits*, destacando-se as suas vantagens e desvantagens. Os principais métodos utilizados nos estudos para análise e seleção das estratégias de *retrofit* são expostos, com destaque para a modelagem e simulação energética das edificações a partir do uso de programas computacionais. Também é realizada uma análise dos estudos de caso

elaborados em diferentes tipologias de edificações situadas em locais e climas distintos, comparando-se os resultados relevantes obtidos por cada autor. Por fim, são discutidas as principais considerações para estudos futuros verificadas nos trabalhos analisados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com base nos artigos selecionados para a revisão sistemática de literatura. É apresentada uma visão geral dos estudos considerados, bem como a caracterização de *retrofits* de edificações. Também são analisadas as principais vantagens e desvantagens das estratégias de *retrofit* identificadas nos estudos, além dos métodos e programas computacionais que auxiliam a seleção das alternativas. Ademais, os resultados dos estudos de caso realizados em diferentes tipologias de edificações são discutidos e comparados. Por fim, constam sugestões para estudos futuros com base nos trabalhos analisados.

3.1. Visão geral dos estudos sobre *retrofits*

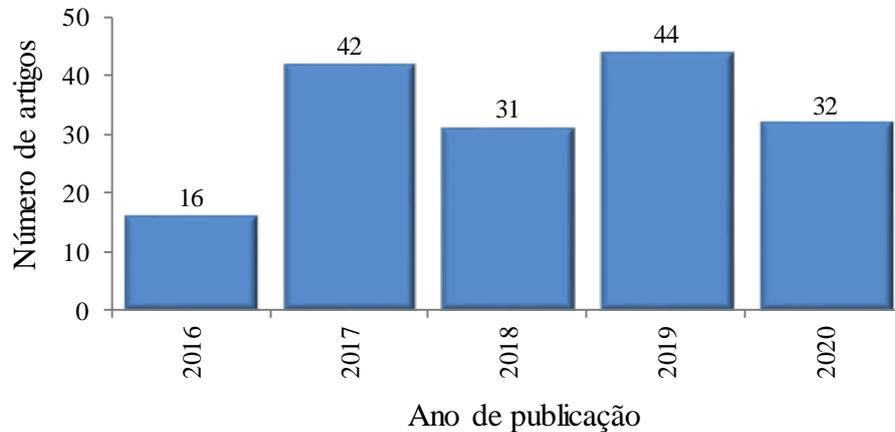
Os artigos selecionados neste trabalho abordam a temática de *retrofits* de edificações de diferentes formas, sendo as principais: estudos de caso (73,3%), estudos teóricos (18,2%) e revisões de literatura sobre temas afins (8,5%). O estudo de caso consiste em um método de pesquisa baseado na investigação empírica, que compreende a coleta e análise de dados, com o intuito de compreender a realidade e possivelmente propor intervenções (YIN, 2015). Assim, os estudos de caso representam a proposta de estratégias de *retrofit* escolhidas para o projeto de uma ou mais edificações, sendo o método mais utilizado na maioria dos artigos. Uma maneira comum de realizar estudos de caso é por meio de modelagem da edificação e simulação energética, obtendo-se resultados que permitem a comparação das condições anteriores e posteriores à implementação das estratégias de *retrofit*.

Ao contrário dos estudos de caso, os estudos teóricos e as revisões de literatura são caracterizados por sua abordagem conceitual e geralmente ampla sobre um ou mais temas. Assim, esses estudos geralmente não abordam um local e clima específico, nem determinada tipologia de edificação. Diante disso, é apresentada a seguir uma visão geral dos 121 estudos de caso sobre *retrofits* – exceto quanto ao ano de publicação, em que foram considerados todos os 165 artigos selecionados para a revisão sistemática.

Ao longo dos últimos cinco anos, observa-se a produção anual de 16 a 44 artigos publicados sobre o tema considerado, destacando-se a significativa produção dos anos 2017 e 2019 – que juntos compreendem 52,1% dos trabalhos publicados no período (Figura 2). Desta forma, percebe-se a crescente importância de estudar sobre estratégias de *retrofit* em edificações atualmente. Essa tendência pode estar relacionada à preocupação em mitigar as

mudanças climáticas ao redor do mundo (LASSANDRO; COSOLA, 2018; RISPOLI; ORGAN, 2019; SALEM; BAHADORI-JAHROMI; MYLONA, 2019; YAO *et al.*, 2016).

Figura 2 – Número de artigos de acordo com o ano de publicação



As Figuras 3 e 4 mostram o número de artigos por país e por região do estudo de caso. Destaca-se que nem todos os estudos tratam de um país ou região em específico (como, por exemplo, a maioria das revisões de literatura) e alguns abordam mais de um país ou região, sendo contabilizada uma vez para cada local diferente. Foram identificados trabalhos em 46 países distintos, distribuídos em dez regiões ao redor do mundo. Nota-se significativa quantidade de estudos realizados na Itália (26,0%), China (5,9%), Estados Unidos (5,3%), Reino Unido (4,7%), Austrália (4,1%) e Emirados Árabes Unidos (EAU) (3,6%). Quanto às regiões, os maiores percentuais ocorreram na Europa – principalmente nas regiões Mediterrânea (34,6%) e Central (14,4%) – e na Ásia (15,0%).

Nota-se que a maioria dos trabalhos sobre estratégias de *retrofit* em edificações foi realizada em países e regiões desenvolvidas ou em desenvolvimento. Nesses locais, o percentual de construção de novas edificações é reduzido, em torno de 1,0% ao ano (EUROPEAN..., 2020), e o consumo de energia por edificações é elevado – aproximadamente 40% na União Europeia (EUROPEAN..., 2020). Desta forma, recentemente tem aumentado o interesse por reformar as edificações existentes em países desenvolvidos a fim de aproveitar as construções existentes e melhorar o seu desempenho energético.

Figura 3 – Número de artigos de acordo com o país do estudo

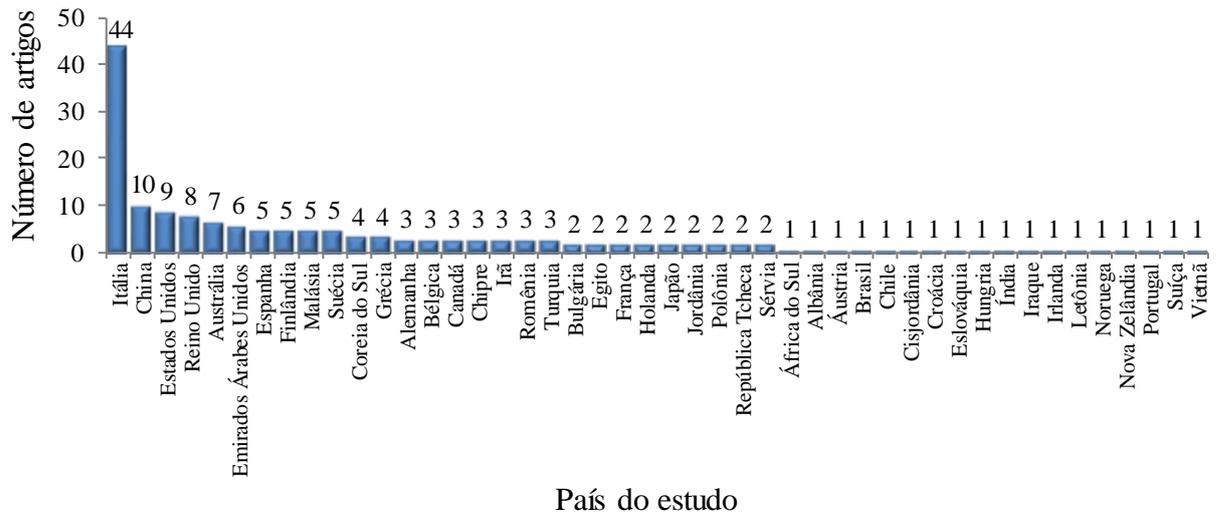
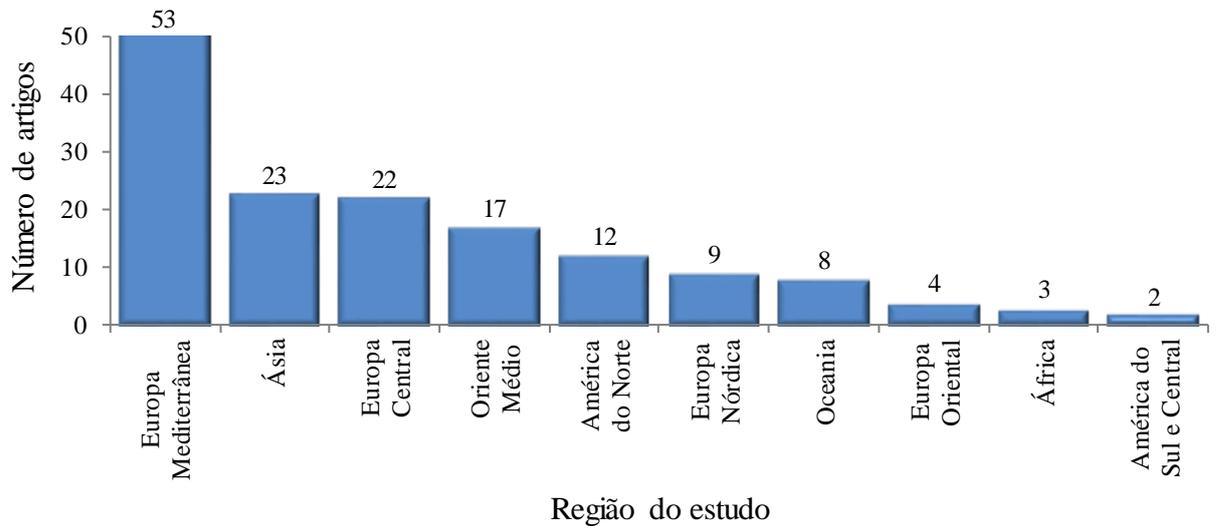


Figura 4 – Número de artigos de acordo com a região do estudo



A Tabela 1 apresenta o clima do local de estudo, que foi obtido a partir de Climate-Data (2020) e Weatherbase (2020), segundo a classificação climática de Köppen-Geiger. Destaca-se que o clima está associado à cidade em que foi realizado o estudo e, desta forma, trabalhos que mencionam apenas um país ou região não foram relacionados a um clima específico. Os maiores percentuais observados correspondem aos climas temperado oceânico (27,4%), temperado subtropical (17,7%) e mediterrâneo com verão quente (17,7%).

Tabela 1 – Clima dos locais de estudo, conforme a classificação climática de Köppen-Geiger

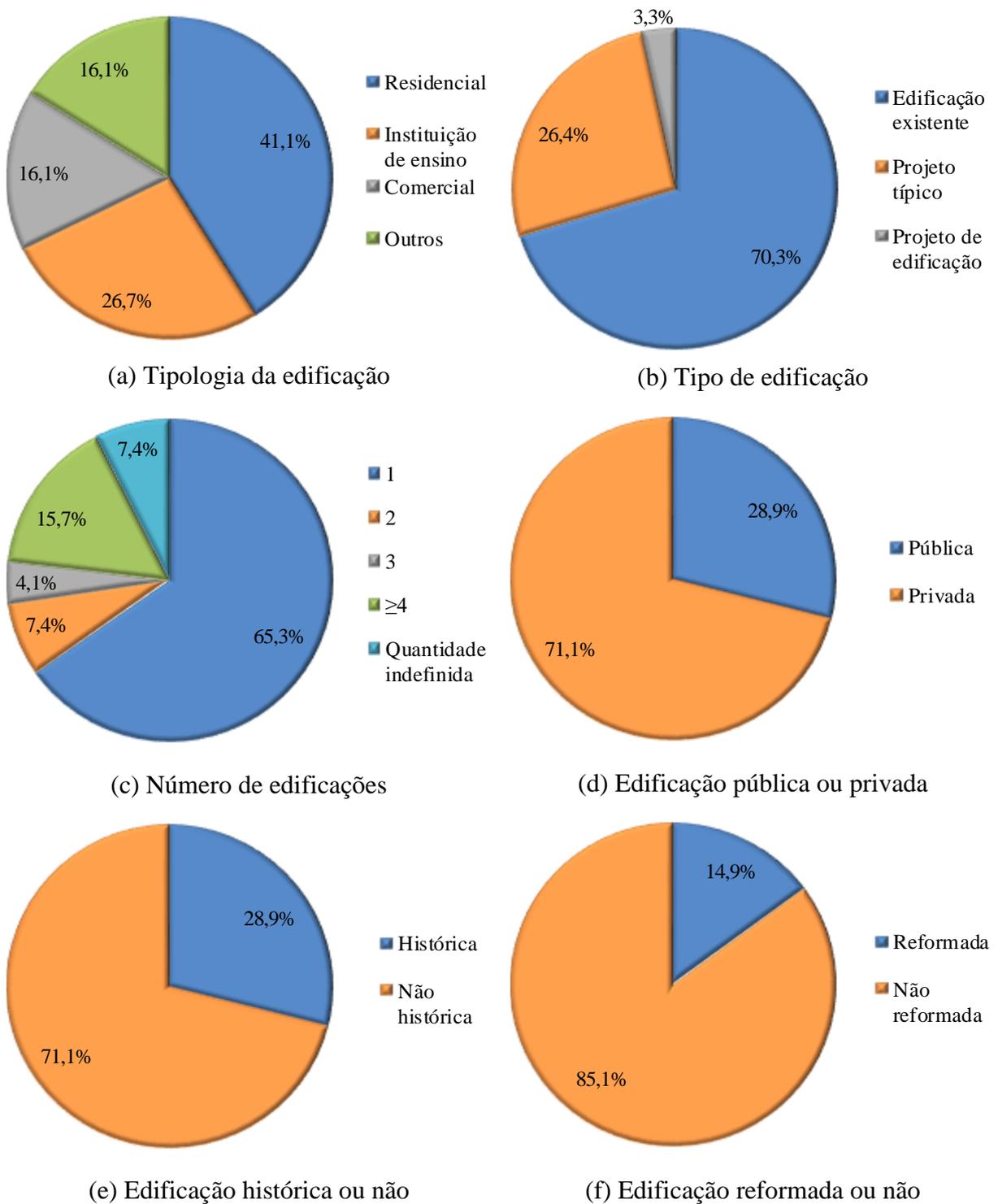
Sigla	Clima	Frequência
Af	Tropical equatorial	1,6%
Bsh	Árido	2,4%
Bwh	Desértico quente	6,5%
Cfa	Temperado subtropical	17,7%
Cfb	Temperado oceânico	27,4%
Csa	Mediterrâneo com verão quente	17,7%
Csc	Mediterrâneo com verão frio	1,6%
Dfb	Continental	3,2%
Dwa	Continental de monções	4,0%
	Clima não especificado	17,7%

A Figura 5 apresenta a distribuição das edificações dos estudos de caso de acordo com algumas categorias. Foram consideradas as seguintes classificações para tipologia da edificação: residencial (41,1%), instituição de ensino (26,7%), comercial ou de escritórios (16,1%) e outros (16,1%). A última categoria compreende edificações com tipologia pouco usual, como asilo, cinema, corpo de bombeiros, hotel, hospital, indústria, museu, prefeitura e presídio. Ressalta-se que, para estudos considerando diferentes edificações com tipologias distintas, contabilizou-se uma vez para cada tipologia, independentemente do número de edificações consideradas no trabalho. Costa-Carrapiço *et al.* (2020) realizaram uma revisão sistemática de literatura sobre algoritmos de otimização para definição das estratégias de *retrofit* em edificações e obtiveram resultados semelhantes – a maioria dos estudos de caso analisados envolveu residências, seguidas por instituições de ensino.

Quanto ao tipo de edificação, foram classificadas em existente (70,3%), projeto típico (26,4%) ou projeto de edificação (3,3%). A primeira refere-se a edificações reais construídas; a segunda, a projetos padrões que representam um conjunto de edificações reais construídas em determinado local; e a terceira, a projetos específicos de edificações a serem construídas. Os artigos também foram comparados em relação ao número de edificações analisadas em cada estudo, isto é, se foi considerada uma (65,3%), duas (7,4%), três (4,2%), quatro ou mais edificações (15,7%) ou um conjunto de edificações com quantidade indefinida (7,4%).

Outras categorias analisadas apontam que 28,9% das edificações analisadas eram públicas, 28,9% eram históricas e 14,9% já passaram por alguma reforma desde a sua construção. É importante destacar que as edificações foram consideradas públicas e/ou históricas e/ou reformadas apenas quando a informação estava explícita no estudo.

Figura 5 – Distribuição das edificações dos estudos de caso de acordo com a categoria



3.2. Caracterização de *retrofits* de edificações

A fim de caracterizar os *retrofits* de edificações, é apresentada a seguir a definição e importância de *retrofits*, bem como os desafios e limitações envolvidos nos estudos que

abordam este tema. Também são discutidos os principais aspectos analisados perante a realização de *retrofits* e considerações sobre o caso especial das edificações históricas.

3.2.1. Definição e importância de *retrofits*

O termo *retrofit* consiste em um processo de modificação e adaptação dos componentes de uma edificação ou um conjunto de edificações a fim de melhorar a sua performance energética, funcional e/ou estrutural (FARGHALY; HASSAN, 2019). Em geral, *retrofits* abrangem a implementação de novas propriedades e tecnologias à edificação, para melhor aproveitamento dos recursos naturais – como energia, água e diversos materiais (DADZIE; DING; RUNESON, 2017; OGUNTONA *et al.*, 2019).

Com o passar do tempo, estratégias de *retrofit* em edificações têm ganhado espaço ao redor do mundo por permitirem melhoria da eficiência energética e redução da emissão de gases de efeito estufa (BESEN; BOARIN, 2018; KIM; YU, 2018; LIU; REN, 2020; MEDAL; KIM, 2020; OGUNTONA *et al.*, 2019; POMBO; RIVELA; NEILA, 2016; QI *et al.*, 2020; RABANI; MADESSA; NORD, 2017; SARETTA; CAPUTO; FRONTINI, 2019). Ademais, possibilitam manutenção ou aumento da vida útil de projeto da edificação, reduzindo os impactos ambientais a longo prazo e garantindo condições de operação adequadas, como boa qualidade do ar e conforto térmico, visual e acústico dos usuários (LI; XU; FAN, 2019; RABANI; MADESSA; NORD, 2017). Em comparação à demolição e reconstrução, estudos mostram que *retrofits* apresentam melhores resultados em termos energéticos e econômicos (LIU; LIU; LI, 2019; MARIQUE; ROSSI, 2018; PITTAU *et al.*, 2019). Assim, é considerada uma das principais formas de atingir a sustentabilidade na construção civil (OGUNTONA *et al.*, 2019; POMBO; RIVELA; NEILA, 2016; ZHOU *et al.*, 2016).

Comparando-se às técnicas convencionais de construção civil, o uso de estratégias sustentáveis em *retrofits* de edificações tem se mostrado muitas vezes mais econômico (LIAPOPOULOU; THEODOSIOU, 2020). Além disso, essas estratégias geralmente possibilitam diminuição dos custos de operação ao longo da vida útil da edificação, aumento do valor do imóvel e do aluguel e modernização da aparência da edificação (ARDIANI *et al.*, 2018; LEE; SHEPLEY; CHOI, 2019; MAURO *et al.*, 2019; RABANI; MADESSA; NORD, 2017).

Nos últimos anos, políticas têm sido estabelecidas a níveis regional e global a fim de incentivar a realização de *retrofits* em edificações. Exemplos são as normas, leis, certificações e etiquetagens de eficiência energética e de redução dos gases de efeito estufa, além dos

incentivos financeiros para *retrofits* de edificações (GOLZ; NIKOLOWSKI; NAUMANN, 2019; LIAPOPOULOU; THEODOSIOU, 2020; TRENCHER; HEIJDEN, 2019; WAHLSTRÖM; GLADER, 2020; ZHOU *et al.*, 2016).

A realização de *retrofit* também contribui para alcançar os conceitos de edificação de energia zero (em inglês, *Zero Energy Building* – ZEB) e edificação de energia quase zero (em inglês, *Net Zero Energy Building* – NZEB), em que há equilíbrio entre a demanda e a geração de energia, com consumo de energia operacional próximo a zero (ABIDIN *et al.*, 2019; BRAMBILLA *et al.*, 2018; D’AGOSTINO; CUNIBERTI; MASCHIO, 2017; KAEWUNRUEN; SRESAKOOLCHAI; KERINNONTA, 2019; KIM; YU, 2018). Assim, definem edificações com performance energética muito elevada, cuja demanda energética é suprida por fontes renováveis de energia (HEJTMÁNEK *et al.*, 2017; RABANI; MADESSA; NORD, 2017).

3.2.2. Aspectos considerados em *retrofits*

A sustentabilidade se baseia em três aspectos principais: ambiental, econômico e social. Em termos práticos, é importante considerar também o aspecto técnico, relacionado à aplicabilidade das estratégias de *retrofit* na edificação. Embora sejam variáveis independentes entre si, é comum que mais de um aspecto seja levado em consideração em estudos que envolvam o propósito da sustentabilidade. Inclusive, é ideal que o processo de identificação e seleção das estratégias de *retrofit* seja baseado em diversos aspectos (CHANG; CASTRO-LACOUTURE; YAMAGATA, 2020; COSTA-CARRAPIÇO; RASLAN; GONZÁLEZ, 2020; LONGO *et al.*, 2018), os quais serão explorados a seguir.

O aspecto ambiental envolve principalmente os impactos dos processos de *retrofit* sobre o meio ambiente, como o consumo energético e de recursos naturais, bem como a emissão de gases de efeito estufa (CHANG; CASTRO-LACOUTURE; YAMAGATA, 2020; COSTA-CARRAPIÇO; RASLAN; GONZÁLEZ, 2020).

Quanto ao aspecto econômico, é importante considerá-lo durante o processo de escolha das estratégias de *retrofit* a serem empregadas na edificação em questão (CHRISTEN; ADEY; WALLBAUM, 2016; GUARDIGLI *et al.*, 2018; SIEW, 2018; YAO *et al.*, 2016). Os principais fatores considerados são o custo inicial, o potencial econômico e o período de retorno do investimento. Para isso, podem ser utilizados métodos de avaliação do custo-benefício dos investimentos de *retrofit*, como: Valor Presente Líquido, Taxa Interna de Retorno, *Payback* Simples, *Payback* Descontado, entre outros (GUARDIGLI *et al.*, 2018;

PACCHIEGA; FAUSTI, 2017; POMBO; RIVELA; NEILA, 2016; TAGLIABUE *et al.*, 2018; TROVATO; NOCERA; GIUFFRIDA, 2020).

O potencial econômico está relacionado à economia financeira devido à redução do consumo energético da edificação após a realização do *retrofit*. Alguns autores ressaltam a dificuldade de comparação do potencial econômico de *retrofits* entre diferentes edificações devido à variabilidade da extensão e dos efeitos das estratégias de *retrofit* conforme o clima do local, o tipo de edificação e outras particularidades de cada construção (LEE; SHEPLEY; CHOI, 2019).

O tempo de retorno do investimento é o período necessário para recuperar os custos iniciais do investimento, sendo calculado como *payback* simples ou descontado. Por exemplo, o *payback* simples é a razão entre o custo total do investimento e o valor anual de economia energética. Desta forma, o cálculo do tempo de retorno do investimento é muito utilizado nos estudos que consideram o aspecto econômico. Em geral, quanto maior o cenário temporal considerado para retorno do investimento, alternativas de *retrofit* com custo elevado tornam-se mais competitivas e melhores resultados são obtidos em termos de consumo energético e emissões de gases de efeito estufa (BONAMENTE *et al.*, 2018). Entretanto, destaca-se que o tempo de retorno de estratégias de *retrofit* está sujeito aos custos da energia elétrica no local em que se situa a edificação (LEE; SHEPLEY; CHOI, 2019).

Outro fator relacionado ao aspecto econômico é o incentivo financeiro para a realização de *retrofits*, cujo custo inicial pode ser parcial ou totalmente subsidiado por iniciativa privada ou pública. Nesse sentido, empresas ou governos podem oferecer um financiamento ou uma redução na taxa de energia elétrica para os usuários que optarem por implantar medidas de eficiência energética nas edificações (AGUACIL *et al.*, 2017; BERTONE *et al.*, 2018; GILLICH; SUNIKKA-BLANK; FORD, 2017; SIEW, 2018).

O aspecto social está relacionado aos efeitos das estratégias de *retrofit* sobre os usuários e sua relação com a edificação. Esse aspecto inclui, entre outros, a qualidade do ar, o conforto térmico, visual e acústico, a saúde e a produtividade dos ocupantes (COSTA-CARRAPIÇO; RASLAN; GONZÁLEZ, 2020; GIANFRATE *et al.*, 2017). Estudos destacam a importância da consideração do comportamento dos usuários no processo de identificação e escolha das estratégias de *retrofit*, sendo um aspecto determinante para o consumo energético em edificações (BERG *et al.*, 2017; GIANFRATE *et al.*, 2017; MYHREN *et al.*, 2018; OZARISOY; ALTAN, 2018; PIOPPI *et al.*, 2020).

A relação usuário-edificação deve ser levada em conta para o processo de tomada de decisão das estratégias de *retrofit* por estar diretamente relacionada ao bem-estar dos

ocupantes (MYHREN *et al.*, 2018). São exemplos dessa interação: ajuste das condições ambientais por meio dos sistemas de climatização, ligar e desligar as luzes, abrir e fechar janelas e persianas, movimentação entre os diferentes espaços da edificação, entre outros. Além disso, diferentes pessoas apresentam percepções e preferências distintas em relação às estratégias de *retrofit*, o que influencia na análise e escolha das mudanças a serem realizadas na edificação (MEDAL; KIM, 2020). No entanto, a influência do comportamento dos usuários sobre a performance energética de edificações é pouco explorada devido à dificuldade de quantificar o seu potencial. Assim, o aspecto social é comumente negligenciado em estudos sobre *retrofit* em edificações (BERG *et al.*, 2017; COSTA-CARRAPIÇO; RASLAN; GONZÁLEZ, 2020; MYHREN *et al.*, 2018).

Nota-se que a conscientização dos usuários quanto à operação sustentável da edificação constitui um aspecto importante a ser considerado durante a concepção e escolha das estratégias de *retrofit*. É fundamental que os usuários compreendam a importância e o funcionamento das melhorias realizadas na edificação de modo a garantir elevada qualidade do ambiente interno e bons resultados em termos energéticos (GILLICH; SUNIKKA-BLANK; FORD, 2017; OZARISOY; ALTAN, 2018). Gianfrate *et al.* (2017) ressaltam que algumas estratégias podem requerer maior conhecimento dos ocupantes para a sua operação ao longo da vida útil da edificação, como sistemas de ventilação mecânica, fachadas e telhados verdes, sistemas de sombreamento solar controlados manualmente, entre outros.

Em relação ao aspecto técnico, a sua consideração está geralmente relacionada à verificação das condições estruturais e operacionais da edificação, de modo a possibilitar ou restringir a implementação de determinadas estratégias de *retrofit*. Em edificações históricas, é comum a avaliação das particularidades técnicas devido às possíveis restrições estruturais e de sua aparência externa e/ou interna (PACCHIEGA; FAUSTI, 2017).

3.2.3. Desafios e limitações nos estudos de *retrofits*

Apesar de todos os benefícios associados à realização de *retrofits* em edificações, ainda existem muitos desafios e limitações que podem dificultar a sua implementação em diversas regiões e tipos de edificação. Visto que grande parte dos estudos sobre *retrofit* em edificações são realizados em países desenvolvidos – notoriamente na América do Norte e na Europa – há conhecimento limitado sobre a eficácia de estratégias de *retrofit* em outras regiões do mundo (LEE; SHEPLEY; CHOI, 2019). Além disso, há falta de conscientização

dos usuários quanto à importância de *retrofits* para a sustentabilidade e a melhoria da performance energética de edificações (BASU; PAUL; SYAL, 2017; BERG *et al.*, 2017).

Limitações financeiras também devem ser consideradas, visto que algumas estratégias de *retrofit* podem requerer elevado investimento inicial ou apresentar longo período de retorno do investimento (BASU; PAUL; SYAL, 2017; DIMITROVA *et al.*, 2019; GUARDIGLI *et al.*, 2018; OGUNTONA *et al.*, 2019; PARDO-BOSCH; CERVERA; YSA, 2019). É expressiva a ausência de políticas e normas locais que disponibilizem orientações específicas e incentivem financeiramente a realização de *retrofits* em edificações, principalmente em regiões subdesenvolvidas ou em desenvolvimento (BASU; PAUL; SYAL, 2017; BERTONE *et al.*, 2018; BESEN; BOARIN, 2018; D'ALPAOS; BRAGOLUSI, 2018; LI; XU; FAN, 2019; LIU; LIU; LI, 2019; OGUNTONA *et al.*, 2019; PARDO-BOSCH; CERVERA; YSA, 2019; SIEW, 2018).

Outro obstáculo para o desenvolvimento de *retrofits* em edificações é a falta de projetos e dados – como a representação de plantas e a especificação de materiais e instalações presentes na edificação (LI; XU; FAN, 2019; NEGRO; D'AMATO; CARDINALE, 2019; OGUNTONA *et al.*, 2019). Ademais, modificações ou reformas em edificações existentes apresentam, em geral, maiores restrições em comparação a novas construções – principalmente em edificações históricas (BAGGIO *et al.*, 2017; LEE; SHEPLEY; CHOI, 2019). Desta forma, é necessário adaptar as estratégias de *retrofit* às condições estruturais das edificações existentes (BASU; PAUL; SYAL, 2017).

Apesar de sua extrema importância, análises multidimensionais – que envolvem aspectos distintos, como ambientais, econômicos, sociais e técnicos – geralmente não são empregadas nos estudos de *retrofit*. A falta desse tipo de análise dificulta a obtenção do aproveitamento integral dos recursos de uma edificação em prol da eficiência energética e da sustentabilidade (NEGRO; D'AMATO; CARDINALE, 2019). Além disso, análises unidimensionais estão submetidas a maiores incertezas quanto aos resultados de performance energética e emissão de gases de efeito estufa após a implementação das estratégias de *retrofit* na edificação (ARDIANI *et al.*, 2018; JORGJI *et al.*, 2019; LEE *et al.*, 2020; MCARTHUR; JOFEH, 2016). Myhren *et al.* (2018) apontam que pode haver dúvida e insegurança pelos proprietários das edificações quanto aos resultados apresentados pelas simulações energéticas, isto é, se realmente serão obtidos após a realização dos *retrofits*.

Segundo Medal e Kim (2020) e Myhren *et al.* (2018) as principais dificuldades na realização de *retrofits* estão relacionadas aos aspectos econômico e técnico. Medal e Kim (2020) realizaram uma pesquisa com 283 profissionais nos Estados Unidos, que apontaram as

três principais limitações para *retrofits* de edificações: falta de incentivo financeiro, longo período de *payback* e restrições técnicas para implementação de determinadas estratégias. Myhren *et al.* (2018) ressaltam que os usuários das edificações geralmente não possuem conhecimento técnico suficiente para analisar a viabilidade das estratégias de *retrofit*, o que dificulta a adequada tomada de decisões.

Desta forma, nota-se a existência de diferentes limitações ou dificuldades em termos ambientais, econômicos, sociais e técnicos frente à implementação de *retrofits* em edificações para melhoria de sua performance energética (BERG *et al.*, 2017; DIMITROVA *et al.*, 2019). As principais limitações encontradas nos estudos analisados são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Principais limitações frente à implementação de *retrofits* em edificações

	Limitações	Referências
Ambientais	Incertezas quanto aos resultados de performance energética e emissão de gases de efeito estufa.	(ARDIANI <i>et al.</i> , 2018; JORGJI <i>et al.</i> , 2019; LEE <i>et al.</i> , 2020; MCARTHUR; JOFEH, 2016; MYHREN <i>et al.</i> , 2018)
Econômicas	Falta de incentivo financeiro por políticas públicas e empresas privadas; Possível necessidade de elevado investimento inicial e longo período de retorno.	(BASU; PAUL; SYAL, 2017; BERTONE <i>et al.</i> , 2018; D'ALPAOS; BRAGOLUSI, 2018; GUARDIGLI <i>et al.</i> , 2018; LI; XU; FAN, 2019; LIU; LIU; LI, 2019; MEDAL; KIM, 2020; MYHREN <i>et al.</i> , 2018; OGUNTONA <i>et al.</i> , 2019; PARDO-BOSCH; CERVERA; YSA, 2019; SIEW, 2018)
Sociais	Falta de conscientização dos usuários; Conhecimento limitado em regiões subdesenvolvidas ou em desenvolvimento.	(BASU; PAUL; SYAL, 2017; BERG <i>et al.</i> , 2017; LEE; SHEPLEY; CHOI, 2019)
Técnicas	Adaptação às condições estruturais da edificação existente; Maiores restrições em comparação a novas construções; Falta de projetos e dados da edificação; Ausência de regulamentação específica; Falta de conhecimento técnico para tomada de decisões.	(BASU; PAUL; SYAL, 2017; LEE; SHEPLEY; CHOI, 2019; LI; XU; FAN, 2019; LIU; LIU; LI, 2019; MEDAL; KIM, 2020; MYHREN <i>et al.</i> , 2018; NEGRO; D'AMATO; CARDINALE, 2019; OGUNTONA <i>et al.</i> , 2019)

3.2.4. O caso especial das edificações históricas

As edificações históricas representam uma parcela significativa das edificações em países desenvolvidos, principalmente na Europa, e se destacam por apresentarem maiores restrições a modificações em sua aparência (BAGGIO *et al.*, 2017; CADELANO *et al.*, 2019;

GASPARI; FABBRI; GABRIELLI, 2019; MOHELNÍKOVÁ; NOVOTNÝ; MOCOVARÁ, 2020; RISPOLI; ORGAN, 2019). Neste tipo de edificação, é comum encontrar problemas relacionados à falta de manutenção dos componentes da edificação (BUDA; PRACCHI; SANNASARDO, 2019; HEJTMÁNEK *et al.*, 2017). Também é importante ressaltar a falta de controle sobre os requisitos de conforto térmico e visual dos usuários, devido à inadequação da quantidade, da disposição e da qualidade dos dispositivos de iluminação e de condicionamento térmico (BUDA; PRACCHI; SANNASARDO, 2019). Assim, nota-se que pouca atenção tem sido dirigida a edificações históricas, principalmente em relação à conservação da edificação e à qualidade do ambiente interno (COSTA-CARRAPIÇO; RASLAN; GONZÁLEZ, 2020).

Muitas edificações históricas, por terem sido construídas há muitos anos, possuem elevado consumo de energia e não atendem aos requisitos de normas atuais quanto à eficiência energética da edificação, sendo necessárias melhorias para readequar as edificações (ABDELRAZEK; YILMAZ, 2020; BESEN; BOARIN, 2018; CADELANO *et al.*, 2019; CHO *et al.*, 2020; GOLZ; NIKOLOWSKI; NAUMANN, 2019; MEHR; SARA, 2018; NEGRO; D'AMATO; CARDINALE, 2019). Assim, é importante a realização de *retrofits* em edificações históricas, os quais devem levar em consideração principalmente os aspectos sociais e técnicos (BERG *et al.*, 2017; BESEN; BOARIN, 2018; RISPOLI; ORGAN, 2019). Em geral, estratégias como a alteração do envelope da edificação e a inclusão de sistemas de sombreamento não são adequadas a edificações históricas (ABDELRAZEK; YILMAZ, 2020; YANG, 2017). Portanto, a maioria dos estudos propõe soluções técnicas para melhoria estrutural e estratégias passivas ou integração de fontes renováveis de energia para melhoria da performance energética dessas edificações (BERG *et al.*, 2017; BESEN; BOARIN, 2018).

Edificações construídas há um tempo considerável, classificadas ou não como edificações históricas, apresentam muitas vezes más condições de operabilidade e habitabilidade (no caso de edificações residenciais), como condições inadequadas quanto à qualidade do ar e ao conforto térmico, visual e acústico dos usuários (ADAM *et al.*, 2019). Isso está relacionado ao fato de essas edificações terem sido construídas anteriormente às políticas e normas atuais que definem os requisitos de desempenho das edificações (ADAM *et al.*, 2019; ARTINO *et al.*, 2019; MCDOWELL *et al.*, 2016). Além disso, destacam-se as condições de deterioração dos elementos da edificação e a necessidade de manutenção ou substituição de equipamentos com alto consumo energético e/ou funcionamento inadequado (BUDA; PRACCHI; SANNASARDO, 2019).

Portanto, é essencial a melhoria da performance energética e da qualidade do ambiente interno de edificações históricas (ADAM *et al.*, 2019; MEHR; SARA, 2018; RISPOLI; ORGAN, 2019). Os *retrofits* também devem levar em consideração a valorização dessas edificações, de forma a conservar as suas características originais e reintegrá-las ao contexto do local em que estão inseridas. Destaca-se que as edificações históricas apresentam valores social e cultural insubstituíveis, por representarem parte de determinada época histórica da região (DADZIE; DING; RUNESON, 2017; MEHR; SARA, 2018; RISPOLI; ORGAN, 2019).

Atualmente, há diversos códigos e normas quanto à conservação do estado original de edificações históricas, definindo restrições para a modificação de sua aparência (YANG, 2017). É importante ressaltar que a alteração do envelope de edificações históricas depende de limitações estruturais e arquitetônicas, levando em consideração as restrições de conservação da aparência original da edificação (BUDA; PRACCHI; SANNASARDO, 2019; UDAYRAJ *et al.*, 2018; YANG, 2017). É fato que as particularidades das edificações históricas tornam o processo de *retrofit* mais complexo e geralmente com maior custo, podendo dificultar a obtenção de melhoria simultânea nos aspectos ambiental, econômico, social e técnico (COSTA-CARRAPIÇO; RASLAN; GONZÁLEZ, 2020; DADZIE; DING; RUNESON, 2017; NASTASI; MATTEO, 2017; PACCHIEGA; FAUSTI, 2017).

3.3. Principais estratégias de *retrofit*

As estratégias de *retrofit* buscam reduzir o consumo energético das edificações e proporcionar melhoria na qualidade dos ambientes internos para os usuários, sendo classificadas em ativas ou passivas (NGUYEN; BOKEL; DOBBELSTEEN, 2017). As estratégias ativas abrangem os sistemas da edificação e o uso de fontes renováveis de energia. Por outro lado, as estratégias passivas, mais comuns do que as ativas, compreendem o isolamento térmico do envelope da edificação, a otimização da iluminação e ventilação natural, além de outras alternativas que aproveitam recursos naturais de forma eficiente.

O Quadro 2 apresenta as principais vantagens e desvantagens ou limitações das alternativas de *retrofit* abordadas nos artigos selecionados. Na sequência, as estratégias são analisadas mais detalhadamente.

Quadro 2 – Principais vantagens e desvantagens das estratégias de *retrofit* abordadas nos artigos analisados

Estratégia	Vantagens	Desvantagens ou Limitações	Referências
Melhoria dos sistemas de climatização, aquecimento de água e iluminação	<p>Redução significativa do consumo energético, especialmente em edificações comerciais;</p> <p>Redução da emissão de gases de efeito estufa;</p> <p>Melhoria do conforto térmico e visual dos usuários;</p> <p>Baixo custo de instalação e manutenção (sistemas de iluminação, automação predial e uso de medidores inteligentes).</p>	Elevado custo de instalação e manutenção (sistemas de climatização e substituição de equipamentos tradicionais).	(AGHAMOLAEI; GHAANI, 2020; ALKHATEEB; HIJLEH, 2017; BERTONE <i>et al.</i> , 2018; LIAPOPOULOU; THEODOSIOU, 2020; RABANI; MADESSA; NORD, 2017)
Fontes renováveis de energia	<p>Redução significativa ou total do consumo energético da edificação;</p> <p>Redução significativa ou total da emissão de gases de efeito estufa;</p> <p>Possibilidade de uso como elementos de sombreamento solar, com melhoria do conforto térmico e visual dos usuários.</p>	<p>Produção de energia pode ser descontínua e instável;</p> <p>Elevado custo de instalação (painéis fotovoltaicos);</p> <p>Requer disponibilidade de espaço;</p> <p>Depende das condições climáticas do local.</p>	(ABIDIN <i>et al.</i> , 2019; BRUNORO <i>et al.</i> , 2018; KAEWUNRUEN; SRESAKOOLCHAI; KERINNONTA, 2019; LIAPOPOULOU; THEODOSIOU, 2020; NGUYEN; BOKEL; DOBBELSTEEN, 2017; YANG, 2017; ZHOU <i>et al.</i> , 2016)
Isolamento térmico do envelope	<p>Redução do consumo energético para aquecimento e/ou resfriamento;</p> <p>Redução da emissão de gases de efeito estufa;</p> <p>Melhoria do conforto térmico e visual dos usuários;</p> <p>Baixo custo de instalação e manutenção;</p> <p>Melhoria da aparência da edificação.</p>	<p>Desempenho energético depende significativamente das condições climáticas do local;</p> <p>Restrições em edificações históricas.</p>	(ALKHATEEB; HIJLEH, 2017; BALOCCO; COLAIANNI, 2018; FARGHALY; HASSAN, 2019; KAEWUNRUEN; SRESAKOOLCHAI; KERINNONTA, 2019; LEE; SHEPLEY; CHOI, 2019; LIAPOPOULOU; THEODOSIOU, 2020; LIU; LIU; LI, 2019; MAURO <i>et al.</i> , 2019; YANG, 2017; ZHOU <i>et al.</i> , 2016)

Quadro 2 – Principais vantagens e desvantagens das estratégias de *retrofit* abordadas nos artigos analisados (continuação)

Estratégia	Vantagens	Desvantagens ou Limitações	Referências
Materiais de mudança de fase	Redução do consumo energético, principalmente para resfriamento; Melhoria do conforto térmico dos usuários.	Elevado custo de instalação; Dificuldades técnicas de instalação; Escassez de informações sobre o desempenho.	(ASCIONE <i>et al.</i> , 2019; BERARDI; MANCA, 2017)
Iluminação natural	Redução do consumo energético; Melhoria do conforto térmico e visual dos usuários; Melhoria da aparência da edificação.	Desempenho energético influenciado por elementos externos à edificação.	(ABDULLAH; ALIBABA, 2017; ABIDIN <i>et al.</i> , 2019; BUDA; PRACCHI; SANNASARDO, 2019; CHEN; HONG; PIETTE, 2017; NGUYEN; BOKEL; DOBBELSTEEN, 2017)
Ventilação natural e fachada ventilada	Redução do consumo energético, principalmente para resfriamento; Melhoria do conforto térmico dos usuários e da qualidade do ar; Preservação do envelope da edificação (fachada ventilada).	Desempenho energético influenciado por elementos externos à edificação.	(ASCIONE <i>et al.</i> , 2019; NGUYEN; BOKEL; DOBBELSTEEN, 2017; YANG, 2017).
Fachada verde, cobertura verde e cobertura fria	Redução do consumo energético, principalmente para resfriamento; Redução dos gases de efeito estufa; Melhoria do conforto térmico dos usuários e da qualidade do ar; Melhoria da aparência da edificação; Otimização do espaço disponível sobre o envelope da edificação.	Elevado custo de instalação e manutenção; Dificuldades técnicas de instalação; Requer manutenção constante.	(ASCIONE <i>et al.</i> , 2019; LASSANDRO; COSOLA, 2018; MECCA <i>et al.</i> , 2019; RABANI; MADESSA; NORD, 2017)
Uso racional de água	Redução do consumo de água; Baixo custo de instalação (dispositivos de economia de água).	Elevado custo de instalação (aproveitamento de água pluvial e reúso de água cinza); Requer disponibilidade de espaço.	(BALACHANDRAN; MAHANTA; SAMUEL, 2020; BERTONE <i>et al.</i> , 2018; KASTIUKAS; ZHOU, 2019)

3.3.1. Estratégias ativas

Estratégias ativas são aquelas que envolvem o consumo de energia para atender às necessidades humanas, como a eletricidade e o gás natural (NGUYEN; BOKEL; DOBBELSTEEN, 2017). Exemplos deste tipo de estratégia são: melhoria dos sistemas elétricos e mecânicos da edificação – destinados ao aquecimento, resfriamento, ventilação e iluminação – e uso de fontes renováveis de energia, como a energia solar e geotérmica (ALKHATEEB; HIJLEH, 2017; D’AGOSTINO; CUNIBERTI; MASCHIO, 2017).

3.3.1.1. Melhoria dos sistemas da edificação

Os sistemas da edificação são constituídos por sistemas de climatização (aquecimento, resfriamento e ventilação), sistemas de aquecimento da água e sistemas de iluminação (COSTA-CARRAPIÇO; RASLAN; GONZÁLEZ, 2020).

Os sistemas de climatização ou de Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado (AVAC) (em inglês, *Heating, Ventilating and Air-Conditioning* – HVAC) estão relacionados aos tipos e configurações dos aparelhos de aquecimento, resfriamento e ventilação da edificação. A melhoria dos sistemas de condicionamento artificial, como o uso de equipamentos de alta performance, permite significativa redução do consumo energético, especialmente em edificações comerciais (ALKHATEEB; HIJLEH, 2017; RABANI; MADESSA; NORD, 2017). A Figura 6 mostra um exemplo de melhoria do desempenho do sistema de climatização por meio do isolamento dos dutos de ar. Entretanto, é comum a necessidade de elevado investimento inicial para *retrofits* de sistemas AVAC. Fatores a serem levados em consideração para a melhoria desses sistemas são: fontes de aquecimento e resfriamento, unidades terminais internas de ar-condicionado e estratégias de operação (NASTASI; MATTEO, 2017; ZHOU *et al.*, 2016).

Figura 6 – Melhoria no sistema de climatização a partir do isolamento dos dutos de ar



Fonte: Adaptado de Tulley, Zhivov e Clark (2017)

Uma alternativa relacionada à ventilação é o sistema de ventilação mecânica com recuperação de calor (em inglês, *Mechanical Ventilation with Heat Recovery – MVHR*), que permite reduzir o consumo energético em edificações e melhorar o conforto térmico dos usuários. Esse sistema proporciona condições de calor e umidade adequadas conforme o clima do local em que é instalado – por exemplo, ambiente frio e desumidificado para climas ou estações quentes e úmidas (LEE; SHEPLEY; CHOI, 2019).

Os sistemas de aquecimento da água, como estratégia ativa, podem operar por energia elétrica ou a gás. A melhoria desses sistemas está relacionada à substituição parcial ou total de seus componentes por modelos com melhor desempenho energético – como as caldeiras de aquecimento ou *boilers* (CUCCA; IANAKIEV, 2020; GUARDIGLI *et al.*, 2018).

A melhoria da eficiência energética nos sistemas de iluminação como estratégia ativa abrange o uso de sistemas de alta performance aliados a controles inteligentes (AGHAMOLAEI; GHAANI, 2020). Em geral, a melhoria do sistema de iluminação é uma maneira eficiente e de baixo custo para redução da demanda energética (BERTONE *et al.*, 2018; IZIEADIANA *et al.*, 2020). Buda, Pracchi e Sannasardo (2019) ressaltam que a tipologia da edificação e os modelos de lâmpadas utilizados podem afetar o consumo

energético por sistemas de iluminação, enquanto a idade e a técnica construtiva da edificação não apresentam influência.

A automação predial compreende o ajuste automático de aparelhos e dispositivos de acordo com as condições ambientais e as demandas dos usuários. Nos sistemas de climatização, está relacionada às configurações dos aparelhos de aquecimento, resfriamento e ventilação da edificação – como, por exemplo, modo de operação e temperatura de *set-point* do ar-condicionado. Nos sistemas de iluminação, está associada ao uso de sensores de luz e de movimento ou presença, a *dimmers* (dispositivos que permitem controlar a intensidade de iluminação) e a controles automáticos de sombreamento solar (ABDELRAZEK; YILMAZ, 2020; COSTA-CARRAPIÇO; RASLAN; GONZÁLEZ, 2020; IZIEADIANA *et al.*, 2020). Assim, a automação predial pode contribuir com a eficiência operacional, a economia de energia e a redução dos custos.

Também é possível reduzir o consumo energético ao substituir equipamentos tradicionais por modelos energeticamente eficientes, como máquina de lavar louça, máquina de lavar roupa, geladeira, entre outros. Essa melhoria de equipamentos frequentemente utilizados em edificações pode requerer elevado investimento, porém contribui significativamente para a redução de gases de efeito estufa (LIAPOPOULOU; THEODOSIOU, 2020).

Além disso, pode-se usar medidores inteligentes na edificação, que permitem identificar o consumo de cada equipamento ligado à rede elétrica. Segundo Liapopoulou e Theodosiou (2020), esta estratégia apresenta baixo custo de instalação, nenhum custo de manutenção e contribuição moderada para redução de gases de efeito estufa.

3.3.1.2. Fontes renováveis de energia

A implantação de sistemas de geração de energia renovável *in loco* – isto é, na edificação ou em seu terreno – permite reduzir parcial ou completamente o custo com energia elétrica em uma edificação, visto que a geração de energia no local compensa o seu consumo energético. Simultaneamente, há redução da carga energética provinda do sistema coletivo de fornecimento de energia elétrica (YANG, 2017). Embora o custo de instalação desses sistemas seja comumente elevado, o período de retorno do investimento tende a ser menor, devido à contribuição para geração de energia (FERRANTE; FOTOPOULOU; MAZZOLI, 2020). Além disso, a energia renovável é limpa e segura, visto que a geração de energia não gera emissão de gases poluentes (ABIDIN *et al.*, 2019; YANG, 2017). No entanto, destaca-se

que a produção de energia pode ser descontínua e instável (YANG, 2017). Exemplos comuns deste tipo de estratégia são painéis fotovoltaicos e bombas de calor geotérmicas.

Habibi, Obonyo e Memari (2020) afirmam que a integração de tecnologias fotovoltaicas no ambiente construído está se tornando cada vez mais reconhecida por sua capacidade de produção de energia renovável. Estudos apontam possíveis fatores que podem influenciar a implantação de sistemas fotovoltaicos, como: clima e radiação solar do local, condições do entorno da edificação, disponibilidade de espaço – seja sobre o telhado ou em área livre do terreno – e infraestrutura de suporte para os módulos solares (BRUNORO *et al.*, 2018; KAEWUNRUEN; SRESAKOOLCHAI; KERINNONTA, 2019).

Segundo Farghaly e Hassan (2019), os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em dois tipos: sistema fotovoltaico anexado à edificação (em inglês, *Building Attached Photovoltaic* – BAPV) e sistema fotovoltaico integrado à edificação (em inglês, *Building Integrated Photovoltaic* – BIPV). Os painéis fotovoltaicos anexados à edificação não apresentam impacto sobre a estrutura e as funções da edificação (FARGHALY; HASSAN, 2019).

Os painéis fotovoltaicos integrados à edificação (Figura 7) são uma tecnologia que tem ganhado destaque recentemente e consistem na incorporação de módulos fotovoltaicos em elementos da edificação, como paredes externas, janelas e cobertura (ARDIANI *et al.*, 2018; HABIBI; OBONYO; MEMARI, 2020; HEJTMÁNEK *et al.*, 2017). É uma estratégia multifuncional, visto que permite melhorar a performance energética do envelope da edificação e produzir energia a partir da radiação solar (BALACHANDRAN; MAHANTA; SAMUEL, 2020; SARETTA; CAPUTO; FRONTINI, 2019). Uma possibilidade é o aproveitamento dos painéis fotovoltaicos como elementos de sombreamento solar (Figura 8), que – além de gerar energia renovável – permite o controle da entrada de iluminação natural e da radiação solar nos ambientes internos, melhorando o conforto visual e térmico (ABDULLAH; ALIBABA, 2017; BALACHANDRAN; MAHANTA; SAMUEL, 2020).

Figura 7 – Detalhe dos painéis fotovoltaicos integrados à edificação



Fonte: Habibi, Obonyo e Memari (2020)

Figura 8 – Painéis fotovoltaicos usados como dispositivos de sombreamento solar



Fonte: Gianfrate *et al.* (2017)

Conhecimentos importantes a serem levados em consideração para a escolha de painéis fotovoltaicos integrados à edificação são: geometria da edificação, propriedades do envelope da edificação, consumo energético, irradiação solar e contexto urbano (SARETTA;

CAPUTO; FRONTINI, 2019). Visto que a irradiação solar depende do período do dia, da época do ano e do clima, também é importante considerar as variações temporais diárias e anuais do consumo e da produção de energia (SARETTA; CAPUTO; FRONTINI, 2019). Recomenda-se a sua instalação em fachadas amplas e com elevada incidência solar ao longo do ano, a fim de ter maior aproveitamento da radiação solar (ARDIANI *et al.*, 2018).

Uma variação desta alternativa são os painéis fotovoltaicos térmicos integrados à edificação (em inglês, *Building Integrated Photovoltaic Thermal Systems – BIPVT*), que produzem eletricidade e calor simultaneamente (HABIBI; OBONYO; MEMARI, 2020). Eles combinam componentes fotovoltaicos e térmicos em uma única unidade e possuem elevado potencial de conversão da energia solar (HABIBI; OBONYO; MEMARI, 2020). Um estudo realizado em edificações residenciais multifamiliares na Grécia identificou que a instalação de painéis fotovoltaicos térmicos apresentou alto custo de instalação e elevada contribuição para redução de gases de efeito estufa (LIAPOPOULOU; THEODOSIOU, 2020).

Abdullah e Alibaba (2017) e Balachandran, Mahanta e Samuel (2020) recomendam o uso de sistemas de rastreamento de eixo duplo para painéis fotovoltaicos com elevada demanda de energia. Essa estratégia permite aos painéis rotacionarem em relação a dois eixos, a fim de receberem maior quantidade de radiação solar a cada momento do dia, o que aumenta significativamente a geração de eletricidade.

Diferentemente dos painéis fotovoltaicos, os coletores solares são utilizados para aquecimento de água de forma passiva – ou seja, são sistemas que convertem a radiação solar em energia térmica que esquentam a água (NOCERA *et al.*, 2017). A Figura 9 mostra um exemplo da utilização de painéis fotovoltaicos e coletores solares dispostos sobre a cobertura de uma edificação comercial.

Figura 9 – Instalação de painéis fotovoltaicos e coletores solares sobre a cobertura de uma edificação



Fonte: Brambilla *et al.* (2018)

Outra estratégia é o uso de bomba de calor geotérmica acoplada ao solo (em inglês, *Ground Source Heat Pump – GSHP*), cuja energia pode ser utilizada para aquecimento e resfriamento da edificação (PACCHIEGA; FAUSTI, 2017; ZHOU *et al.*, 2016). É um sistema central de aquecimento ou resfriamento que transfere calor entre o solo e a edificação, utilizando a terra como fonte de calor no inverno ou dissipadora de calor no verão, em substituição aos sistemas elétricos ou a gás. A instalação de bomba de calor geotérmica acoplada ao solo requer disponibilidade de espaço no terreno da edificação e escavações no solo, podendo apresentar elevado custo (BRUNORO *et al.*, 2018; NGUYEN; BOKEL; DOBBELSTEEN, 2017). Entretanto, este sistema geralmente apresenta custos de implantação e manutenção inferiores em comparação às outras alternativas de fontes renováveis de energia (ZHOU *et al.*, 2016).

3.3.2. Estratégias passivas

Estratégias passivas estão associadas ao aproveitamento de recursos naturais, sem convertê-los primeiro em energia elétrica, para manter as edificações em condições adequadas à ocupação humana (NGUYEN; BOKEL; DOBBELSTEEN, 2017). De modo geral, são consideradas as alternativas mais viáveis e eficazes para economia energética e financeira

(ALKHATEEB; HIJLEH, 2017). Exemplos de estratégias passivas são: isolamento térmico do envelope, uso de materiais de mudança de fase, iluminação natural, ventilação natural, fachada ventilada, fachada verde, cobertura verde, cobertura fria e uso racional de água.

3.3.2.1. Isolamento térmico do envelope

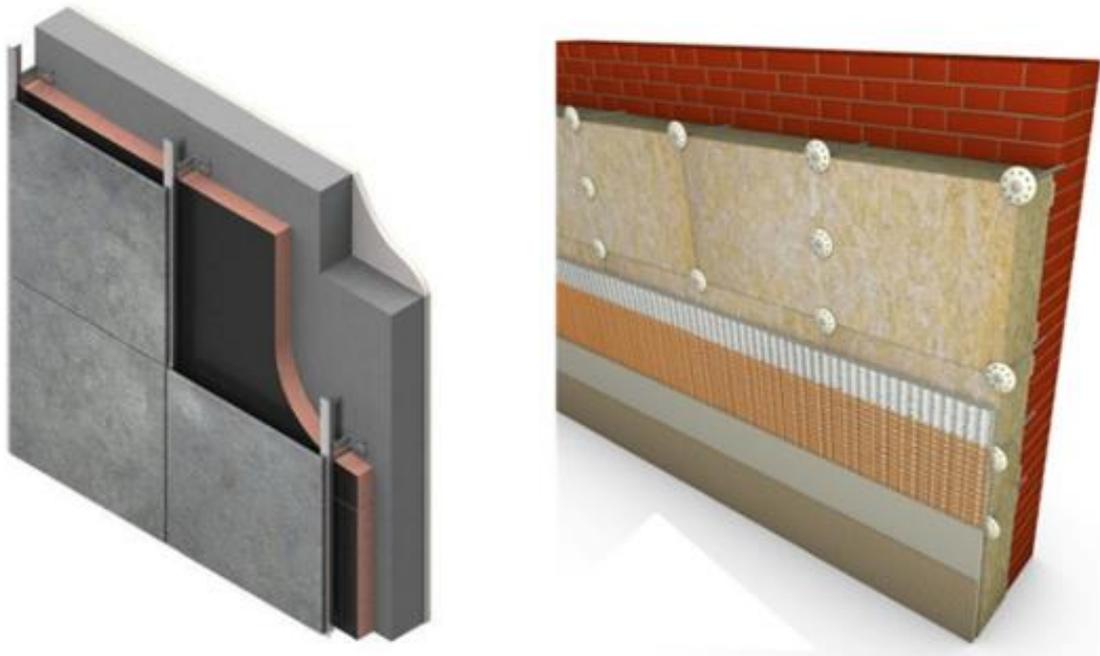
O envelope de uma edificação é constituído por paredes externas, esquadrias, piso e cobertura, representando a camada mais externa de uma edificação, que separa os seus ambientes internos e externos (FARGHALY; HASSAN, 2019; KAEWUNRUEN; SRESAKOOLCHAI; KERINNONTA, 2019; TROVATO; NOCERA; GIUFFRIDA, 2020). Assim, o isolamento térmico do envelope da edificação abrange o isolamento das paredes externas, do piso e da cobertura, bem como a melhoria ou substituição das portas e janelas da edificação (COSTA-CARRAPIÇO; RASLAN; GONZÁLEZ, 2020; POMBO; RIVELA; NEILA, 2016; ZHOU *et al.*, 2016). Os principais fatores a serem considerados são: tipo, espessura e propriedades térmicas dos materiais utilizados (COSTA-CARRAPIÇO; RASLAN; GONZÁLEZ, 2020).

O isolamento do envelope da edificação (em inglês, *building envelope insulation*) é uma das principais estratégias utilizadas para redução do consumo energético devido ao aquecimento ou resfriamento da edificação, visto que permite reduzir ou aumentar a transferência de calor entre os ambientes internos e externos da edificação (BALOCCO; COLAIANNI, 2018; FARGHALY; HASSAN, 2019; KAEWUNRUEN; SRESAKOOLCHAI; KERINNONTA, 2019; LEE; SHEPLEY; CHOI, 2019; LIU; LIU; LI, 2019; MAURO *et al.*, 2019; ZHOU *et al.*, 2016). Em geral, é uma boa alternativa de *retrofit* por melhorar a condição física e as propriedades térmicas das camadas externas da edificação, principalmente em locais de climas extremos (AGHAMOLAEI; GHAANI, 2020).

Ressalta-se a importância de considerar o uso de materiais sustentáveis para a isolamento térmico do envelope da edificação, cuja origem e destino apresentem reduzido impacto ambiental (BALACHANDRAN; MAHANTA; SAMUEL, 2020; LUCCHI; DELERA, 2020; PITTAU *et al.*, 2019; SATTLER; ÖSTERREICHER, 2019; TROVATO; NOCERA; GIUFFRIDA, 2020). Segundo Habibi, Obonyo e Memari (2020), é importante verificar se os materiais selecionados para os diferentes componentes da edificação possuem propriedades térmicas, acústicas e visuais adequadas para cada caso – como condutividade e resistência térmica, transmissão de luminosidade e ruídos, infiltração de ar, entre outros.

O isolamento térmico das paredes externas da edificação pode ser melhorado com o aumento da espessura da própria parede ou com a adição de um isolante térmico sobreposto às paredes externas em sua face interna ou externa – seja por meio de suportes ou em contato direto com a edificação (SALVALAI; SESANA; IANNACCONE, 2017). A Figura 10 apresenta um exemplo de isolamento de parede cortina e de placas de isolamento térmico para paredes de uma edificação.

Figura 10 – Isolamento térmico das paredes de uma edificação



(a) Isolamento de parede cortina

(b) Placas de isolamento térmico

Fonte: Adaptado de Abu-Hijleh *et al.* (2017)

No estudo de Zhou *et al.* (2016), os resultados mostraram que os elementos do envelope de uma edificação comercial na China que apresentaram redução do consumo energético pós-*retrofit* foram, do melhor ao pior: janelas, paredes externas e telhado – a melhoria deste apresentou menor impacto sobre o consumo energético devido à sua pequena área. Liapopoulou e Theodosiou (2020) verificaram que o isolamento do envelope da edificação apresenta custo de instalação relativamente baixo, nenhum custo de manutenção e contribuição moderada para redução de gases de efeito estufa. Em regiões de clima quente, recomenda-se o isolamento das paredes externas e do telhado das edificações para economia de energia para resfriamento (ALI; AL-HASHLAMUN, 2019).

A melhoria ou substituição dos componentes de janelas melhora o isolamento da edificação, visto que os vidros utilizados em janelas apresentam, em geral, maior

transmitância térmica em relação aos demais materiais presentes nas fachadas das edificações. Assim, o uso de janelas com maior resistência térmica permite reduzir as perdas de calor e aproveitar a radiação solar de maneira adequada em locais de clima frio ou no inverno, garantindo economia energética e melhoria do conforto térmico e visual dos usuários na edificação (BALOCCO; COLAIANNI, 2018). Os principais fatores a serem considerados são: número de camadas, tipo e propriedades térmicas do vidro utilizado, tipo da esquadria da janela e razão janela-parede (COSTA-CARRAPIÇO; RASLAN; GONZÁLEZ, 2020). Na Figura 11, apresenta-se um exemplo de *retrofit* das janelas de uma edificação após a substituição de seus componentes.

Figura 11 – Substituição das janelas de uma edificação



(a) Janela original de madeira



(b) Janela de alumínio após *retrofit*

Fonte: Adaptado de Mancini *et al.* (2017)

Liapopoulou e Theodosiou (2020) verificaram que janelas com diferentes orientações e exposições à radiação solar devem ser associadas a vidros específicos. Os autores afirmam que vidros de baixa emissividade (em inglês, *low-E glass*) reduzem a transmissão de calor pelo material, sem diminuir a luminosidade que passa para os ambientes internos da edificação. O seu objetivo é maximizar o ganho térmico solar no inverno e minimizar no verão, portanto vidros de baixa emissividade são indicados para serem utilizados em janelas com ganhos térmicos significativos no verão.

Outro fator relevante a ser considerado é a razão janela-parede (em inglês, *Window-to-Wall Ratio – WWR*), que corresponde à razão entre a área de abertura das janelas e a área das

paredes externas incluindo as janelas. Zhou *et al.* (2016) destacam que, em geral, as janelas apresentam coeficiente de transmitância térmica superior às paredes externas, devido à passagem de radiação solar pelos vidros. Assim, o aumento da razão janela-parede resulta em maior carga de resfriamento necessária em locais de clima quente e menor carga de aquecimento em regiões de clima frio. Simultaneamente, o aumento da área de janelas eleva a iluminação natural nos ambientes internos da edificação, reduzindo o consumo energético utilizado para iluminação artificial e possivelmente aumentando o conforto visual dos usuários.

A melhoria da performance do envelope das edificações é geralmente mais viável em comparação a outras estratégias – como melhoria dos sistemas de condicionamento artificial – apesar de muitas vezes apresentar menor potencial de economia energética (ALKHATEEB; HIJLEH, 2017). Ademais, *retrofits* do envelope da edificação são, em geral, mais econômicos do que a construção de um novo envelope (FARGHALY; HASSAN, 2019).

3.3.2.2. Materiais de mudança de fase

Materiais de mudança de fase (em inglês, *Phase Change Materials* – PCM) são tecnologias inovadoras, capazes de absorver energia na forma de calor latente ao longo do processo de fusão e liberá-la durante a solidificação (ASCIONE *et al.*, 2019; BERARDI; MANCA, 2017; LASSANDRO; COSOLA, 2018). Essa estratégia tem sido fortemente estudada nos últimos anos, visto o significativo aumento do número de trabalhos publicados envolvendo este tema (ASCIONE *et al.*, 2019; BERARDI; MANCA, 2017; HOSSEINI; SHIRMOHAMMADI; ASLANI, 2020; LASSANDRO; COSOLA, 2018).

O uso de materiais de mudança de fase reduz a transferência de calor para o interior da edificação e aumenta a inércia e a capacidade de armazenamento térmico da edificação – isto é, o calor armazenado nas paredes externas é transmitido horas depois ao interior da edificação (ASCIONE *et al.*, 2019). Em edificações não-residenciais com ocupação durante o dia, evita-se o superaquecimento da edificação e reduz-se o consumo energético necessário para resfriamento, melhorando a performance energética da edificação especialmente no verão (ASCIONE *et al.*, 2019). Por outro lado, em edificações residenciais com maior ocupação noturna, essa estratégia transfere o pico de aquecimento da edificação para o final da tarde e início da noite, podendo ser empregada em locais de clima frio para redução do consumo energético para aquecimento. Em ambos os casos, permite melhoria do conforto térmico dos usuários (ASCIONE *et al.*, 2019; BERARDI; MANCA, 2017). As Figuras 12 e

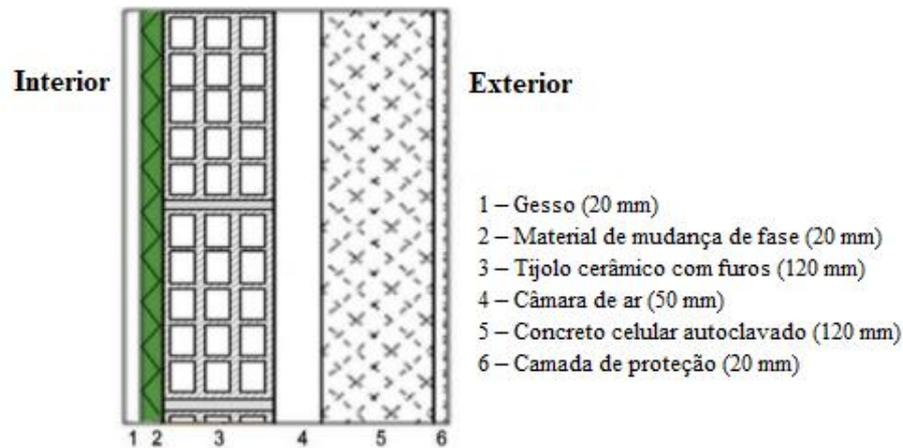
13 apresentam exemplos, respectivamente, de uma manta de material de mudança de fase oriundo de extrato vegetal e da aplicação deste material para isolamento térmico das paredes de uma edificação.

Figura 12 – Manta de material de mudança de fase



Fonte: Berardi e Manca (2017)

Figura 13 – Aplicação de material de mudança de fase para isolamento das paredes de uma edificação



Fonte: Adaptado de Ascione *et al.* (2019)

Materiais de mudança de fase podem ser utilizados no envelope da edificação, sendo comumente aplicados na superfície interna de fachadas (ASCIONE *et al.*, 2019; BERARDI; MANCA, 2017). Esses materiais são sensíveis à variação climática e aos ganhos de calor interno da edificação (BERARDI; MANCA, 2017). A performance energética dos materiais de mudança de fase é geralmente maior no verão, com redução do consumo energético para

resfriamento, enquanto nos meses mais frios o seu potencial é bastante reduzido ou nulo (BERARDI; MANCA, 2017; HOSSEINI; SHIRMOHAMMADI; ASLANI, 2020).

Por ser uma tecnologia recente, há pouco conhecimento sobre a sua performance em diferentes superfícies e tipos de edificação (ASCIONE *et al.*, 2019). Além disso, os materiais de mudança de fase possuem custo relativamente elevado e difícil instalação (ASCIONE *et al.*, 2019). Desta forma, é importante que a aplicação dessa estratégia seja adequadamente simulada e avaliada para cada caso específico, a fim de verificar se a sua implementação é energeticamente e economicamente viável em determinada edificação (BERARDI; MANCA, 2017).

3.3.2.3. Iluminação natural

A otimização da iluminação natural é fundamental para reduzir o consumo energético por sistemas de iluminação, além de melhorar o conforto visual dos usuários (ABIDIN *et al.*, 2019; BUDA; PRACCHI; SANNASARDO, 2019; ELIOPOULOU; MANTZIOU, 2017). Estratégias que podem contribuir nesse sentido são: adequada localização e dimensão de janelas nas fachadas da edificação, presença de claraboias com entrada de luz natural e utilização de dispositivos de controle da intensidade de iluminação (ABIDIN *et al.*, 2019). A Figura 14 mostra um exemplo de *design* que favorece a entrada de iluminação natural na edificação, com diversas superfícies transparentes.

Figura 14 – Otimização da iluminação natural a partir do *design* adequado da edificação



Fonte: Brambilla *et al.* (2018)

Uma maneira de aproveitar adequadamente a iluminação natural é a partir de sistemas de sombreamento solar, que reduzem a incidência de luz e calor pela radiação solar, diminuindo o consumo energético necessário para resfriamento da edificação (ZHOU *et al.*, 2019). Além disso, melhoram o conforto térmico e visual dos usuários (ABDULLAH; ALIBABA, 2017; ELIOPOULOU; MANTZIOU, 2017). Também é importante considerar a existência de elementos externos à edificação, que podem bloquear parcial ou completamente a passagem dos raios de sol, como a presença de outras construções ou árvores no entorno da edificação (CHEN; HONG; PIETTE, 2017; NGUYEN; BOKEL; DOBBELSTEEN, 2017). A Figura 15 apresenta um exemplo de sistema de sombreamento com uso de elementos com diferentes *designs* sobre o envelope de uma edificação.

Figura 15 – Sistema de sombreamento de uma edificação



Fonte: Alkhateeb e Hijleh (2017)

3.3.2.4. Ventilação natural e fachada ventilada

As estratégias de ventilação natural e fachada ventilada, que são caracterizadas pelo fluxo de ar direto entre os ambientes interno e externo, podem ser utilizadas para redução da temperatura do ar interno e renovação do ar (ASCIONE *et al.*, 2019). A circulação de ar no interior da edificação também auxilia nos processos de convecção do ar e evaporação da umidade da pele dos usuários (NGUYEN; BOKEL; DOBBELSTEEN, 2017). Ressalta-se que a ventilação natural caracteriza a entrada voluntária de ar por meio de aberturas da edificação, permitindo a entrada direta do ar externo para os ambientes internos; enquanto a infiltração de ar se refere à entrada involuntária de ar por meio de frestas presentes no envelope da edificação (LIAPOPOULOU; THEODOSIOU, 2020).

A ventilação natural e a fachada ventilada permitem reduzir o ganho de calor pela edificação, diminuindo o consumo energético para resfriamento e melhorando o conforto térmico e a qualidade do ar interno (ASCIONE *et al.*, 2019; ELIOPOULOU; MANTZIOU, 2017; YANG, 2017). Destaca-se que essas alternativas apresentam efeitos diferentes no verão e no inverno, sendo comumente utilizadas para redução do consumo energético em regiões de clima quente ou subtropical e úmido (LIAPOPOULOU; THEODOSIOU, 2020; NGUYEN; BOKEL; DOBBELSTEEN, 2017). Assim, são estratégias que têm se mostrado bastante eficazes em locais com elevada necessidade de resfriamento da edificação.

De acordo com Ascione *et al.* (2019), a fachada ventilada é composta por uma cavidade entre a superfície da fachada da edificação, com ou sem isolamento térmico, e um revestimento externo – como, por exemplo, defletores externos. Os autores apontam que essa alternativa permite dissipar a radiação solar incidente e reduzir a transferência de calor para a edificação, diminuindo o consumo energético para resfriamento. Além disso, o ar que circula

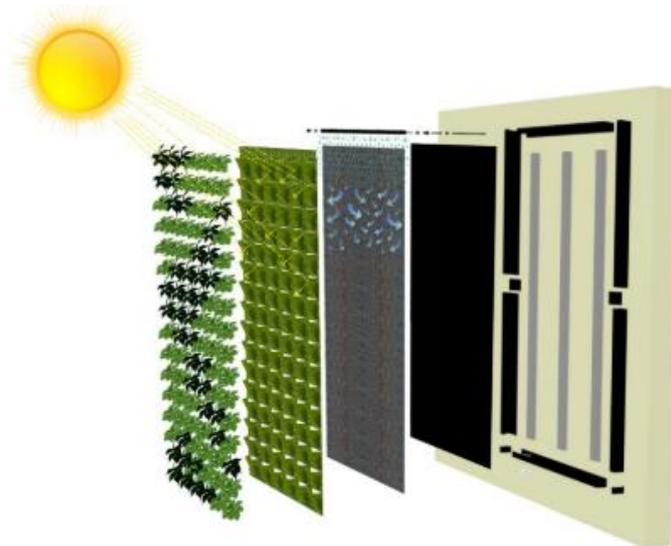
na cavidade pode infiltrar ou entrar por janelas com maior facilidade, melhorando o conforto térmico e a qualidade do ar por meio da renovação do ar interno. Ademais, essa estrutura externa à superfície da fachada contribui para a preservação de seu estado físico.

O uso de sensores em janelas permite que o mecanismo de ventilação natural seja ativado com base na diferença de temperatura entre os meios interno e externo, otimizando a transição entre os tipos de operação em edificações híbridas – que operam com ventilação natural e/ou sistemas de condicionamento artificial.

3.3.2.5. Fachada verde, cobertura verde e cobertura fria

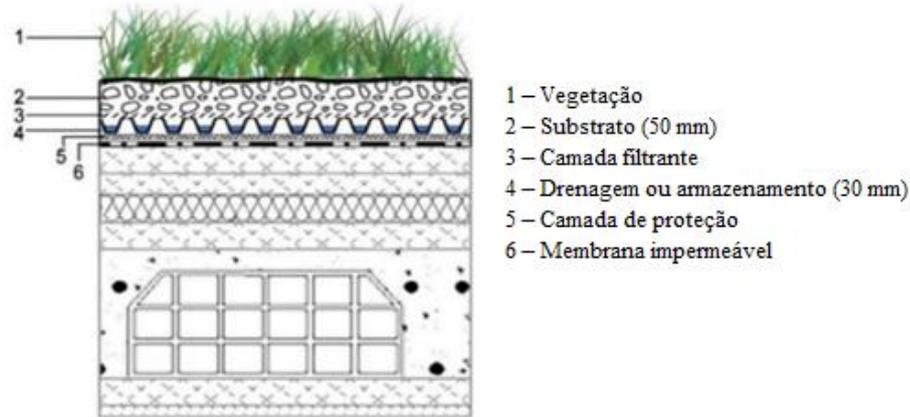
A estratégia de fachada verde (em inglês, *green façade*) ou jardim vertical (em inglês, *green living walls*) constitui uma superfície vertical da edificação coberta por determinada vegetação. De maneira semelhante, a cobertura verde (em inglês, *green roof*) é uma superfície horizontal coberta por vegetação. Devido à redução da transferência de calor através da superfície externa, essas alternativas desempenham papel semelhante ao isolamento térmico do envelope da edificação (MECCA *et al.*, 2019; RABANI; MADESSA; NORD, 2017). Uma vantagem é a otimização do espaço disponível no envelope da edificação, com o aproveitamento de grandes áreas sobre a cobertura e as fachadas (MECCA *et al.*, 2019). Nas Figuras 16 e 17 são apresentados exemplos de sistemas de fachada verde e cobertura verde, respectivamente.

Figura 16 – Sistema de fachada verde



Fonte: Adaptado de Mauro *et al.* (2019)

Figura 17 – Sistema de cobertura verde

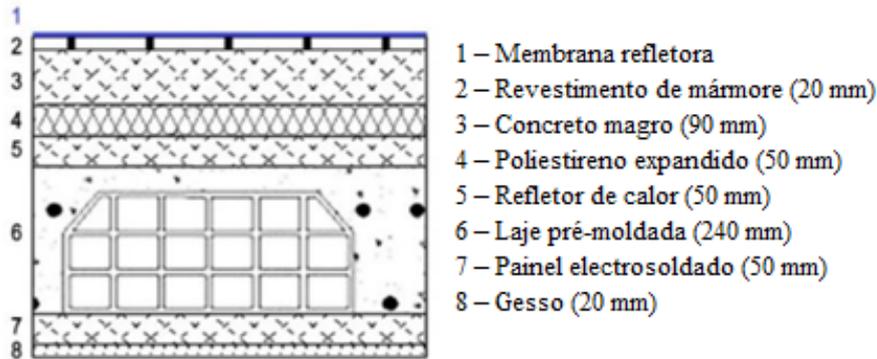


Fonte: Adaptado de Ascione *et al.* (2019)

Além das plantas em si, a fachada verde e a cobertura verde são compostas por camadas de substrato de solo, impermeabilizantes, cavidade de ventilação, dispositivos de ancoragem e possivelmente um sistema automático de irrigação (ASCIONE *et al.*, 2019). Permitem melhorar a performance energética de edificações visto que reduzem a transferência de calor do meio externo para os ambientes internos devido à evapotranspiração e ao sombreamento proporcionado pelas plantas e ao aumento da massa térmica do envelope da edificação (LASSANDRO; COSOLA, 2018; MAURO *et al.*, 2019). Assim, reduzem o consumo energético no verão e no inverno, melhorando o conforto térmico dos usuários e a qualidade do ar (ASCIONE *et al.*, 2019; LASSANDRO; COSOLA, 2018). Além disso, dependendo do sistema instalado, é possível utilizar a vegetação para o tratamento de água cinza, produção de biomassa e absorção de CO₂ (KASTIUKAS; ZHOU, 2019). No entanto, são estratégias complexas e de difícil modelagem e implantação – principalmente a fachada verde – devendo ser adequadamente avaliadas para cada edificação (ASCIONE *et al.*, 2019).

No mesmo sentido, a cobertura fria (em inglês, *cool roof*) é composta por um revestimento com elevada refletância da radiação solar e alta emissão de energia térmica por ondas infravermelhas, aplicado sobre coberturas de edificações (ASCIONE *et al.*, 2019). Está baseada no princípio da transferência de calor, que permite reduzir a temperatura externa da superfície da cobertura e o ganho de calor, reduzindo o consumo energético necessário para resfriamento da edificação (ASCIONE *et al.*, 2019). Essa estratégia é mais eficaz para melhoria da eficiência energética de edificações situadas em regiões de clima quente (RABANI; MADESSA; NORD, 2017). Na Figura 18 consta um exemplo de sistema de cobertura fria.

Figura 18 – Sistema de cobertura fria



Fonte: Adaptado de Ascione *et al.* (2019)

3.3.2.6. *Uso racional de água*

O uso racional de água envolve o aproveitamento de água pluvial, o reúso de água cinza e a utilização de dispositivos redutores de vazão ou pressão, sendo uma importante estratégia para reduzir o consumo de recursos naturais e a melhoria da sustentabilidade nas edificações (BALACHANDRAN; MAHANTA; SAMUEL, 2020; KASTIUKAS; ZHOU, 2019). É possível realizar o aproveitamento de água pluvial por meio de dispositivos coletores de água dispostos sobre a cobertura da edificação ou em seu terreno – como pavimentos permeáveis. Entretanto, o aproveitamento de água pluvial e o reúso de água cinza podem requerer elevado custo de implantação e disponibilidade de espaço para sua implantação.

O emprego de dispositivos de economia de água, como arejadores de torneiras e chuveiros, configura uma alternativa com baixo custo de implantação e bons resultados de economia de água (BERTONE *et al.*, 2018). Entretanto, apesar de seu elevado potencial, o uso racional de água não é frequentemente considerado em *retrofits* de edificações (NGUYEN; BOKEL; DOBBELSTEEN, 2017).

3.4. Métodos de análise e seleção das estratégias de *retrofit*

Esta seção apresenta, com base no conteúdo dos artigos selecionados, os principais métodos e técnicas para seleção das estratégias de *retrofit*, com destaque para a modelagem e simulação energética das edificações a partir do uso de programas computacionais.

3.4.1. Métodos e técnicas para seleção de estratégias

No processo de análise e seleção das estratégias de *retrofit* para uma ou mais edificações, o principal questionamento é como definir o melhor conjunto de alternativas. Para solucionar esta questão, vários métodos têm sido desenvolvidos a fim de auxiliar a tomada de decisão por pesquisadores e profissionais (FERNANDES *et al.*, 2018). É notável na literatura a proposição de métodos com sequência definida de etapas para sistematizar o processo de seleção das estratégias de *retrofit*, a fim de filtrar quais serão posteriormente simuladas e analisadas. Entretanto, ressalta-se que grande parte dos autores escolhem estratégias comumente utilizadas na prática ou citadas na literatura, sem um critério ou método definido. Posteriormente, essas estratégias são testadas por meio de modelagem e simulação energética da edificação, cujos resultados permitem aos autores selecionarem o melhor conjunto de alternativas para *retrofit*.

A sequência padrão empregada pelos estudos envolve avaliação das condições da edificação original; listagem das estratégias de *retrofit* (seja por escolha dos autores ou método definido); modelagem e simulação da edificação com aplicação de estratégias; por fim, análise e comparação dos resultados para seleção do melhor conjunto para *retrofit* (FARGHALY; HASSAN, 2019; KASS *et al.*, 2017). Nota-se que muitos autores desenvolveram métodos próprios ou adaptações de métodos conhecidos na literatura, a depender dos objetivos do estudo e do contexto das edificações analisadas (BALOCCO; COLAIANNI, 2018; CEBALLOS-FUENTEALBA *et al.*, 2019; GONZÁLEZ *et al.*, 2017; NAZI *et al.*, 2017; PIAIA *et al.*, 2019; STIERNON *et al.*, 2019; WU; LI; WU, 2020).

Recentemente, têm ganhado destaque os métodos de análise multi-critério (em inglês, *Multi-Criteria Decision Analysis – MCDA*), que consideram diferentes aspectos para comparação e seleção das estratégias de *retrofit* – como ambiental, econômico, social e técnico (AGHAMOLAEI; GHAANI, 2020; BONAMENTE *et al.*, 2018; D’ALPAOS; BRAGOLUSI, 2018; DIRUTIGLIANO; DELMASTRO; MOGHADAM, 2018; JAFARI; VALENTIN, 2018; MIRZAEI *et al.*, 2020; NAPOLI *et al.*, 2020; SI *et al.*, 2016; TAGLIABUE *et al.*, 2018). Embora ainda seja comum a realização de estudos com foco na eficiência energética da edificação e na viabilidade econômica (BERTONE *et al.*, 2018; CHRISTEN; ADEY; WALLBAUM, 2016; GUARDIGLI *et al.*, 2018), trabalhos recentes consideram também o aspecto técnico e a qualidade do ambiente interno – com análises de qualidade do ar e conforto térmico, visual e acústico (AGHAMOLAEI; GHAANI, 2020; BALOCCO; COLAIANNI, 2018).

Geralmente, esses métodos envolvem definição de critérios com diferentes pesos; atribuição de pontuações às estratégias de *retrofit*, para cada critério; determinação da pontuação global, ponderando cada critério; constituição de um *ranking* das alternativas analisadas, facilitando a seleção para a edificação em questão (DIRUTIGLIANO; DELMASTRO; MOGHADAM, 2018; LIAPOPOULOU; THEODOSIOU, 2020; PERERA *et al.*, 2018). Destaca-se que métodos de análise multi-critério facilitam a tomada de decisão diante de diversas, e muitas vezes complexas, alternativas disponíveis para *retrofit* (D'ALPAOS; BRAGOLUSI, 2018; DIRUTIGLIANO; DELMASTRO; MOGHADAM, 2018; MIRZAEI *et al.*, 2020; NAPOLI *et al.*, 2020; SI *et al.*, 2016; XIA, 2017).

Nota-se que a escolha dos critérios ou indicadores pode influenciar nos resultados finais da simulação energética e, conseqüentemente, do processo de seleção das estratégias de *retrofit* (BONAMENTE *et al.*, 2018; SEKKI; AIRAKSINEN; SAARI, 2017). Assim, é importante definir adequadamente as variáveis a serem consideradas, a depender do contexto do projeto e dos objetivos do estudo. Alguns trabalhos apontam o uso de algoritmos de otimização, para auxiliar no processo de identificação das melhores estratégias de *retrofit* (AGHAMOLAEI; GHAANI, 2020; BONAMENTE *et al.*, 2018; CEBALLOS-FUENTEALBA *et al.*, 2019; JAFARI; VALENTIN, 2018; MIRZAEI *et al.*, 2020; WU; LI; WU, 2020).

Outra técnica utilizada para aprimorar a seleção das estratégias de *retrofit* é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (em inglês, *Life Cycle Analysis – LCA*), que compreende a análise dos impactos ambientais e econômicos ao longo de toda a vida útil da edificação, envolvendo as etapas de construção, operação, manutenção e demolição (MAURO *et al.*, 2017; POMBO; RIVELA; NEILA, 2016; SATTLER; ÖSTERREICHER, 2019; TAGLIABUE *et al.*, 2018; TROVATO; NOCERA; GIUFFRIDA, 2020). São considerados todos os processos relacionados à edificação e seus componentes, incluindo a produção, transporte, uso na construção e disposição final dos materiais empregados (JORGJI *et al.*, 2019; TROVATO; NOCERA; GIUFFRIDA, 2020). Os principais resultados fornecem valores globais de consumo energético e emissão de gases de efeito estufa ao longo da vida útil da edificação, para cada cenário considerado. Desta forma, a realização de Avaliação do Ciclo de Vida contribui para a análise de *retrofit* em edificações existentes, bem como sua comparação com a demolição e reconstrução (MARIQUE; ROSSI, 2018).

Em comparação à realização de *retrofit* em uma edificação específica, a consideração de escala regional apresenta diversos benefícios, como melhoria de alta quantidade de edificações, redução do custo global e maior incentivo governamental. No entanto, torna-se

mais complexo obter informações e realizar a modelagem e simulação de elevado número de edificações (ALI *et al.*, 2020). Em vista da viabilidade técnico-econômica do projeto, geralmente é considerada para análise uma amostra significativa do conjunto de edificações em questão (SARETTA; CAPUTO; FRONTINI, 2019).

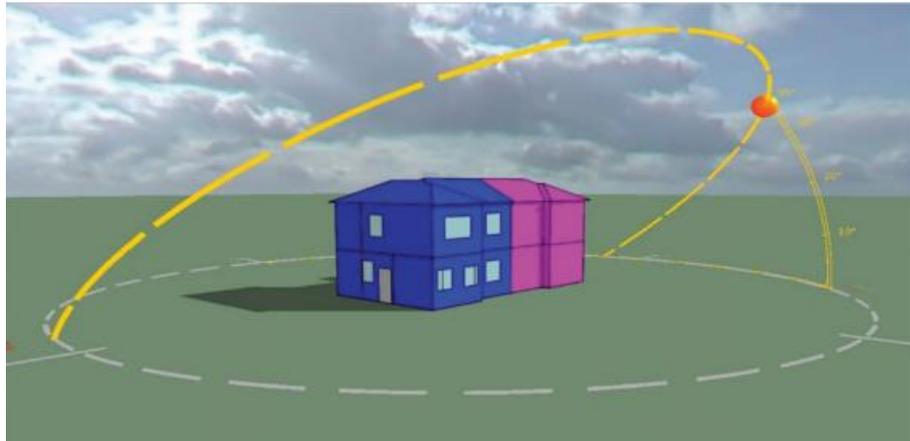
Nesse sentido, alguns métodos têm sido desenvolvidos para auxiliar a determinação de estratégias de *retrofit* em larga escala, a partir da modelagem e simulação energética de um conjunto de edificações (DROUILLES *et al.*, 2019; JOHANSSON; OLOFSSON; MANGOLD, 2017; MOGHADAM *et al.*, 2019; PAIHO *et al.*, 2019; TRENCHER; HEIJDEN, 2019; ZHANG *et al.*, 2018). Para isso, são necessárias informações disponíveis acerca de dados geográficos, distribuição e densidade de edificações, características das edificações, desempenho energético, entre outros. Destaca-se que, nos últimos anos, diversos estudos têm abordado o conceito de modelagem da informação da construção (em inglês, *Building Information Modeling – BIM*), cujo objetivo é desenvolver uma representação precisa das características físicas e funcionais de uma ou mais edificações (LI; XU; FAN, 2019; SANHUDO *et al.*, 2018).

Neste trabalho, observou-se que aproximadamente 7% e 13% dos artigos selecionados consideraram os conceitos de análise multi-critério e Avaliação do Ciclo de Vida, respectivamente. Ademais, em torno de 11% dos estudos envolveram análises de qualidade do ambiente interno.

3.4.2. Modelagem e simulação energética com utilização de programas computacionais

A modelagem e a simulação energética de edificações têm se tornado ferramentas comumente utilizadas por pesquisadores e profissionais nas últimas décadas (ABU-HIJLEH *et al.*, 2017). Nota-se na literatura a quantidade expressiva de trabalhos que se baseiam neste método para avaliação da sustentabilidade e da performance energética das edificações, por meio do emprego de programas computacionais disponíveis comercialmente. Na Figura 19, é apresentado um exemplo de modelagem da edificação a ser utilizada para simulação energética.

Figura 19 – Modelagem da edificação a ser utilizada para simulação energética



Fonte: Adaptado de Lingard (2020)

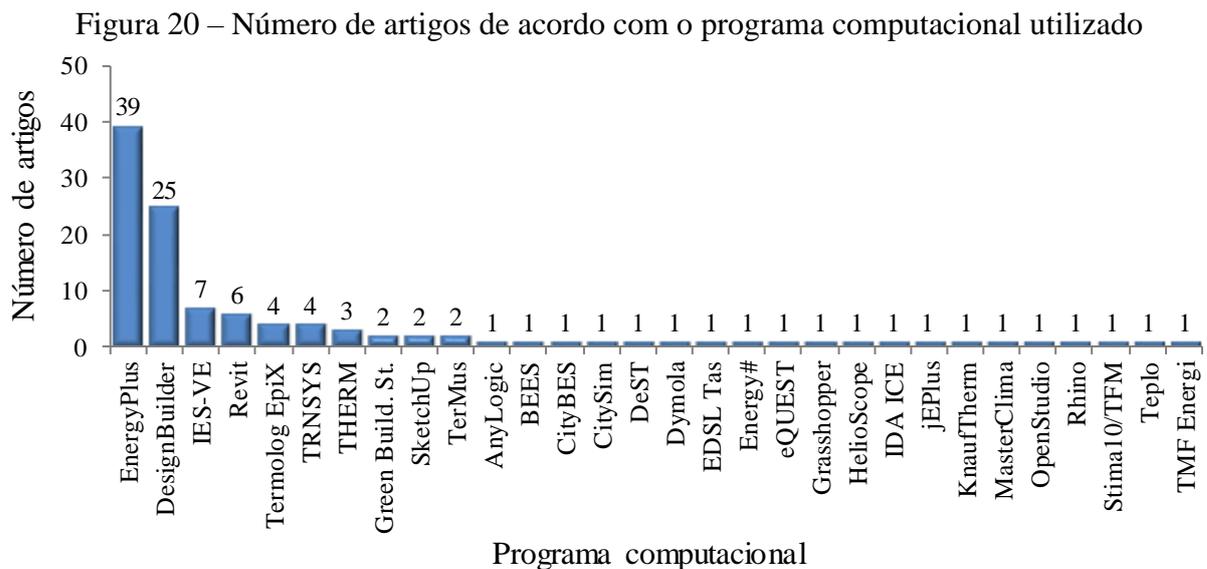
Diversos autores ressaltam que os principais programas computacionais utilizados para modelagem e simulação do desempenho energético de edificações são: AutoCAD, Revit, SketchUp, OpenStudio, DesignBuilder, Green Building Studio, DOE, eQUEST, Ecotect, EnergyPlus, Integrated Environmental Solutions – Virtual Environment (IES-VE), TRNSYS, entre outros (ABDULLAH; ALIBABA, 2017; ABU-HIJLEH *et al.*, 2017; COSTA-CARRAPIÇO; RASLAN; GONZÁLEZ, 2020; CUCCA; IANAKIEV, 2020; SANHUDO *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2018). Essas ferramentas têm sido utilizadas por pesquisadores a fim de avaliar o consumo energético das edificações e a qualidade do ambiente interno (ABU-HIJLEH *et al.*, 2017; TALEB, 2016).

Esses programas computacionais permitem avaliar o desempenho energético da edificação em sua condição original e visualizar os resultados após a realização de *retrofit*, por meio da implantação de diferentes estratégias – simuladas isoladamente ou em conjunto (ABU-HIJLEH *et al.*, 2017). É comum a utilização conjunta de ferramentas de modelagem e simulação, havendo interação entre as informações de cada programa computacional e facilitando a obtenção de bons resultados (COSTA-CARRAPIÇO; RASLAN; GONZÁLEZ, 2020). A simulação dinâmica é fundamental para a escolha do melhor conjunto de estratégias de *retrofit*, que apresente elevado potencial ambiental, econômico, social e/ou técnico (LASSANDRO; COSOLA, 2018). Portanto, a simulação auxilia os profissionais quanto à tomada de decisão para os projetos, com base nos resultados obtidos (LEE; SHEPLEY; CHOI, 2019).

Destaca-se que essas ferramentas devem ser utilizadas considerando-se as particularidades de diferentes tipologias de edificação, regiões e climas. Parâmetros comumente considerados para modelagem e simulação de edificações são: localização e

contexto, geometria, propriedades dos materiais, sistemas da edificação e modo de operação, entre outros (SANHUDO *et al.*, 2018). Diante da diversidade de programas disponíveis para simulação energética das edificações, a escolha da melhor ferramenta é baseada nos objetivos do estudo e nos resultados que podem ser obtidos (ABDELRAZEK; YILMAZ, 2020). As principais características procuradas em programas computacionais são facilidade de utilização, possibilidade de integração com outras ferramentas, apresentação e confiabilidade dos resultados (CADELANO *et al.*, 2019).

A Figura 20 mostra os principais programas computacionais utilizados nos artigos selecionados, considerando-se que cada estudo pode utilizar nenhuma, uma ou mais ferramentas de modelagem e simulação. Nota-se que os programas mais empregados foram EnergyPlus (34,2%), DesignBuilder (21,9%), IES-VE (6,1%) e Revit (5,3%). Portanto, verifica-se que os resultados deste trabalho foram condizentes com as observações da literatura.



3.5. Análise dos estudos de caso

Nesta seção, foram considerados os 121 estudos de caso realizados nos artigos selecionados, excluindo-se das análises os estudos teóricos e revisões de literatura.

Sabe-se que edificações com distintas tipologias estão relacionadas a diferentes requisitos técnicos e necessidades dos usuários (KIM; YU, 2018; LAZZERONI *et al.*, 2017). Assim, a fim de avaliar as principais estratégias de *retrofit* identificadas para tipologias específicas de edificações, são apresentadas a seguir as particularidades quanto a edificações

residenciais, não-residenciais e outras tipologias. A partir disso, são discutidos e comparados os resultados obtidos pelos estudos de caso.

Uma tabela-resumo é apresentada no Apêndice A, em que constam a referência, o local de estudo, o clima, a tipologia da edificação, o tipo de edificação, o número de edificações consideradas, a época de construção da edificação, os aspectos envolvidos nas análises do estudo, as estratégias de *retrofit* consideradas e os programas computacionais de modelagem e/ou simulação energética utilizados em cada estudo de caso. Os espaços em branco significam que o estudo não considerou determinada categoria (por exemplo, está em branco pois a edificação não é comercial nem pública) ou representam ausência de informação sobre o assunto no artigo (por exemplo, não está explícito se a edificação é histórica ou em que época foi construída).

3.5.1. Edificações residenciais

Edificações residenciais podem ser unifamiliares ou multifamiliares e são caracterizadas por alto tempo de permanência dos usuários, principalmente no período noturno. Em geral, o setor residencial apresenta elevada variabilidade de características e requisitos, cujo desempenho está diretamente relacionado à relação usuário-edificação.

As Figuras 21 e 22 mostram a frequência de considerações de cada aspecto e estratégia de *retrofit* nos estudos de caso realizados em edificações residenciais. Observa-se que os principais aspectos abordados foram o ambiental e o econômico, com frequência aproximada de 35%; enquanto as estratégias mais comumente utilizadas foram isolamento térmico do envelope (36,6%), melhoria dos sistemas de climatização e iluminação (21,1%) e fontes renováveis de energia (20,3%).

Destaca-se que cada artigo pode abordar mais de um aspecto ou estratégia. Estudos realizados em diferentes edificações localizadas em climas distintos são contabilizados uma vez para cada clima. Além disso, trabalhos envolvendo diferentes edificações com tipologias distintas constam independentemente em cada caso – por exemplo, são contabilizados uma vez nas Figuras 23 e 24 por abordar ao menos uma edificação residencial e uma vez nas Figuras 27 e 28 por abordar ao menos uma edificação não-residencial.

Figura 21 – Frequência de considerações dos aspectos abordados nos estudos de caso realizados em edificações residenciais

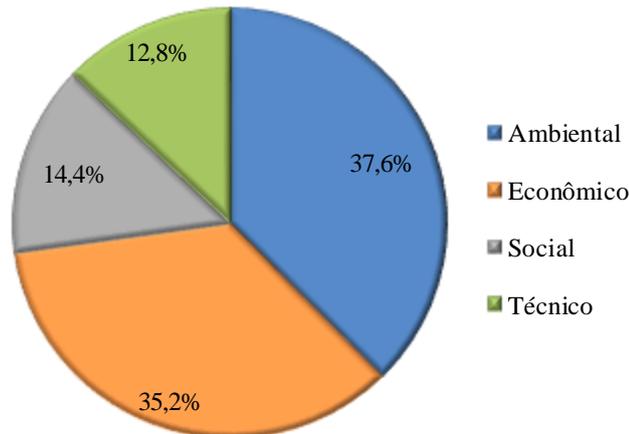
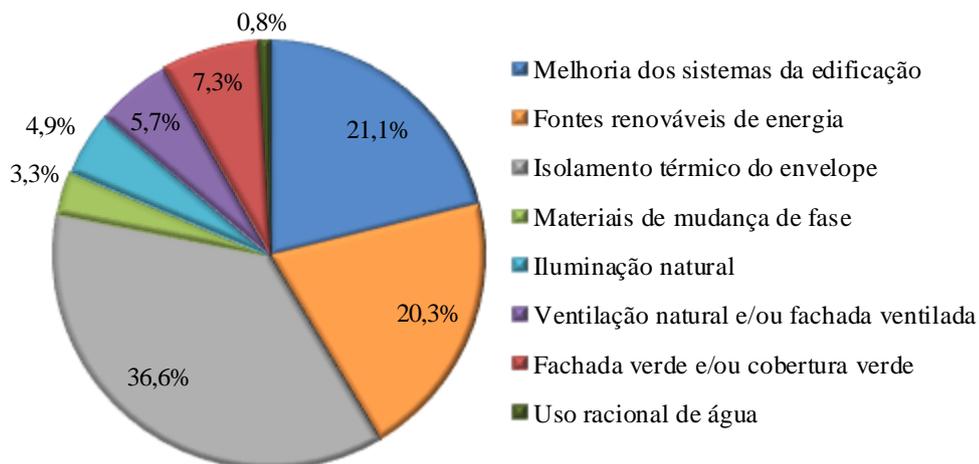


Figura 22 – Frequência de considerações das estratégias de *retrofit* abordadas nos estudos de caso realizados em edificações residenciais



Nas Figuras 23 e 24, são apresentadas as distribuições dos aspectos e das estratégias de *retrofit* consideradas em cada estudo de caso desenvolvido em edificações residenciais, de acordo com o clima do local de estudo. Os aspectos ambiental e econômico foram predominantes, independentemente do clima. Nos climas temperado, mediterrâneo e continental, os aspectos social e técnico representaram juntos aproximadamente um terço do total. Em todos os climas, houve predominância do isolamento térmico do envelope, seguido da melhoria dos sistemas de climatização e iluminação ou fontes renováveis de energia. Nota-se significativa utilização de fachada verde e/ou cobertura verde nos climas temperado e mediterrâneo, representando, respectivamente, 7,2% e 15,8% do total. Também houve aproveitamento da iluminação natural como estratégia de *retrofit* em edificações residenciais localizadas nos climas árido, temperado e mediterrâneo.

Figura 23 – Distribuição dos aspectos considerados nos estudos de caso realizados em edificações residenciais, de acordo com o clima do local de estudo

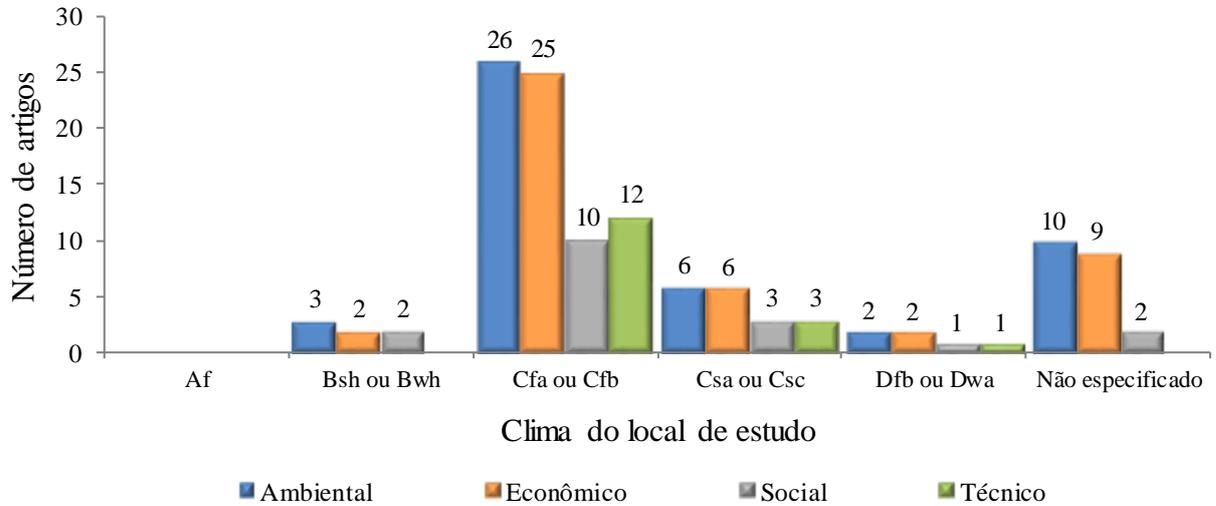
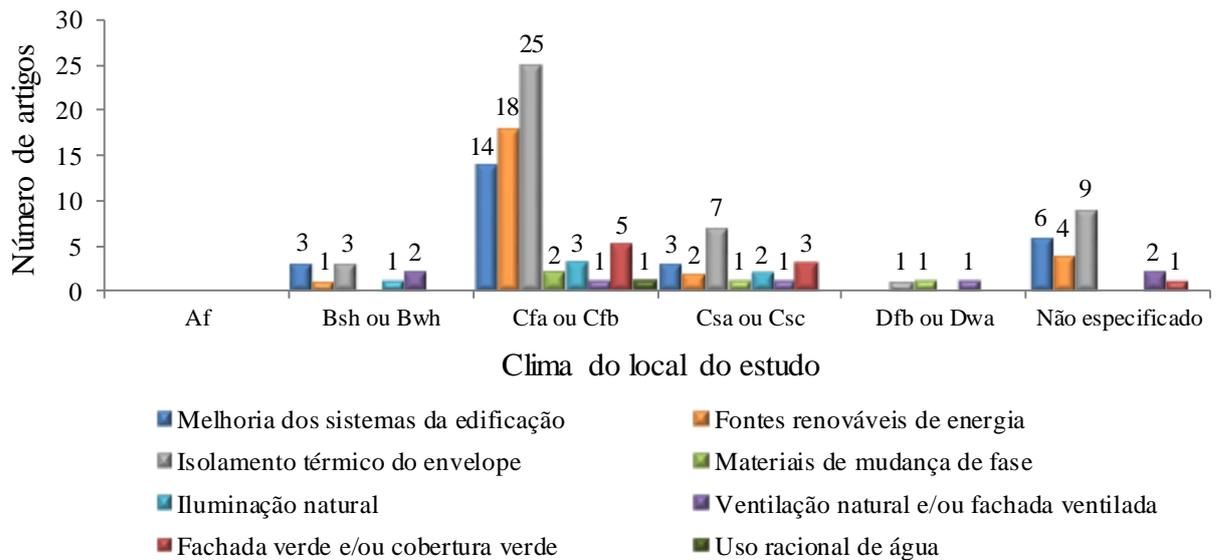


Figura 24 – Distribuição das estratégias de *retrofit* consideradas nos estudos de caso realizados em edificações residenciais, de acordo com o clima do local de estudo



A seguir, são abordados os principais resultados obtidos pelos estudos realizados em edificações residenciais. Ressalta-se que alguns estudos avaliaram a implantação de apenas uma estratégia de *retrofit* em edificações residenciais, como isolamento térmico do envelope (ABU-HIJLEH *et al.*, 2017; GOLZ; NIKOLOWSKI; NAUMANN, 2019; GONZÁLEZ *et al.*, 2017; MOGHADAM *et al.*, 2019; POHORYLES *et al.*, 2020; SALVALAI; SESANA; IANNACCONE, 2017; TAGLIABUE *et al.*, 2018) ou uso de materiais de mudança de fase (BERARDI; MANCA, 2017; BRUNORO *et al.*, 2018).

Berardi e Manca (2017) avaliaram a aplicação de materiais de mudança de fase na face interna do envelope de um projeto típico de residência multifamiliar situada no Canadá. Os resultados apontaram a possibilidade de redução do consumo energético para resfriamento da edificação entre 15,0% e 59,4%, a depender do tipo de material utilizado e da orientação da edificação. De modo semelhante, Perera *et al.* (2018) analisaram um projeto típico de residência unifamiliar construída em 2017 no Canadá. Foram consideradas melhorias dos sistemas de climatização, aquecimento de água e iluminação, isolamento do envelope e instalação de painéis fotovoltaicos. Kaewunruen, Sresakoolchai e Kerinnonta (2019) estudaram o isolamento térmico do envelope e o uso de fontes renováveis de energia em uma residência multifamiliar nos Estados Unidos. Verificou-se que o isolamento das paredes externas e das esquadrias possibilitou redução do consumo energético em torno de 10%.

Abu-Hijleh *et al.* (2017) simularam no programa computacional IES-VE a adição de isolamento térmico às paredes externas e ao telhado, além da substituição dos vidros das janelas, em edificações residenciais unifamiliares nos Emirados Árabes Unidos. A melhoria conjunta de todos os elementos da fachada da edificação resultou em economia energética de 36,7% e redução da emissão de CO₂ em 22,6 toneladas por ano. Qadir, Haddad e Hamdan (2019) também analisaram uma residência unifamiliar nos Emirados Árabes Unidos, considerando o isolamento térmico do envelope, melhoria do sistema de climatização e instalação de painéis fotovoltaicos.

Aghamolaei e Ghaani (2020) simularam no programa EnergyPlus um projeto típico de edificação residencial unifamiliar situada no Irã por meio de análise multi-critério. Os autores identificaram que as estratégias que proporcionaram menor impacto ambiental e melhor conforto térmico foram: isolamento das paredes externas, do piso e da cobertura e redução da infiltração de ar através das esquadrias e envelope da edificação. Mirzaei *et al.* (2020) também simularam no programa EnergyPlus uma edificação residencial multifamiliar construída em 1966 no Irã. A combinação de melhorias no envelope da edificação e no sistema AVAC resultou em redução da demanda energética da edificação em até 41% e do total de horas de desconforto térmico em até 61%.

Ozarisoy e Altan (2018) estudaram uma residência unifamiliar construída nos anos 2010 no Chipre. Foram analisadas as seguintes estratégias de *retrofit*: melhoria dos sistemas de climatização e iluminação, isolamento do envelope, substituição das esquadrias, sombreamento solar e otimização da ventilação natural. Verificou-se redução do consumo energético em até 50%, com *payback* em torno de 20 anos. Destaca-se que o isolamento das paredes externas possibilitou diminuir o consumo energético para aquecimento entre 20% e

30%, porém não apresentou impacto significativo sobre a demanda para resfriamento. Além disso, a substituição das janelas reduziu o consumo energético da edificação em 6%. Também foi analisada a instalação de painéis fotovoltaicos integrados à cobertura da edificação, que permitiu reduzir a emissão de CO₂ em 4,0 toneladas por ano.

Chang, Castro-Lacouture e Yamagata (2020) avaliaram diversas combinações das seguintes estratégias para quatro edificações residenciais no Japão: o isolamento térmico do envelope, uso de materiais de mudança de fase, instalação de painéis fotovoltaicos, fachada verde, cobertura verde e cobertura fria. Nota-se que, neste estudo de caso, ao menos 33% das áreas verticais e 73% da área de cobertura de edificações residenciais puderam ter seu desempenho energético melhorado com a realização de *retrofit*. Li, Xu e Fan (2019) modelaram e simularam nos programas computacionais Revit e EnergyPlus um projeto típico de residência multifamiliar situada na China. Foram analisadas melhorias no envelope da edificação e aproveitamento da ventilação natural.

Djordjević, Joksimović e Jovanović-Popović (2018) analisaram a implantação de cobertura verde com isolamento térmico em projetos típicos de edificações residenciais multifamiliares, localizadas na Sérvia. Os autores obtiveram que o uso de cobertura verde com isolamento térmico pode proporcionar até 86,6% de economia energética e consequente redução da emissão de CO₂. Ferrante, Fotopoulou e Mazzoli (2020) consideraram diferentes estratégias para melhoria do desempenho energético de um distrito residencial na Grécia, como: instalação de painéis fotovoltaicos, isolamento térmico do envelope, sombreamento solar e cobertura verde. A realização de *retrofit* apresentou custo médio de €300/m², variando conforme as alternativas escolhidas para cada edificação. Assim, esses estudos realizados em edificações residenciais nos climas temperado e mediterrâneo comprovam que a fachada verde e a cobertura verde são estratégias importantes para redução do consumo energético e da emissão de CO₂, além de aproveitar as áreas disponíveis sobre o envelope da edificação.

Campos *et al.* (2020) avaliaram edificações residenciais unifamiliares construídas entre 1945 e 1979 na Hungria. Verificou-se que o isolamento térmico das paredes e das esquadrias possibilitou diminuição de 23% do consumo energético. Por outro lado, a realização de diversas melhorias no sistema de aquecimento permitiu reduzir a demanda de energia em até 69%. O estudo de Adam *et al.* (2019) analisou um projeto típico de edificações residenciais multifamiliares na Romênia, em que foi proposta a substituição de sistemas de condicionamento individual (aparelhos de ar-condicionado *split* presentes em cada apartamento) por um sistema coletivo. Além disso, foi simulada a estratégia de fachada ventilada e adicionada uma camada extra de isolamento nas paredes externas. Os autores

verificaram melhoria da eficiência energética da edificação e da qualidade dos ambientes internos, com 55,5% de redução do consumo energético.

Dimitrova *et al.* (2019) e Liapopoulou e Theodosiou (2020) consideraram o isolamento térmico do envelope, a melhoria dos sistemas e a instalação de painéis fotovoltaicos sobre a cobertura de residências multifamiliares situadas na Bulgária e na Grécia, respectivamente. Jorgji *et al.* (2019) analisaram a melhoria das paredes externas, cobertura, piso e esquadrias, além dos sistemas de abastecimento de energia, em um projeto típico de residência unifamiliar na Albânia.

Aguacil *et al.* (2017) simularam nos programas DesignBuilder e EnergyPlus as seguintes estratégias de *retrofit* para edificações residenciais em nível regional na Espanha: isolamento térmico do envelope, fachada ventilada, melhoria do sistema AVAC e uso de painéis fotovoltaicos. Os resultados mostraram que a melhoria no sistema de climatização apresentou redução do consumo energético entre 14% e 33% para aquecimento e 0% e 20% para resfriamento, a depender das condições climáticas em que estão situadas as edificações. Em geral, o uso de estratégias ativas possibilitou até 40% de economia energética, enquanto a combinação de alternativas passivas e ativas permitiu até 80%. Pombo, Rivela e Neila (2019) também avaliaram o *retrofit* de um projeto típico de residência multifamiliar construída entre 1950 e 1980, considerando diferentes localizações na Espanha. Diferentes combinações de estratégias como isolamento das fachadas e da cobertura, substituição das janelas e fachada ventilada resultaram em investimento financeiro entre €70/m² e €190/m², com *payback* entre 14 e 37 anos.

Mauro *et al.* (2019) investigaram diferentes estratégias de *retrofit* para um projeto típico de residência multifamiliar localizada na Espanha. O investimento necessário para cada alternativa foi igual a €366/m² para fachada verde, €110/m² para fachada ventilada e €138/m² para fachada revestida com materiais de mudança de fase. Yang, Javanroodi e Nik (2020) avaliaram o isolamento térmico do envelope, além do uso de ventilação natural como estratégia de ventilação híbrida, para *retrofit* de edificações residenciais situadas na Espanha e na Suécia. Verificou-se que, sob as condições climáticas atuais e futuras, essas alternativas permitiram redução da demanda para aquecimento em torno de 50%.

Cucca e Ianakiev (2020) analisaram o isolamento térmico do envelope, do sistema de aquecimento e do uso de fontes renováveis de energia para *retrofit* de dez residências unifamiliares geminadas no Reino Unido. Considerando-se diferentes modos de operação para painéis fotovoltaicos e bombas de calor geotérmicas instalados nas edificações, foi possível observar redução do consumo energético para aquecimento em torno de 50% a 60%, além de

diminuição dos gases de efeito estufa em até 76,6%. Nota-se que a parcela de energia gerada pelos painéis fotovoltaicos consumida pela edificação e não enviada à rede de energia foi de até 59%. De maneira similar, Lingard (2020) simulou o isolamento térmico do envelope, a instalação de painéis fotovoltaicos e o uso de bomba de calor geotérmica no programa IES-VE em um projeto típico de edificação unifamiliar no Reino Unido. Verificou-se que a estratégia de *retrofit* com melhor custo benefício foi o isolamento das paredes, que reduziu em 50% a 54% o consumo energético para aquecimento da edificação. Por outro lado, o isolamento das janelas, da cobertura e do piso apresentaram os menores percentuais de redução do consumo energético – entre 5% e 11%. Destaca-se que a instalação de painéis fotovoltaicos possibilitou redução de aproximadamente 10% da demanda de energia em relação à edificação original.

Golz, Nikolowski e Naumann (2019) investigaram a restauração e o isolamento das paredes externas de uma residência multifamiliar construída em 1909 na Alemanha. A realização de *retrofit* possibilitou redução do consumo energético em 20,2%, com investimento igual a €142.000. Falke e Schnettler (2016) consideraram, em projetos típicos de residências unifamiliares e multifamiliares na Alemanha, o isolamento térmico do envelope e o uso de fontes renováveis de energia – como painéis fotovoltaicos, coletores solares e bombas de calor geotérmicas. No estudo de Sattler e Österreicher (2019), foram analisados dois sistemas de fachada para residências multifamiliares construídas entre os anos 1950 e 1970 na Áustria. Um sistema convencional com a adição de camada de isolamento térmico sobre a fachada resultou em diminuição da demanda energética em 65,7% e da emissão de CO₂ em 67,8%. Por outro lado, uma tecnologia inovadora que consiste em uma fachada ventilada com painéis fotovoltaicos apresentou resultados semelhantes – redução do consumo energético em 66,1% e da emissão de CO₂ em 68,3%.

Drouilles *et al.* (2019) analisaram a performance energética de projetos típicos de residências unifamiliares e multifamiliares construídas entre 1940 e 1970 na Suíça. Foram analisadas as estratégias de isolamento térmico do envelope, melhoria dos sistemas AVAC e de aquecimento de água, além do uso de painéis fotovoltaicos e coletores solares. Em geral, o *retrofit* das edificações residenciais possibilitou diminuição em torno de 70% a 80% do consumo energético. Assim, as residências que passaram por melhoria apresentaram consumo energético até 20% inferior a edificações construídas recentemente com características semelhantes. Destaca-se que, após a realização de *retrofit*, as residências multifamiliares tiveram performance energética até 37% superior em comparação às residências unifamiliares.

Stiernon *et al.* (2019) e González *et al.* (2017) estudaram edificações residenciais históricas construídas antes de 1914 e 1945, respectivamente, na Bélgica. Verificou-se que o isolamento térmico do envelope apresentou impactos positivos quanto à ventilação e ao aquecimento, contribuindo para o aumento da eficiência energética das edificações. Hejtmánek *et al.* (2017) analisaram a implantação de algumas estratégias de *retrofit* em uma residência multifamiliar construída em 1958 na República Tcheca. Foram consideradas a instalação de painéis fotovoltaicos e coletores solares, o isolamento térmico do envelope com uso de painéis pré-fabricados, a melhoria do sistema AVAC e a otimização da iluminação natural na edificação.

Ruud, Östman e Orädd (2016) investigaram o isolamento das paredes externas e do telhado, a substituição das janelas e a instalação de sistema de ventilação mecânica com recuperação de calor em um projeto típico de edificação multifamiliar localizada em países nórdicos da Europa. Verificou-se que a substituição das janelas e o sistema de ventilação mecânica com recuperação de calor apresentaram os melhores resultados de desempenho energético da edificação. O conjunto de todas as estratégias possibilitou diminuir a demanda energética da edificação em 25%. Destaca-se que, combinado a outras alternativas, o isolamento das fachadas da edificação teve sua performance energética reduzida em 8%, devido à menor necessidade de aquecimento da edificação ao longo do ano.

Nota-se quantidade expressiva de estudos realizados em residências unifamiliares e multifamiliares na Itália, que são explorados a seguir. Longo *et al.* (2018) analisaram a implantação de estratégias relacionadas ao isolamento térmico do envelope e ao uso de fontes renováveis de energia em três habitações de interesse social na Itália. Os resultados mostraram que o *retrofit* das edificações permitiu reduzir o consumo energético entre 60% e 80% e as emissões de CO₂ entre 41 e 126 toneladas por ano. Lucchi e Delera (2020) também realizaram um estudo em habitações de interesse social a nível regional na Itália. Foram considerados diferentes conjuntos de estratégias de *retrofit*, envolvendo: melhoria dos sistemas de climatização, instalação de painéis fotovoltaicos e coletores solares, isolamento e recuperação do envelope, otimização da iluminação natural e ventilação natural, fachada verde e cobertura verde, aproveitamento de água pluvial e reúso de água cinza.

Fregonara *et al.* (2017) avaliaram a realização de *retrofit* em uma edificação multifamiliar construída em 1963 na Itália. Verificou-se que o isolamento das paredes externas, a substituição das janelas, a melhoria do sistema de climatização e a instalação de painéis fotovoltaicos e coletores solares permitiram reduzir a demanda de energia da rede elétrica em 100%, isto é, a edificação conseguiu gerar toda a energia consumida. Além disso,

diminuiu o consumo de gás entre 60% e 91%, a depender das estratégias adotadas. Fregonara, Carbonaro e Pasquarella (2018) analisaram o isolamento térmico do envelope e a melhoria dos sistemas de climatização, além da instalação de painéis fotovoltaicos e coletores solares, em edificações residenciais multifamiliares na Itália. A depender do conjunto de estratégias consideradas, verificou-se redução do consumo de energia da rede elétrica de aproximadamente 30% até 100% – ou seja, caso em que as edificações se tornaram autossuficientes. Outro estudo de mesma autora principal efetuou uma análise de ciclo de vida para identificar o melhor conjunto de estratégias para *retrofit* de três residências multifamiliares construídas nos anos 1970 na Itália, considerando o isolamento térmico do envelope e dos sistemas da edificação (FREGONARA *et al.*, 2016).

Salvalai, Sesana e Iannaccone (2017) avaliaram o isolamento térmico do envelope de uma edificação residencial multifamiliar construída em 1971 na Itália. Os resultados mostraram redução do consumo energético da edificação em 30,4% para o uso de painéis de isolamento térmico pré-fabricados e 39,1% para a substituição das janelas. A combinação das duas estratégias possibilitou diminuir a demanda energética em 69,0% e a emissão de CO₂ em 13 toneladas por ano. Gigliarelli, Calcerano e Cessari (2017) estudaram o isolamento térmico do envelope e a melhoria dos sistemas de uma residência unifamiliar situada na Itália, porém o artigo não apresentou resultados numéricos. Pacchiega e Fausti (2017) investigaram o uso de um sistema de aquecimento e resfriamento com bomba de calor geotérmica acoplada como *retrofit* em uma edificação residencial histórica, localizada na Itália. Os autores avaliaram a viabilidade técnica e econômica de sistemas com diferentes fontes renováveis (geotérmica e ar externo) e diferentes sistemas de controle (ligado-desligado e capacidade variável). A melhor solução em termos financeiros foi a bomba de calor ar-água acionada por inversor, que apresentou 49% de economia energética e 51% de economia financeira em comparação à condição inicial.

Becchio *et al.* (2018) estudaram a melhoria da performance energética de um conjunto de edificações residenciais multifamiliares construídas entre os anos 1920 e 1980 na Itália. O isolamento térmico do envelope, a melhoria dos sistemas de climatização e de aquecimento de água da edificação, além da instalação de painéis fotovoltaicos, possibilitaram diminuir o consumo energético das edificações em aproximadamente 80% – transformando a região em um distrito de energia quase zero. Brunoro *et al.* (2018) analisaram a implantação de diferentes fontes renováveis de energia em edificações residenciais multifamiliares a nível regional na Itália, sendo elas: painéis fotovoltaicos, coletores solares para aquecimento de

água e bombas de calor geotérmicas. Destaca-se que a instalação de painéis fotovoltaicos apresentou o melhor desempenho em termos ambiental, econômico e técnico.

Gianfrate *et al.* (2017) consideraram o isolamento térmico do envelope e o uso de painéis fotovoltaicos que atuam também como sombreamento solar para melhoria da eficiência energética de edificações residenciais multifamiliares, construídas nos anos 1970 na Itália. Além disso, os autores ressaltam a importância de conscientizar os usuários sobre o uso adequado das alternativas de *retrofit* para obter a eficiência energética planejada. Dirutigliano, Delmastro e Moghadam (2018) estudaram, por meio de análise multi-critério, projetos típicos de residências unifamiliares e multifamiliares situadas na Itália. O isolamento térmico do envelope e a melhoria dos sistemas de climatização, bem como o uso de fontes renováveis de energia, permitiram ao conjunto de edificações uma economia energética em torno de 20%.

Moghadam *et al.* (2019) avaliaram o desempenho energético e a implantação de estratégias de *retrofit* em edificações residenciais em escala regional na Itália. O isolamento térmico das paredes externas, cobertura, piso e esquadrias permitiu redução da demanda energética do conjunto de edificações, em média, igual a 60%. Nota-se que a época de construção e, conseqüentemente, as características das edificações influenciaram os resultados do estudo – por exemplo, a substituição de janelas por modelos com maior isolamento diminuíram o consumo energético em aproximadamente 19% para edificações construídas antes de 1919 e em apenas 5% para edificações entre 1991 e 2005. Tagliabue *et al.* (2018) simularam nos programas computacionais EnergyPlus e jEPlus a adição de isolamento térmico a diversos componentes de um modelo de residência multifamiliar situada em diferentes cidades na Itália. O clima do local influenciou os resultados em termos energéticos e financeiros de cada estratégia considerada.

Além da melhoria do desempenho energético, alguns estudos avaliaram os efeitos sísmicos para a realização de *retrofits* em edificações situadas na Itália. Marini *et al.* (2017) estudaram a melhoria da performance energética e da resistência sísmica de uma edificação residencial multifamiliar construída em 1972 na Itália. Verificou-se que a realização de *retrofit* envolvendo isolamento das fachadas, substituição dos vidros das janelas, sombreamento solar e instalação de painéis fotovoltaicos permitiu reduzir o consumo energético para aquecimento em até 70%. Igualmente, Mauro *et al.* (2017) investigaram a melhoria da performance energética e da resistência sísmica de uma edificação residencial multifamiliar construída nos anos 1970 na Itália. Considerou-se o isolamento da fachada e da cobertura, a substituição das janelas, a melhoria do sistema de climatização (inclusive a alteração da temperatura de *set point*) e a instalação de painéis fotovoltaicos. Essas estratégias

permitiram reduzir em torno de 61% e 62%, respectivamente, o consumo energético da edificação e a emissão de CO₂, com *payback* entre 11 e 12 anos.

Artino *et al.* (2019) analisaram uma edificação residencial multifamiliar existente na Itália. Os autores propuseram a substituição da camada externa das fachadas da edificação por blocos de concreto aerado autoclavado, a fim de obter melhoria da performance energética e da resistência sísmica da edificação. Além disso, foi simulada no programa EnergyPlus a adição de uma camada de isolamento termoacústico sobre a superfície externa das fachadas, a substituição das janelas e a implementação de sistemas de sombreamento. O consumo energético total foi reduzido em 38% e 27% para as cargas de aquecimento e resfriamento, respectivamente. Pohoryles *et al.* (2020) avaliaram a realização de *retrofit* para melhoria do desempenho energético e sísmico de projetos típicos de residências multifamiliares, considerando diversos países da Europa. Considerando-se o melhor conjunto de estratégias envolvendo o isolamento térmico do envelope para cada caso e uma taxa de renovação das edificações de 3% ao ano, é possível reduzir a demanda energética e a emissão de CO₂, em média, entre 20% e 40% até 2030. Verificou-se que a combinação de intervenções apresentou custo 25% inferior em comparação à realização de *retrofit* energético ou sísmico isoladamente.

3.5.2. Edificações não-residenciais

As edificações não-residenciais usuais são constituídas principalmente por edificações comerciais ou de escritórios e instituições de ensino. De maneira semelhante às Figuras 21 e 22, as Figuras 25 e 26 apresentam a frequência de considerações de cada aspecto e estratégia de *retrofit* nos estudos de caso efetuados em edificações não-residenciais. Os principais aspectos abordados foram o ambiental e o econômico, correspondendo a aproximadamente 35% do total. Quanto às estratégias de *retrofit*, houve predominância do isolamento térmico do envelope (31,8%), seguida por melhoria dos sistemas de climatização e iluminação (22,0%) e uso de fontes renováveis de energia (16,7%). Destaca-se também o significativo aproveitamento de iluminação natural e ventilação natural e/ou fachada ventilada – igual a 12,9% e 9,1%, respectivamente.

Figura 25 – Frequência de considerações dos aspectos abordados nos estudos de caso realizados em edificações não-residenciais

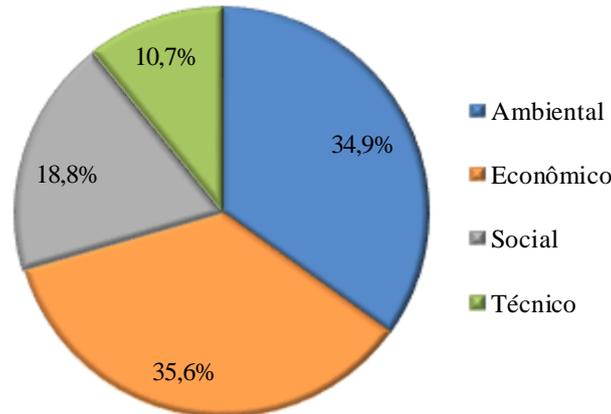
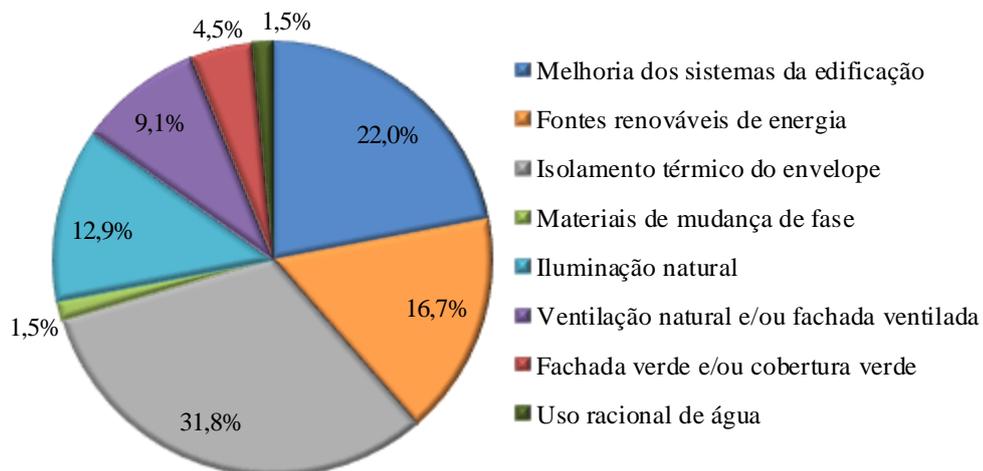


Figura 26 – Frequência de considerações das estratégias de *retrofit* abordadas nos estudos de caso realizados em edificações não-residenciais



Nas Figuras 27 e 28 constam as distribuições dos aspectos e das estratégias de *retrofit* consideradas em cada estudo de caso realizado em edificações não-residenciais, de acordo com o clima do local de estudo. A maioria dos estudos em edificações não-residenciais foi realizada em climas temperado, mediterrâneo ou não especificado – nos quais predominou a consideração dos aspectos ambiental e econômico. Em todos os climas, as estratégias de *retrofit* mais utilizadas foram isolamento térmico do envelope, melhoria dos sistemas de climatização e iluminação e uso de fontes renováveis de energia. O aproveitamento da iluminação natural e ventilação natural e/ou fachada ventilada também foi significativo nos climas árido, temperado, mediterrâneo e não especificado. Nota-se que materiais de mudança de fase e uso racional de água foram considerados apenas duas vezes – nos climas mediterrâneo e temperado, respectivamente.

Figura 27 – Distribuição dos aspectos considerados nos estudos de caso realizados em edificações não-residenciais, de acordo com o clima do local de estudo

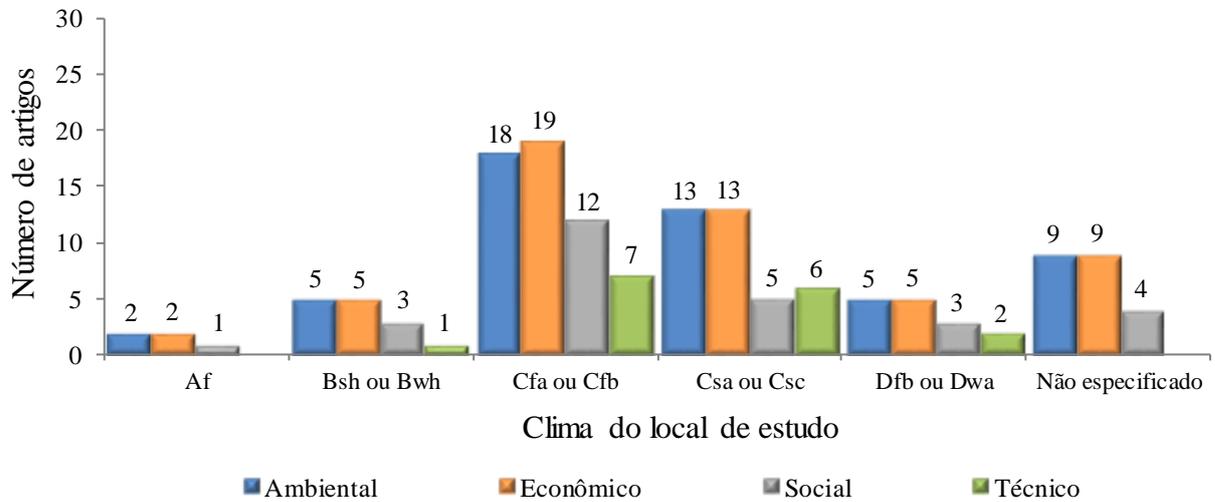
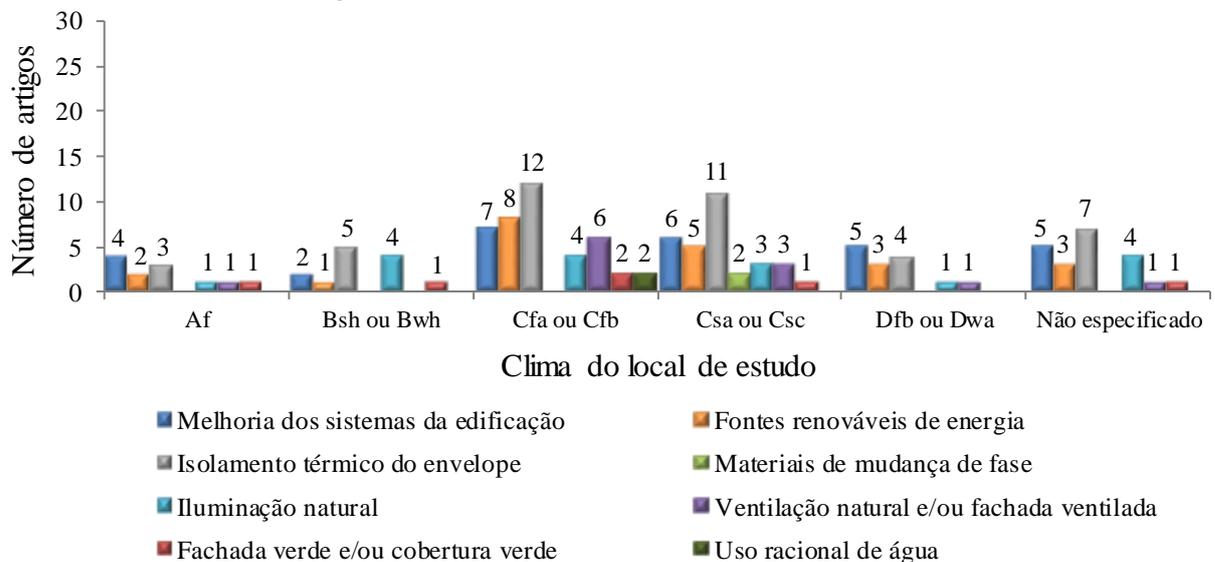


Figura 28 – Distribuição das estratégias de *retrofit* consideradas nos estudos de caso realizados em edificações não-residenciais, de acordo com o clima do local de estudo



São apresentados a seguir os resultados relevantes obtidos por estudos que analisaram edificações não-residenciais. Destaca-se que alguns trabalhos analisaram uma estratégia de *retrofit* em específico para edificações não-residenciais, como isolamento térmico do envelope (CEBALLOS-FUENTEALBA *et al.*, 2019; NEGRO; D'AMATO; CARDINALE, 2019; PRACUCCI; MAGNANI; CASADEI, 2020; RUOCCO; SICIGNANO; SESSA, 2017; THOMAS; MENASSA; KAMAT, 2018), melhoria dos sistemas de climatização e iluminação

(BURROUGHS, 2018; LABEODAN *et al.*, 2016) ou uso de fontes renováveis de energia (ABDULLAH; ALIBABA, 2017; FARGHALY; HASSAN, 2019; PIOPPI *et al.*, 2020).

Fernandes *et al.* (2018) avaliaram a implantação de três estratégias passivas de *retrofit* em uma instituição de ensino superior no Brasil: iluminação natural, ventilação natural e cobertura verde. Os autores observaram leve diminuição do consumo energético para iluminação natural (9,1%) e ventilação natural (4,7%) e ausência de redução do consumo energético para o uso de cobertura verde. Além disso, houve leve aumento do conforto térmico com a otimização da iluminação natural e o uso de cobertura verde; e redução do conforto térmico com o uso de ventilação natural. No estudo de Ceballos-Fuentealba *et al.* (2019), foi analisado o isolamento térmico do envelope de uma instituição de ensino construída em 2012 no Chile. Diferentes combinações do isolamento das paredes, janelas e cobertura da edificação resultaram em impactos positivos ou negativos sobre o desempenho energético da edificação, variando entre -6,0% e 13,9% para resfriamento e entre -7,9% e 33,8% para aquecimento.

Hu (2017) investigou uma instituição de ensino construída em 1968 nos Estados Unidos, cujo principal problema foi a falta de isolamento do envelope da edificação, causando elevada demanda energética para aquecimento. Verificou-se redução do consumo energético e da emissão de CO₂, respectivamente, igual a 22% e 50% para isolamento das paredes externas; 18% e 35% para isolamento do telhado; e ambos 2% para substituição dos vidros das janelas. Para melhoria da qualidade do ambiente interno, também foi considerado o uso de ventilação natural. No estudo de McArthur e Jofeh (2016), analisou-se a realização de *retrofit* em dois escritórios situados no Canadá. O isolamento de alguns componentes da edificação, a melhoria dos sistemas de climatização e iluminação e a instalação de painéis fotovoltaicos possibilitou redução do consumo energético e das emissões de CO₂ em torno de 20% a 30%.

Chen, Hong e Piette (2017) simularam nos programas EnergyPlus e CityBES o isolamento térmico do envelope e a melhoria dos sistemas de climatização e iluminação de um conjunto de edificações de escritórios nos Estados Unidos. A implantação de todas as estratégias de *retrofit* consideradas possibilitou, em média, diminuição de 23% a 38% da demanda energética da edificação, com *payback* entre 6,3 e 33,8 anos. Destaca-se que a substituição das lâmpadas antigas por modelos energeticamente eficientes foi a alternativa que, isoladamente, apresentou maior redução do consumo energético – em média 23,5%. Thomas, Menassa e Kamat (2018) avaliaram o isolamento térmico do envelope de edificações de escritórios nos Estados Unidos. Observou-se que o aumento do isolamento das paredes externas e a substituição dos vidros das janelas permitiram melhoria do desempenho térmico

das edificações. Os autores constataram que edificações maiores apresentaram melhor performance energética em comparação a edificações menores, assim como observado por Drouilles *et al.* (2019). Assim, geralmente a realização de *retrofits* em edificações com maior área traz maiores benefícios ambientais e econômicos.

Belpoliti *et al.* (2019) realizaram uma análise comparativa entre o *retrofit* de uma edificação comercial existente nos Emirados Árabes Unidos e a construção de uma nova edificação, em termos de performance energética, viabilidade e funcionalidade. A aplicação de estratégias passivas em ambos os casos resultou em redução do consumo energético em torno de 11% em relação à edificação original. A proposta de *retrofit* apresentou custo 31% menor em comparação à construção de uma nova edificação. Alkhateeb e Hijleh (2017) simularam no programa IES-VE uma edificação comercial construída em 2010 nos Emirados Árabes Unidos. A combinação de estratégias relacionadas ao isolamento térmico do envelope, à melhoria dos sistemas da edificação e ao sombreamento solar resultou em redução da demanda energética em 65%.

Abdullah e Alibaba (2017) apresentaram a proposta de sistemas fotovoltaicos otimizados na forma de dispositivos de sombreamento que rotacionam de acordo com a posição solar, implantados sobre as fachadas de uma edificação comercial no Iraque. Segundo os autores, essa estratégia permite geração de energia, melhoria do conforto térmico dos ocupantes e aparência dinâmica à edificação. Em comparação a painéis fotovoltaicos fixos, a implantação desse sistema integrado permite maximizar a eficiência das células fotovoltaicas em 36,8% em edificações comerciais. Assim, contribui com a redução do consumo de energia elétrica para resfriamento no verão em 44,9% e para aquecimento no inverno em 28,7%. Hosseini, Shirmohammadi e Aslani (2020) estudaram o isolamento térmico do envelope e o uso de materiais de mudança de fase em uma edificação de escritórios construída em 2007 no Irã. Houve redução do consumo energético necessário para aquecimento e resfriamento, respectivamente, em até 10,9% e 3,5% para substituição dos vidros das janelas; 30,3% e 1,7% para adição de camada de sílica-aerogel no envelope; 10,8 % e 12,0% para aplicação de materiais de mudança de fase. A combinação de todas as estratégias resultou em redução da demanda energética para aquecimento em 51,6% e aumento para resfriamento em 0,25%, além de diminuir a emissão de CO₂ em 5,4%, com investimento total igual a US\$74.500. Ali e Al-Hashlamun (2019) avaliaram um projeto típico de instituição de ensino localizada na Jordânia. Verificou-se o isolamento térmico das paredes externas, da cobertura e da janelas, bem como a adição de dispositivos de sombreamento solar, que possibilitou reduzir o consumo energético da edificação em até 54%, com *payback* simples igual a 5,5 anos.

No estudo de Cho *et al.* (2020), foram simuladas nos programas computacionais DesignBuilder e EnergyPlus algumas estratégias relacionadas ao isolamento térmico do envelope e à melhoria dos sistemas, além da instalação de painéis fotovoltaicos, em uma instituição de ensino histórica na Coreia do Sul. Observou-se que a melhor combinação para *retrofit* em termos energéticos e de conservação da edificação envolveu o isolamento térmico de paredes, telhado e esquadrias e a melhoria do sistema de climatização e iluminação, reduzindo a demanda energética em 61,2%. No estudo de Son e Kim (2016), foram consideradas as seguintes alternativas de *retrofit* para uma instituição de ensino pública na Coreia do Sul: isolamento das paredes internas e externas, do telhado e do piso, substituição dos vidros das janelas e melhoria do sistema AVAC. Lee, Shepley e Choi (2019) simularam no programa Energy# duas edificações comerciais construídas entre 1960 e 1970 na Coreia do Sul. Verificou-se que o isolamento térmico do envelope, a melhoria dos sistemas de climatização e iluminação, além da instalação de painéis fotovoltaicos sobre a cobertura, reduziram a demanda energética para aquecimento em 38,2% e os custos anuais com energia em 29,7%.

Mohanty (2018) analisou a instalação de painéis fotovoltaicos e a melhoria dos sistemas AVAC e de iluminação, com a substituição de lâmpadas e equipamentos antigos por outros energeticamente eficientes, em uma edificação de escritórios construída no século XVIII na Índia. Verificou-se que essas estratégias de *retrofit* possibilitaram redução do consumo energético em 57% e diminuição da emissão de CO₂ em 112 toneladas por ano, com *payback* igual a 58 meses. No estudo de Nazi *et al.* (2017), foi simulada nos programas DesignBuilder e EnergyPlus uma edificação de escritórios situada na Malásia. Consideraram-se estratégias relacionadas à melhoria dos sistemas AVAC e de iluminação – como mudança da temperatura de *set point*, uso de *dimmers* e substituição de lâmpadas e equipamentos eletrônicos antigos por modelos energeticamente eficientes –, a substituição dos vidros das janelas e o uso de painéis fotovoltaicos. O conjunto dessas alternativas de *retrofit* resultou em redução do consumo de energia primária da edificação em 57%, além de melhoria no conforto térmico dos usuários. Abidin *et al.* (2019) consideraram as seguintes estratégias de *retrofit* para uma instituição de ensino superior situada na Malásia: melhoria dos sistemas de climatização e iluminação, instalação de painéis fotovoltaicos, cobertura verde, otimização da iluminação natural e da ventilação natural.

Burroughs (2018) avaliou a melhoria nos sistemas AVAC e de iluminação, além da automação predial, de uma edificação de escritórios construída em 1991 na Austrália. Verificou-se redução do consumo energético em 48% e dos custos com energia elétrica em

US\$530.000 por ano. Slee e Hyde (2016) estudaram a realização de *retrofit* em um projeto típico de escolas desmontáveis na Austrália – isto é, edificações construídas com materiais leves que permitem o seu transporte para outro local. Analisou-se o isolamento térmico do envelope da edificação por meio de maior espessura das paredes e pela adição de uma camada de isolante térmico. No primeiro caso houve aumento da massa térmica que possibilitou redução do consumo energético em até 21%, enquanto a adição de isolante térmico elevou a demanda energética para aquecimento e resfriamento. Não houve efeito significativo dessas estratégias sobre o conforto térmico dos usuários. Ademais, a sobreposição de uma camada extra de telhado sobre a cobertura de modo a prover sombreamento solar a toda a edificação foi a alternativa com melhores resultados, atingindo 51% de redução no consumo energético.

Abdelrazek e Yilmaz (2020) simularam no programa DesignBuilder uma edificação pública e histórica de ensino superior localizada na Turquia. Verificou-se que a melhoria no envelope, o uso de sombreamento solar e a automação dos sistemas AVAC e de iluminação proporcionaram redução do consumo energético entre 15% e 35%. Considerando-se além dessas estratégias a introdução de painéis fotovoltaicos, obteve-se diminuição de até 79% da demanda energética, em comparação à edificação original. Yildiz e Koçyiğit (2020) analisaram, em quatro edificações de ensino superior localizadas na Turquia, a aplicação de diferentes estratégias de *retrofit*. Avaliando o desempenho individual de cada alternativa, foram obtidos os seguintes percentuais de redução do consumo energético para carga de aquecimento ou resfriamento: 14% a 31% para isolamento das paredes, 3% a 30% para isolamento da cobertura, 2% a 16% para substituição das janelas, -2% a 7% para sombreamento solar e 6% a 60% para melhoria do sistema AVAC. Além disso, verificou-se redução de 60% a 70% do consumo energético para iluminação com a melhoria do sistema de iluminação. De modo geral, a combinação das estratégias de *retrofit* resultou em redução do consumo energético da edificação superior a 60%. Farghaly e Hassan (2019) investigaram a diferença de dois modelos de painéis fotovoltaicos para uma instituição de ensino superior construída em 1972 no Egito. As duas opções apresentaram redução do consumo energético da edificação entre 5,5% e 7,0%, com *payback* simples entre 4,7 e 5,1 anos.

Pracucci, Magnani e Casadei (2020) desenvolveram uma tecnologia de módulos de vidro para isolamento das fachadas, que foi testada em uma instituição de ensino na Polônia. Simulações no programa THERM mostraram melhoria de 16,8% da eficiência energética deste componente em comparação às propriedades térmicas do padrão comercial. Mohelníková, Novotný e Mocová (2020) analisaram projetos típicos de instituições de ensino históricas localizadas na República Tcheca. O isolamento do envelope das edificações

permitiu reduzir o ganho de calor em até 18,5%. Além disso, os autores recomendam a instalação de dispositivos de sombreamento solar para melhoria do conforto visual dos ocupantes.

Eliopoulou e Mantziou (2017) simularam no programa computacional EnergyPlus a aplicação de estratégias passivas em uma instituição de ensino construída em 1931 na Grécia. O isolamento térmico do envelope e a otimização da iluminação natural e da ventilação natural permitiram até 44,2% de redução da demanda energética da edificação. Ciugudeanu, Beu e Rastei (2016) analisaram a melhoria do sistema de iluminação de uma instituição de ensino superior construída em 1948 na Romênia. Obteve-se que a substituição de lâmpadas antigas por modelos energeticamente eficientes e o uso de dispositivos de controle automático da iluminação permitiu reduzir o consumo energético da edificação em aproximadamente 75% comparado à condição original.

Sekki, Airaksinen e Saari (2017) analisaram a aplicação de diferentes estratégias de *retrofit* relacionadas ao isolamento térmico do envelope e à melhoria dos sistemas da edificação, ao uso da iluminação natural e da ventilação natural em seis instituições de ensino na Finlândia. Verificou-se variação dos percentuais de economia energética conforme o indicador de performance energética utilizado, ou seja, quais variáveis foram consideradas no cálculo do desempenho da edificação além do consumo energético – como área, número de ocupantes, percentual de ocupação diária da edificação, entre outros. A redução no consumo energético variou entre 0% e 13% após a realização do *retrofit*, considerando-se distintas estratégias, edificações e indicadores de performance energética.

Si *et al.* (2016) avaliaram o *retrofit* de uma instituição de ensino construída em 1919 no Reino Unido. Em termos de custo-benefício, as melhores estratégias estiveram relacionadas à melhoria do sistema de climatização, enquanto as piores alternativas referiram-se à melhoria do sistema de iluminação. O aumento do isolamento térmico das janelas apresentou resultados intermediários. Ardiani *et al.* (2018) analisaram o isolamento térmico do envelope, a instalação de painéis fotovoltaicos e a otimização da ventilação natural em uma edificação comercial no Reino Unido. Obteve-se redução do consumo energético para aquecimento em 45,1%, porém significativo aumento para carga de resfriamento.

Labeodan *et al.* (2016) analisaram o uso de controles de iluminação em uma edificação de escritórios construída em 1992 na Holanda. Verificou-se que a utilização de sensores de presença permitiu redução de 24% do consumo de energia elétrica para iluminação da edificação, com custo de implantação igual a €2.575. Marique e Rossi (2018) estudaram uma edificação pública construída em 1934 na Bélgica. Foram consideradas as

seguintes estratégias de *retrofit*: isolamento das faces internas das paredes e da cobertura, substituição dos vidros das janelas e melhoria do sistema de ventilação mecânica. Em geral, verificou-se que a realização de *retrofit* representou 54,5% e 56,6%, respectivamente, do consumo energético e da emissão de CO₂ em comparação à demolição e reconstrução da edificação.

Assim como observado para as edificações residenciais, existe significativa quantidade de estudos desenvolvidos em edificações comerciais e instituições de ensino na Itália, os quais são explanados na sequência.

Ascione *et al.* (2019) analisaram a aplicação das seguintes estratégias de *retrofit* em uma universidade pública situada na Itália: cobertura fria, cobertura verde, fachada ventilada, isolamento do envelope da edificação e materiais de mudança de fase. Com exceção da última, todas apresentaram redução do consumo energético anual inferior a 5%, não sendo muito eficientes para a melhoria da eficiência energética da edificação. Isso pode estar relacionado ao fato de o sistema de condicionamento artificial operar durante o ano todo nos horários de ocupação da edificação, simultaneamente a qualquer estratégia empregada – as quais não apresentariam significativo impacto em termos econômicos e de conforto térmico. Além disso, a edificação foi recentemente reformada e já apresenta boa performance energética. Desta forma, os autores apontam a aplicação de materiais de mudança de fase como a melhor estratégia para a edificação em questão, com potencial de economia energética igual a 6,1% e de redução de CO₂ igual a 6,1%. Destaca-se que todas as alternativas consideradas tiveram *payback* superior a 30 anos, não sendo economicamente viáveis.

No estudo de Bittenbinder *et al.* (2020), foram consideradas melhorias no envelope e instalação de painéis fotovoltaicos em diversas edificações que constituem um campus universitário na Itália. Além disso, avaliou-se a implantação de um sistema de controle inteligente pelos usuários. Joppolo *et al.* (2017) analisaram o isolamento térmico do envelope e a melhoria do sistema de ventilação mecânica de uma instituição de ensino superior na Itália. Os resultados mostraram que o isolamento das paredes e da cobertura e a substituição das janelas possibilitaram redução do consumo energético para aquecimento em 52,9% e para resfriamento em 23,7%. Lassandro e Cosola (2018) estudaram o *retrofit* da cobertura de uma instituição de ensino localizada na Itália. O isolamento térmico do envelope com utilização de materiais convencionais resultou em redução do consumo energético para resfriamento de até 17%, com custo inferior a €1.000. Por outro lado, o uso de isolamento com materiais de mudança de fase permitiu diminuição do consumo em até 40%, com custo aproximado de

€36.000. Ademais, a estratégia de cobertura verde apresentou melhoria do desempenho energético em 39% e custo igual a €51.000.

Mancini *et al.* (2017) avaliaram o isolamento térmico do envelope e a melhoria dos sistemas de aquecimento e resfriamento de uma instituição de ensino superior construída em 1935 na Itália, obtendo-se redução da demanda energética em 40,2%. Manni *et al.* (2017) modelaram e simularam nos programas DesignBuilder e EnergyPlus uma instituição de ensino superior construída em 1929 na Itália. Foram analisadas as seguintes estratégias de *retrofit*: uso de fontes de energia renováveis, aproveitamento de água pluvial e isolamento térmico do envelope da edificação. Ruocco, Sicignano e Sessa (2017) analisaram o isolamento térmico do envelope de uma instituição de ensino histórica na Itália. Foram testadas diferentes combinações de materiais para as paredes externas e o telhado da edificação, o que resultou em redução do consumo energético entre 17,2% e 29,5%. Entretanto, todas as combinações apresentaram *payback* superior a 25 anos.

Baggio *et al.* (2017) simularam nos programas DesignBuilder e EnergyPlus uma instituição de ensino histórica construída em 1922 na Itália. Foram selecionadas para *retrofit* as seguintes estratégias: isolamento da cobertura, substituição das janelas, melhoria dos componentes e modo de operação do sistema AVAC. Os resultados indicaram redução do consumo energético da edificação em 38,6%, com *payback* simples igual a 15 anos. Negro, D'Amato e Cardinale (2019) também avaliaram uma instituição de ensino pública e histórica construída em 1540 na Itália. Observou-se redução do consumo energético igual a 4% para isolamento térmico das paredes externas e 13% para isolamento da cobertura, além de melhoria no conforto térmico dos usuários. Ademais, Pini, Verzari e D'Angelo (2019) estudaram uma instituição de ensino construída em 1938 na Itália. O isolamento das paredes, cobertura e piso, a substituição das janelas, a melhoria dos sistemas de climatização e iluminação e a instalação de painéis fotovoltaicos permitiu reduzir o consumo energético da edificação em 38,1%.

Balocco e Colaianni (2018) simularam no programa TRNSYS uma instituição de ensino médio histórica, localizada na Itália. O melhor conjunto de estratégias de *retrofit* em termos ambientais, econômicos, sociais e técnicos compreendeu a inserção de dispositivos para regulação da temperatura ambiente de modo a otimizar o sistema de aquecimento da edificação. Essa escolha proporcionou redução do consumo energético e da emissão de gases de efeito estufa em aproximadamente 40%. Nocera *et al.* (2017) simularam no programa Termolog EpiX uma instituição de educação infantil pública, localizada na Itália. Os autores apontam que grande parte das instituições de ensino na Itália apresentam sistemas e

tecnologias ineficientes, resultando em baixo desempenho energético. Três estratégias foram analisadas a fim de atingir a classificação necessária para recebimento de auxílio financeiro para a implantação do *retrofit*: isolamento térmico do envelope da edificação, melhoria do sistema de aquecimento da edificação e instalação de painéis fotovoltaicos e coletores solares. A comparação das alternativas quanto ao potencial de economia energética e financeira e à redução de gases de efeito estufa mostrou que o conjunto ideal de estratégias envolve a melhoria do sistema de aquecimento da edificação e a instalação de painéis e coletores solares. Essa solução apresenta redução do consumo energético e da emissão de gases de efeito estufa em aproximadamente 90%, além de *payback* inferior a 20 anos.

Brambilla *et al.* (2018) simularam no programa TRNSYS a aplicação de estratégias em uma edificação de escritórios na Itália, cuja tipologia era residencial antes da realização do *retrofit*. Os autores analisaram a melhoria do sistema AVAC, o uso de painéis fotovoltaicos e coletores solares para aquecimento de água, o isolamento do envelope, o sombreamento solar e a ventilação natural. A aplicação conjunta dessas estratégias possibilitou redução de 71,4% do consumo energético para resfriamento e 61,0% para aquecimento, além de garantir conforto térmico e visual em mais de 95% dos períodos de ocupação da edificação. Pioppi *et al.* (2020) simularam nos programas computacionais DesignBuilder e EnergyPlus uma edificação de escritórios situada na Itália. Foram avaliadas a mudança de comportamento dos ocupantes em relação ao uso consciente dos sistemas AVAC e de iluminação, da iluminação natural e da ventilação natural, o que impactou na redução do consumo energético da edificação em até 17% e dos custos com energia elétrica em até 20%. Comparou-se essa alternativa à implementação de painéis fotovoltaicos, que possibilitou diminuir os custos com energia elétrica em apenas 2,6%.

Embora apenas um estudo da China foi conduzido em edificações residenciais (LI; XU; FAN, 2019), diversos trabalhos foram realizados em edificações comerciais e instituições de ensino chinesas, conforme abordado a seguir.

Chow e Sharples (2016) simularam no programa IES-VE diferentes estratégias de *retrofit* para projetos de edificações de escritórios localizados em distintas zonas climáticas da China. Os autores verificaram que o isolamento térmico do envelope permitiu redução no consumo energético da edificação em até 44%. A combinação desta estratégia com o aumento do intervalo de temperatura de *set-point* do sistema de ar-condicionado e o uso de sombreamento solar resultou em melhoria da performance energética de até 75%. Li *et al.* (2017) verificaram a melhoria da performance energética em edificações comerciais situadas na China após a implantação de diferentes estratégias de *retrofit*, como: isolamento térmico

do envelope, cobertura verde, fachada verde, uso de ventilação natural, reúso de água cinza, uso de fontes renováveis de energia, melhoria no sistema de iluminação e automação predial. Particularmente, os autores verificaram que os painéis fotovoltaicos e os coletores solares produzem o equivalente a 2% a 6% do consumo energético total das edificações, reduzindo a emissão de CO₂ em até 16,8 toneladas por ano.

Liu e Ren (2018) realizaram um estudo com projetos típicos de edificações de escritórios na China, localizadas em diferentes regiões climáticas. As estratégias de *retrofit* consideradas foram: isolamento do envelope, otimização da iluminação natural e ventilação natural, cobertura verde, melhoria dos sistemas de climatização e iluminação e uso de fontes renováveis de energia – como painéis fotovoltaicos e bombas de calor geotérmicas. Yao *et al.* (2016) simularam no programa EnergyPlus dois projetos típicos de edificação comercial considerando diferentes cidades da China e do Reino Unido. Foram analisadas estratégias relacionadas ao isolamento térmico do envelope, melhoria do sistema AVAC e da iluminação natural. Constatou-se que o *retrofit* completo permitiu reduzir o consumo energético total da edificação em até 52,6% na China e 60,0% no Reino Unido.

Zhou *et al.* (2016) simularam em eQUEST uma edificação comercial localizada na China. Os autores verificaram economia de 58% e 64%, respectivamente, do consumo energético para aquecimento e resfriamento com o isolamento térmico do envelope, a melhoria do sistema AVAC e a instalação de bomba de calor geotérmica acoplada ao solo. Zhou *et al.* (2019) realizaram modelagem e simulação nos programas computacionais DesignBuilder e EnergyPlus de diferentes estratégias de *retrofit* aplicadas a quatro salas de aula com distintas orientações, situadas em uma instituição de ensino superior na China. O consumo energético para resfriamento apresentou variações conforme os casos considerados: de -12,8% a 7,6% com o isolamento térmico das paredes da edificação, de 4,0% a 10,0% com a substituição dos vidros das janelas e de 4,1% a 8,3% com a utilização de sombreamento solar. Destaca-se que o valor negativo significa que a estratégia não foi eficaz, pois elevou o consumo de energia. Yang (2017) analisou uma instituição de ensino pública e histórica construída em 1906 na China. Foram consideradas as seguintes alternativas de *retrofit*: melhoria do sistema de climatização, uso de painéis fotovoltaicos e aproveitamento da ventilação natural – que apresentaram até 40% de redução do consumo energético.

3.5.3. Outras tipologias

Ao contrário de edificações com tipologias usuais – tais como residências, instituições de ensino e edificações comerciais – há poucos estudos sobre *retrofits* em edificações especiais como asilos, hospitais, hotéis, museus, entre outros. Isso se deve à maior dificuldade de realizar interferências devido à complexidade das edificações e à necessidade de ausência ou baixo nível de intervenção durante a sua operação (GASPARI; FABBRI; GABRIELLI, 2019).

As Figuras 29 e 30 apresentam a frequência de considerações de cada aspecto e estratégia de *retrofit* nos estudos de caso efetuados em outras tipologias de edificação. Assim como observado para as edificações residenciais e não-residenciais, os maiores percentuais de aspectos considerados foram o ambiental e o econômico – igual a 34,6% – e de estratégias foram isolamento térmico do envelope (33,3%), melhoria dos sistemas de climatização e iluminação (29,2%) e uso de fontes renováveis de energia (14,6%). Ressalta-se também a otimização da iluminação natural e ventilação natural e/ou fachada ventilada em aproximadamente 6% a 10% dos estudos em outras tipologias.

Figura 29 – Frequência de considerações dos aspectos abordados nos estudos de caso realizados em outras tipologias de edificação

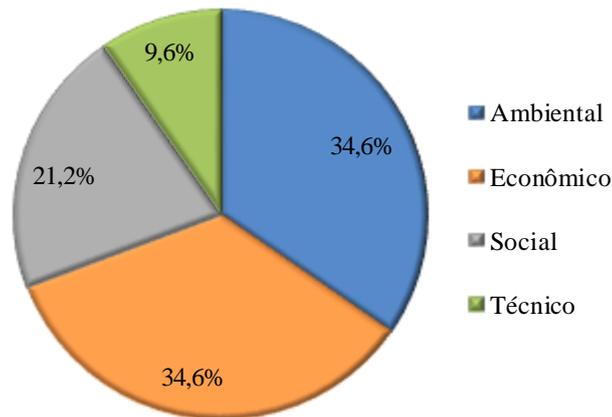
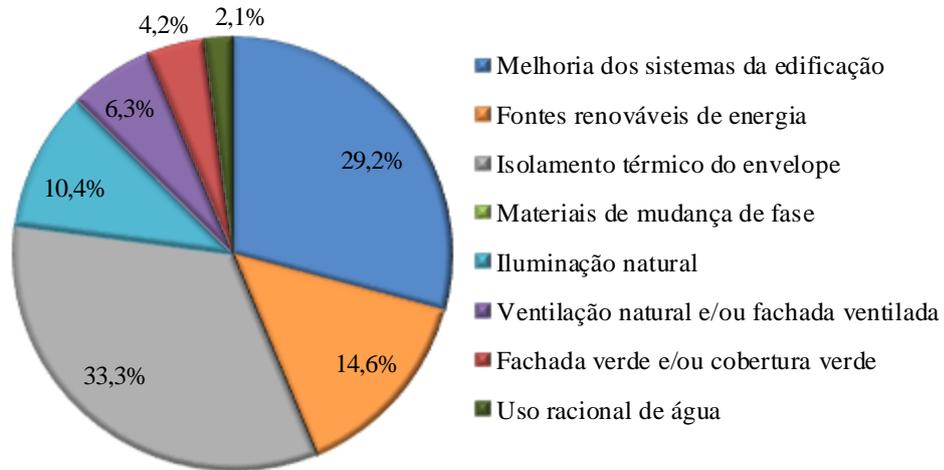


Figura 30 – Frequência de considerações das estratégias de *retrofit* abordadas nos estudos de caso realizados em outras tipologias de edificação



Nas Figuras 31 e 32 constam as distribuições dos aspectos e das estratégias de *retrofit* consideradas em cada estudo de caso efetuado em outras tipologias de edificação, de acordo com o clima do local de estudo. Em todos os climas, os principais aspectos considerados foram o ambiental e o econômico, havendo também frequência significativa do aspecto social. Em geral, a maioria dos estudos envolveu o isolamento térmico do envelope, a melhoria dos sistemas de climatização e iluminação e o uso de fontes renováveis de energia para *retrofit*. O aproveitamento de iluminação natural, ventilação natural e/ou fachada ventilada e fachada verde e/ou cobertura verde representaram, em conjunto, entre 14,3% e 37,5% do total de estratégias nos climas árido, temperado, mediterrâneo e não especificado.

Figura 31– Distribuição dos aspectos considerados nos estudos de caso realizados em outras tipologias de edificação, de acordo com o clima do local de estudo

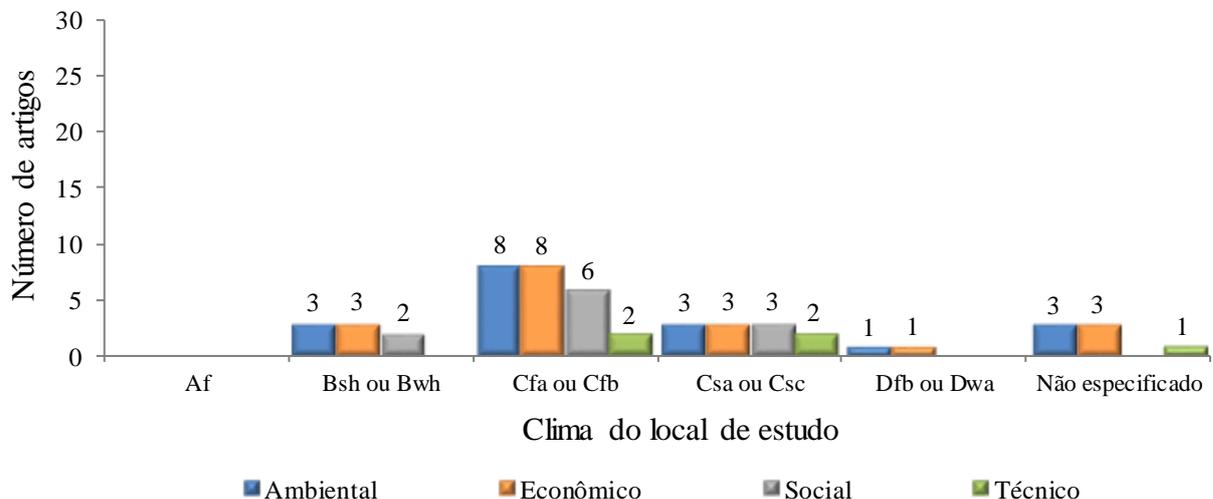
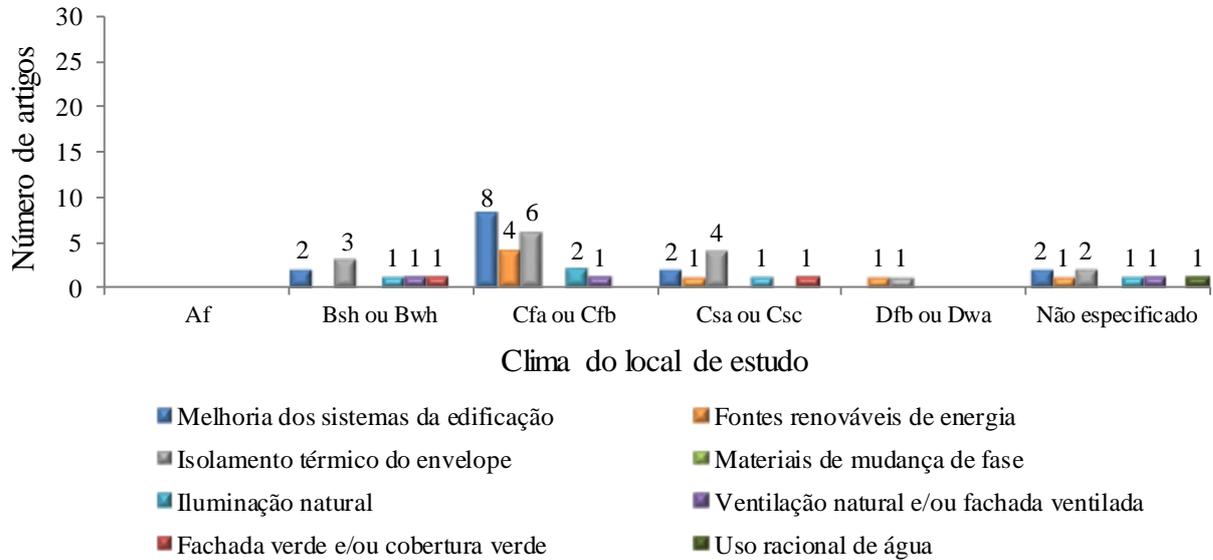


Figura 32 – Distribuição das estratégias de *retrofit* consideradas nos estudos de caso realizados em outras tipologias de edificação, de acordo com o clima do local de estudo



Na sequência, são apresentados os principais resultados dos estudos de caso desenvolvidos em outras tipologias de edificação. Nota-se que determinados artigos avaliaram a realização de *retrofit* com base em apenas uma estratégia, como isolamento térmico do envelope (PIGLIAUTILE et al., 2019; PITTAU et al., 2019; WELDU; AL-GHAMDI, 2019) ou melhoria dos sistemas de climatização e iluminação (CADELANO et al., 2019; NASTASI; MATTEO, 2017).

Tulley, Zhivov e Clark (2017) simularam no programa EnergyPlus um prédio construído nos anos 1950 nos Estados Unidos. A combinação de melhorias no envelope da edificação, melhorias nos sistemas AVAC e de iluminação e uso de coletores solares apresentou até 86% de redução no consumo energético da edificação. Habibi, Obonyo e Memari (2020) analisaram o isolamento térmico da cobertura e a instalação de painéis fotovoltaicos em um cinema construído em 1942 nos Estados Unidos. Segundo os autores, o isolamento térmico do envelope tende a apresentar melhores resultados para edificações situadas em climas frios – contribuindo para a redução do consumo energético para aquecimento – em comparação a climas quentes, em que não diminui significativamente a demanda energética para resfriamento. Esses resultados também foram observados nos estudos de Ozarisooy e Altan (2018) e Slee e Hyde (2016), realizados em climas árido e desértico, mostraram que o isolamento térmico das paredes externas reduziu o consumo energético para aquecimento e não apresentou impacto sobre a demanda para resfriamento.

Taleb (2016) simulou no programa IES-VE um hospital construído em 1984 nos Emirados Árabes Unidos. Foram consideradas as seguintes estratégias de *retrofit*: isolamento

das paredes externas da edificação, substituição dos vidros das janelas, sombreamento solar, cobertura verde e cobertura fria. As estratégias com maior e menor redução do consumo energético para resfriamento da edificação foram, respectivamente, o uso de cobertura verde (24,7%) e o sombreamento solar (1,5%). Lazzeroni *et al.* (2017) simularam no programa IES-VE projetos típicos de diferentes tipologias de edificação na Cisjordânia – residencial unifamiliar, instituição de ensino, edificação comercial e industrial. O isolamento térmico do envelope e a melhoria do sistema de climatização permitiu redução do consumo energético, em comparação às edificações originais, de 29% para residências, 9% para instituições de ensino, 6% para edificações comerciais e 3% para indústrias. Weldu e Al-Ghamdi (2019) realizaram uma Avaliação do Ciclo de Vida em um hotel localizado em Qatar.

William *et al.* (2020) realizaram modelagem e simulação nos programas computacionais DesignBuilder e EnergyPlus de diferentes estratégias de *retrofit* a serem implementadas em um hospital no Egito. Os resultados obtidos mostraram que o isolamento do envelope da edificação e a melhoria nos sistemas AVAC e de iluminação permitem redução no consumo energético da edificação e diminuição nas emissões de CO₂ em até 67%.

Mehr e Sara (2018) analisaram três prédios de administração pública históricos construídos nos séculos XIX e XX na Austrália. Foram consideradas as seguintes estratégias de *retrofit*: adição de isolamento às paredes internas e faces internas das fachadas, substituição das esquadrias, melhoria dos sistemas de climatização e otimização da iluminação natural e ventilação natural. Bertoni *et al.* (2018) consideraram a instalação de painéis fotovoltaicos, a melhoria no sistema de iluminação e o uso de dispositivos para economia de água em projetos típicos de hospitais na Austrália.

Cadelano *et al.* (2019) simularam no programa TRNSYS o uso de bombas de calor geotérmicas em um museu construído em 1949 na Croácia. Em comparação ao sistema de bombas original, que promovia apenas aquecimento da edificação, a nova estratégia manteve o consumo de energia para aquecimento e elevou o consumo de energia para resfriamento. Entretanto, houve redução em torno de 50% do custo da energia elétrica e da emissão de CO₂.

Salem, Bahadori-Jahromi e Mylona (2019) avaliaram a performance energética de um asilo situado no Reino Unido, considerando as seguintes estratégias de *retrofit*: isolamento térmico do envelope, melhoria dos sistemas AVAC e de iluminação, uso de painéis fotovoltaicos, sombreamento solar e ventilação natural. Os autores verificaram que, em comparação à edificação original, a realização de *retrofit* possibilitou reduzir o consumo energético em aproximadamente 50% e 30% sob as condições climáticas atuais e futuras (previsão para 2080), respectivamente.

Delmastro e Gargiulo (2020) investigaram a melhoria dos sistemas de aquecimento, resfriamento e iluminação e o uso de fontes de energia renováveis – como painéis fotovoltaicos, coletores solares para aquecimento de água e bombas de calor geotérmicas – em projetos típicos de edificações residenciais, não-residenciais e outras tipologias na Itália. Em escala regional, as medidas de *retrofit* apresentaram resultados com redução de 50% do consumo energético e 48% das emissões de gases de efeito estufa até 2050. Guardigli *et al.* (2018) analisaram, a partir dos aspectos ambiental e econômico, instituições como asilos e casas de repouso localizadas na Itália. As estratégias consideradas foram o isolamento térmico do envelope e a melhoria do sistema de aquecimento de água, além do uso de painéis fotovoltaicos. A combinação das alternativas, em comparação a cada estratégia separadamente, apresentou melhores resultados a longo prazo, com significativa redução do consumo e dos custos de energia.

Nastasi e Matteo (2017) estudaram o uso de hidrogênio no sistema de aquecimento de um museu histórico construído no século XX na Itália. A adição de hidrogênio ao gás natural nas caldeiras de aquecimento possibilitou a redução da emissão de CO₂ entre 1,5% e 11,5%, a depender da taxa de hidrogênio utilizada. Pigliautile *et al.* (2019) simularam, nos programas DesignBuilder e EnergyPlus, a aplicação de uma camada extra de material às paredes externas de um castelo construído no século XIV na Itália. Não foram realizadas análises em termos energéticos, mas verificou-se alteração das condições ambientais internas, principalmente da umidade. Essa estratégia permitiu melhoria do conforto térmico dos usuários, porém não foi suficiente para garantir os valores recomendados em normas.

Bonamente *et al.* (2018) simularam no programa Termolog EpiX o *retrofit* de um corpo de bombeiros construído em 1985 na Itália. Foram consideradas as seguintes alternativas para a análise multi-critério: isolamento do envelope da edificação, melhoria dos sistemas AVAC e de iluminação, uso de painéis fotovoltaicos e coletores solares. Verificou-se que a melhor combinação das estratégias resultou em até 70% de economia energética, 40% do custo para realização do *retrofit* e 64% de redução na emissão de gases de efeito estufa. Pittau *et al.* (2019) avaliaram o isolamento térmico de um complexo industrial na Itália, por meio da adição de novas camadas de material às paredes externas e ao telhado. Verificou-se redução de 3% a 33% das emissões de CO₂ com o isolamento térmico do envelope da edificação, dependendo do material utilizado.

Trovato, Nocera e Giuffrida (2020) avaliaram a realização de *retrofit*, por meio de Avaliação do Ciclo de Vida, em uma edificação pública construída em 1962 na Itália. Os autores verificaram que o isolamento das paredes externas, a substituição dos vidros das

janelas e a cobertura verde permitiram reduzir o consumo energético para aquecimento em 58,5% e para resfriamento em 33,4%. Além disso, a emissão de CO₂ diminuiu em 54,1%, apresentando *payback* descontado em torno de 20 anos. Buda, Pracchi e Sannasardo (2019) analisaram diversas edificações comerciais e de outras tipologias construídas entre os séculos XI e XX na Itália. As alternativas consideradas foram: substituição de janelas, melhoria dos sistemas de climatização e iluminação e instalação de painéis fotovoltaicos.

Ulpiani *et al.* (2017) simularam nos programas DesignBuilder e EnergyPlus diferentes formas de isolamento do envelope de uma edificação, além do uso de sistema de ventilação mecânica, em um modelo de edificação situado na Itália. Observou-se que a aplicação de módulos de vidro nas fachadas resultou em economia energética para aquecimento entre 3,3% e 8,7%, além de minimizar as variações de temperatura interna. Gaspari, Fabbri e Gabrielli (2019) simularam no programa Termolog EpiX um hospital público construído em 1934 na Itália. O conjunto ideal de estratégias envolveu o isolamento das paredes e da cobertura, a substituição das janelas e a melhoria dos sistemas AVAC e de iluminação. Os resultados mostraram redução da demanda energética em 86,3% e da emissão de CO₂ em 15,2 kg/m², com *payback* igual a 12,1 anos.

3.5.4. Síntese dos resultados

A partir dos resultados obtidos nos 121 estudos de caso selecionados, foi possível verificar a predominância dos aspectos ambiental e econômico, representando juntos aproximadamente 70% do total. Além disso, as principais estratégias de *retrofit* foram o isolamento térmico do envelope, a melhoria dos sistemas de climatização e iluminação e o uso de fontes renováveis de energia – consideradas em mais de 70% dos estudos de caso. Também se observou significativa frequência da otimização da iluminação natural, ventilação natural e fachada ventilada em edificações não-residenciais e outras tipologias, especialmente nos climas árido, temperado e mediterrâneo.

A maioria dos estudos considerou um conjunto de duas ou mais estratégias para *retrofit* de diferentes tipologias de edificação. Não obstante, nota-se significativa quantidade de estudos que avaliaram apenas uma estratégia de *retrofit* em específico, como isolamento térmico do envelope, uso de materiais de mudança de fase, melhoria dos sistemas de climatização e iluminação ou uso de fontes renováveis de energia. Destaca-se que as estratégias de *retrofit* menos comumente abordadas nos artigos selecionados foram o uso de materiais de mudança de fase e o uso racional de água.

Grande parte dos trabalhos foi desenvolvida na Europa, Ásia, Oriente Médio e América do Norte, sendo os resultados representativos principalmente dos climas temperado e mediterrâneo. Ressalta-se que apenas um dos artigos filtrados a partir da revisão sistemática foi desenvolvido no Brasil, com a análise de estratégias passivas em uma instituição de ensino superior.

É notável a elevada quantidade de estudos em edificações residenciais e não-residenciais desenvolvidos na Itália. Ademais, houve diversos trabalhos realizados em edificações comerciais e instituições de ensino na China. Em geral, houve presença considerável de edificações históricas, em que foram utilizadas principalmente as estratégias de isolamento térmico do envelope – com modificações predominantemente na face interna das paredes externas – e melhoria dos sistemas de climatização e iluminação.

De modo geral, observou-se que *retrofits* considerando diferentes estratégias passivas e ativas possibilitaram redução do consumo energético em torno de 30% a 60%. Geralmente maiores percentuais estiveram relacionados à melhoria dos sistemas de climatização e iluminação e ao uso de fontes renováveis de energia. Destaca-se que, em alguns casos, o uso de fontes renováveis de energia permitiu reduzir o consumo de energia da rede elétrica em até 100%, tornando a edificação autossuficiente.

3.6. Considerações para estudos futuros sobre *retrofit*

Diante da crescente produção de estudos sobre *retrofits* de edificações direcionados à melhoria da eficiência energética e da sustentabilidade, é recomendado que novas pesquisas considerem o contexto e as peculiaridades dos diferentes tipos de edificações localizadas em distintas regiões e climas.

Futuros estudos em que sejam propostas estratégias de *retrofit* em edificações devem considerar o efeito das alternativas de *retrofit* adotadas na qualidade do ar e no conforto térmico, visual e acústico dos ocupantes (AGHAMOLAEI; GHAANI, 2020; ZHOU *et al.*, 2016). É importante que os estudos propondo estratégias de *retrofit* em edificações realizem uma estimativa do custo e do tempo de *payback* do investimento, considerando os materiais utilizados e as instalações e serviços necessários para o *retrofit* (GUARDIGLI *et al.*, 2018; HABIBI; OBONYO; MEMARI, 2020). Autores recomendam que futuros estudos analisando estratégias de *retrofit* considerem diferentes cenários econômicos para as alternativas consideradas, como, por exemplo, o aumento do custo da energia elétrica e a redução do custo

dos materiais e da instalação das estratégias (ASCIONE *et al.*, 2019; GUARDIGLI *et al.*, 2018).

Recomenda-se também a consideração de escala regional (comunidade ou distrito) para os *retrofits*, e não apenas edificações, para melhoria da eficiência energética em maior número de edificações, contribuindo para o desenvolvimento sustentável da região de estudo (AGUACIL *et al.*, 2017; ALI *et al.*, 2020; GONZÁLEZ *et al.*, 2017; HÄKKINEN *et al.*, 2019; LEE; SHEPLEY; CHOI, 2019; LONGO *et al.*, 2018; PAIHO *et al.*, 2019; THOMAS; MENASSA; KAMAT, 2018; ZHANG *et al.*, 2018). Ademais, é importante que futuros estudos realizem modelagem da edificação com base em medições detalhadas, a fim de reduzir as incertezas técnicas e econômicas do processo de escolha das estratégias de *retrofit* (LEE; SHEPLEY; CHOI, 2019).

Estudos apontam a importância de haver políticas governamentais de suporte técnico e incentivo financeiro para *retrofits* de edificações direcionados à melhoria da eficiência energética (AGUACIL *et al.*, 2017; BASU; PAUL; SYAL, 2017; D'ALPAOS; BRAGOLUSI, 2018; MEDAL; KIM, 2020; NABER *et al.*, 2019; OGUNTONA *et al.*, 2019; PARDO-BOSCH; CERVERA; YSA, 2019; SIEW, 2018; TROVATO; NOCERA; GIUFFRIDA, 2020). Essa recomendação é bastante válida para países desenvolvidos e em desenvolvimento, nos quais o grande estoque de edificações existentes apresenta elevado potencial de melhoria da performance energética. Entretanto, muitas vezes o aproveitamento deste potencial é limitado por fatores técnicos, sociais e, principalmente, financeiros (BASU; PAUL; SYAL, 2017).

Destaca-se a necessidade de conscientização dos usuários quanto à importância para a sustentabilidade e o retorno financeiro mediante a economia energética ao realizar *retrofits* em edificações (BERG *et al.*, 2017; DIMITROVA *et al.*, 2019; GIANFRATE *et al.*, 2017; LEE; SHEPLEY; CHOI, 2019; OGUNTONA *et al.*, 2019; ZHOU *et al.*, 2016). Além disso, é fundamental que futuros estudos considerem a influência do comportamento dos usuários sobre a performance energética de edificações durante o processo de tomada de decisões quanto às estratégias de *retrofit* (BERG *et al.*, 2017; GIANFRATE *et al.*, 2017; MYHREN *et al.*, 2018; OZARISOY; ALTAN, 2017).

É importante que futuros estudos sobre *retrofit* levem em consideração diferentes aspectos – ambientais, econômicos, sociais, técnicos, entre outros – a fim de obter uma análise multidimensional das possíveis estratégias a serem implementadas, principalmente em edificações históricas (ARTINO *et al.*, 2019; BERG *et al.*, 2017; BESEN; BOARIN, 2018; DIMITROVA *et al.*, 2019; GIANFRATE *et al.*, 2017; LONGO *et al.*, 2018; POMBO;

RIVELA; NEILA, 2016). Portanto, recomenda-se a consideração dos conceitos de análise multi-critério, Avaliação do Ciclo de Vida e edificações de energia zero. As principais considerações ambientais, econômicas, sociais e técnicas a serem levadas em conta para estudos futuros sobre *retrofit* são mostradas no Quadro 3.

Quadro 3 – Principais considerações para estudos futuros sobre *retrofit*

	Limitações	Referências
Ambientais	Consideração de escala regional (comunidade ou distrito).	(AGUACIL <i>et al.</i> , 2017; ALI <i>et al.</i> , 2020; HÄKKINEN <i>et al.</i> , 2019; LEE; SHEPLEY; CHOI, 2019; LONGO <i>et al.</i> , 2018; PAIHO <i>et al.</i> , 2019; THOMAS; MENASSA; KAMAT, 2018; ZHANG <i>et al.</i> , 2018)
Econômicas	Estimativa do custo e do tempo de <i>payback</i> do investimento; Políticas e normas de incentivo financeiro para <i>retrofits</i> .	(AGUACIL <i>et al.</i> , 2017; BASU; PAUL; SYAL, 2017; D'ALPAOS; BRAGOLUSI, 2018; HABIBI; OBONYO; MEMARI, 2020; MEDAL; KIM, 2020; OGUNTONA <i>et al.</i> , 2019; PARDO-BOSCH; CERVERA; YSA, 2019; SIEW, 2018; TROVATO; NOCERA; GIUFFRIDA, 2020)
Sociais	Consideração dos efeitos sobre qualidade do ar e conforto térmico, visual e acústico; Consideração do comportamento dos usuários; Conscientização dos usuários quanto à importância para a sustentabilidade e o retorno financeiro.	(AGHAMOLAEI; GHAANI, 2020; BERG <i>et al.</i> , 2017; DIMITROVA <i>et al.</i> , 2019; GIANFRATE <i>et al.</i> , 2017; LEE; SHEPLEY; CHOI, 2019; OGUNTONA <i>et al.</i> , 2019; OZARISOY; ALTAN, 2017; ZHOU <i>et al.</i> , 2016)
Técnicas	Políticas e normas de suporte técnico para <i>retrofits</i> ; Modelagem da edificação com base em medições detalhadas.	(BASU; PAUL; SYAL, 2017; LEE; SHEPLEY; CHOI, 2019; NABER <i>et al.</i> , 2019; OGUNTONA <i>et al.</i> , 2019)

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho, apresentou-se um panorama geral das estratégias de *retrofit* em edificações para melhoria da eficiência energética e da sustentabilidade, a partir de uma revisão sistemática de literatura envolvendo 165 artigos do banco de dados Scopus, envolvendo estudos realizados em diversos países nos últimos cinco anos. A maioria dos estudos foi realizada na Europa, Ásia, Oriente Médio e América do Norte, sendo representativa principalmente dos climas temperado e mediterrâneo, e envolveu diferentes tipologias de edificações, construídas em distintas épocas.

A realização de *retrofits* em edificações apresenta inúmeros benefícios quanto à redução do consumo energético, diminuição das emissões de gases de efeito estufa e melhoria da qualidade do ambiente interno para os usuários. Não obstante, existem ainda diversos desafios e limitações que podem dificultar a implementação de *retrofits* em determinadas regiões e tipos de edificação, como a falta de conscientização dos usuários, limitações financeiras, restrições técnicas – principalmente em edificações históricas –, ausência de políticas e normas regionais, falta de informações de projeto e incertezas devido a análises unidimensionais. Embora não sejam empregadas em todos os estudos, análises multidimensionais que envolvem aspectos distintos – ambientais, econômicos, sociais e técnicos – são fundamentais para a avaliação e seleção adequada das estratégias de *retrofit*.

As principais estratégias ativas e passivas identificadas nos estudos sobre *retrofits* foram apresentadas, destacando-se as suas vantagens e desvantagens. As estratégias ativas, relacionadas aos sistemas de climatização e iluminação da edificação e ao uso de fontes renováveis de energia, geralmente resultam em redução significativa do consumo energético e da emissão de gases de efeito estufa, além de melhoria do conforto térmico e visual. Porém, é comum apresentarem elevado custo de instalação e resultados variáveis conforme o local de estudo.

Por outro lado, as estratégias passivas aproveitam recursos naturais de forma mais eficiente e geralmente com menor custo, sendo as principais: isolamento térmico do envelope, otimização da iluminação e ventilação natural e fachada ventilada. Essas alternativas possibilitam redução do consumo energético para aquecimento e resfriamento da edificação, redução da emissão de gases de efeito estufa, melhoria da qualidade do ambiente interno e comumente baixo custo de instalação. Estratégias passivas menos comuns referem-se ao uso de materiais de mudança de fase, fachada verde e cobertura verde e uso racional de água – que possuem, em geral, elevado custo de instalação e dificuldade de instalação.

O processo de análise e seleção das estratégias de *retrofit* envolve a utilização de métodos para definir o melhor conjunto de alternativas para uma ou mais edificações. Nesse sentido, a modelagem e simulação energética de edificações são fundamentais para avaliar o desempenho energético das edificações e a qualidade do ambiente interno, auxiliando a tomada de decisão por pesquisadores e profissionais. Diversos estudos sugerem o emprego de técnicas como análise multi-critério e Avaliação do Ciclo de Vida para auxiliar no processo de identificação das melhores estratégias de *retrofit*. Ademais, autores ressaltam os benefícios da consideração de escala regional para *retrofits*, a fim de melhorar a eficiência energética em maior número de edificações e contribuir para o desenvolvimento sustentável da região de estudo.

Este trabalho comparou e discutiu os resultados relevantes dos estudos de caso, que compreendem 73,3% dos artigos selecionados para a revisão sistemática. Em todas as tipologias de edificação e climas dos locais de estudo, os principais aspectos considerados foram o ambiental e o econômico – representando juntos aproximadamente 70% do total. Além disso, as estratégias de *retrofit* mais abordadas foram isolamento térmico do envelope, melhoria dos sistemas de climatização e iluminação e uso de fontes renováveis de energia – consideradas em mais de 70% dos estudos de caso. Verificou-se também significativa frequência do aproveitamento de iluminação natural, ventilação natural e fachada ventilada em edificações não-residenciais ou outras tipologias, principalmente nos climas árido, temperado e mediterrâneo.

Por fim, foram apresentadas considerações para estudos futuros, diante da crescente produção de conteúdo sobre *retrofits* de edificações direcionados à melhoria da eficiência energética e da sustentabilidade. Em geral, recomenda-se que novas pesquisas considerem o as particularidades dos distintos tipos de edificações localizadas em várias regiões e climas; avaliem diferentes cenários econômicos para as alternativas, com estimativa do custo e *payback* do investimento; investiguem os efeitos do *retrofit* sobre a manutenção ou melhoria da qualidade do ambiente interno para os usuários; realizem análises multidimensionais, principalmente em edificações históricas. Além disso, é importante haver políticas governamentais de suporte técnico e incentivo financeiro para realização de *retrofits* e conscientização dos usuários quanto à importância para a sustentabilidade e o retorno financeiro.

4.1. Limitações do trabalho

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, foram identificadas as seguintes limitações:

- Apesar de abranger quantidade considerável de estratégias de *retrofit*, este estudo se limitou à abordagem das alternativas compreendidas nos artigos selecionados, havendo ainda outras estratégias e resultados a serem considerados;
- Devido à busca sistemática, ocorreu elevada concentração de trabalhos em determinados locais e climas, compreendendo poucos estudos de caso na América do Sul e Central, África e Oceania;
- Diante das diferentes considerações nos conceitos utilizados para o cálculo do desempenho energético da edificação e dos métodos usados nos programas computacionais de simulação, houve determinada incerteza na comparação dos resultados de distintos estudos de caso.

4.2. Sugestões para trabalhos futuros

Visando à complementação dos assuntos abordados neste estudo, sugere-se para trabalhos futuros:

- Investigar especificamente estudos de caso situados em locais com climas e contextos menos usuais na literatura, considerando as suas particularidades para comparação com outros trabalhos;
- Explorar mais detalhadamente os principais métodos e programas computacionais de modelagem e simulação energética utilizados para análise e seleção das estratégias de *retrofit*, bem como as variáveis consideradas;
- Analisar a influência de outros fatores sobre a definição e escolha das estratégias de *retrofit*, como, por exemplo: condições estruturais da edificação e efeitos sísmicos, período de análise ou estações do ano consideradas no estudo, conceitos de análise multi-critério, Avaliação do Ciclo de Vida e edificações de energia zero, entre outros;

- Abordar a evolução e o impacto das normas e legislações que orientam e incentivam a realização de *retrofits* de edificações para melhoria da eficiência energética e da sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

- ABDELRAZEK, H.; YILMAZ, Y. Methodology toward cost-optimal and energy-efficient retrofitting of historic buildings. **Journal of Architectural Engineering**, v. 26, n. 4, artigo 101061, 2020, doi: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000433.
- ABDULLAH, H. K.; ALIBABA, H. Z. Retrofits for energy efficient office buildings: integration of optimized photovoltaics in the form of responsive shading devices. **Sustainability**, v. 9, n. 11, artigo 2096, 2017, doi: 10.3390/su9112096.
- ABIDIN, N. I. A.; ZAKARIA, R.; PAUZI, N. N. M.; MUSTAFFAR, M.; SALEH, A. L.; BANDI, M. Building energy intensity measurement for potential retrofitting of zero energy building in higher learning institution. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 620, artigo 012070, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/620/1/012070.
- ABU-HIJLEH, B.; MANNEH, A.; ALNAQBI, A.; ALAWADHI, W.; KAZIM, A. Refurbishment of public housing villas in the United Arab Emirates (UAE): energy and economic impact. **Energy Efficiency**, v. 10, p. 249-264, 2017, doi: 10.1007/s12053-016-9451-x.
- ADAM, M.; MUNTEAN, D. M.; POPOV, M.; GRECEA, D.; UNGUREANU, V. Integrated energy efficient cooling solutions for large prefabricated panels collective dwellings from the 1970s. **E3S Web of Conferences**, v. 85, artigo 01004, 2019, doi: 10.1051/e3sconf/20198501004.
- AFSHARI, A.; NIKOLOPOULOU, C.; MARTIN, M. Life-cycle analysis of building retrofits at the urban scale – A case study in United Arab Emirates. **Sustainability**, v. 6, n. 1, p. 453–473, 2014, doi: 10.3390/su6010453.
- AGHAMOLAEI, R.; GHAANI, M. R. Balancing the impacts of energy efficiency strategies on comfort quality of interior places: application of optimization algorithms in domestic housing. **Journal of Building Engineering**, v. 29, artigo 101174, 2020, doi: 10.1016/j.job.2020.101174.
- AGUACIL, S.; LUFKIN, S.; REY, E.; CUCHI, A. Application of the cost-optimal methodology to urban renewal projects at the territorial scale based on statistical data – a case study in Spain. **Energy and Buildings**, v. 144, p. 42-60, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.03.047.
- ALI, H. H.; AL-HASHLAMUN, R. Building envelope thermal upgrade for school buildings in Jordan. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 290, artigo 012068, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/290/1/012068.
- ALI, U.; SHAMSI, M. H.; BOHACEK, M.; HOARE, C.; PURCELL, K.; MANGINA, E.; O'DONNELL, J. A data-driven approach to optimize urban scale energy retrofit decisions for residential buildings. **Applied Energy**, v. 267, artigo 114861, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114861.
- ANNEX 50. **Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Residential Buildings, Building Renovation Case Studies**. [S.l.]: Copenhagen Centre on Energy Efficiency, 2011. Disponível em: <https://c2e2.unepdtu.org/kms_object/prefabricated-systems-for-

low-energy-renovation-of-residential-buildings-building-renovation-case-studies-iea-ecbcs-annex-50>. Acesso em: 01 mar. 2020.

- ARDENTE, F.; BECCALI, M.; CELLURA, M.; MISTRETTA, M. Energy and environmental benefits in public buildings as a result of retrofit actions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 1, p. 460–470, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.09.022.
- ARDIANI, N. A.; SUHENDRI; KOERNIAWAN, M. D.; BUDIARTO, R. Building retrofit to improve energy performance from office to accommodation. Case study: Tower Building, Nottingham, UK. **MATEC Web of Conferences**, v. 206, artigo 02010, 2018, doi: 10.1051/mateconf/201820602010.
- ARTINO, A.; EVOLA, G.; MARGANI, G.; MARINO, E. M. Seismic and energy retrofit of apartment buildings through utoclaved aerated concrete (AAC) blocks infill walls. **Sustainability**, v. 11, n. 14, artigo 3939, 2019, doi: 10.3390/su11143939.
- ASADI, E.; SILVA, M. G.; ANTUNES, C. H.; DIAS, L. Multi-objective optimization model for building retrofit strategies using TRNSYS simulations, GenOpt and MATLAB. **Building and Environment**, v. 56, p. 370-378, 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.04.005.
- ASCIONE, F.; BIANCO, N.; MASI, R. F. D.; MASTELLONE, M.; VANOLI, G. P. Phase change materials for reducing cooling energy demand and improving indoor comfort: A step-by-step retrofit of a mediterranean educational building. **Energies**, v. 12, n. 19, artigo 3661, 2019, doi: 10.3390/en12193661.
- AUSTRÁLIA. Department of the Environment and Energy. **Australian Energy Update 2019**. Canberra: 2019.
- BAGGIO, M.; TINTERI, C.; MORA, T. D.; RIGHI, A.; PERON, F.; ROMAGNONI, P. Sustainability of a historical building renovation design through the application of LEED® rating system. **Energy Procedia**, v. 113, p. 382-389, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.04.017.
- BALACHANDRAN, V.; MAHANTA, N. R.; SAMUEL, A. K. Strategical framework in retrofitting existing buildings using sustainable design techniques in the UAE. In: Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET), 2020, Dubai, Emirados Árabes Unidos. **Anais eletrônicos...** Dubai, Emirados Árabes Unidos, 2020, doi: 10.1109/ASET48392.2020.9118379.
- BALOCCO, C.; COLAIANNI, A. Assessment of energy sustainable operations on a historical building. The Dante Alighieri High School in Florence. **Sustainability**, v. 10, n. 6, artigo 2054, 2018, doi: 10.3390/su10062054.
- BARLOW, S.; FIALA, D. Occupant comfort in UK offices – How adaptive comfort theories might influence future low energy office refurbishment strategies. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 7, p. 837–846, 2007, doi: 10.1016/j.enbuild.2007.02.002.
- BASU, C.; PAUL, V. K.; SYAL, M. G. M. Innovations for energy efficiency retrofitting financing in construction sector: Indian perspective. In: International Conference on Sustainable Infrastructure, 2017, Nova Iorque, Estados Unidos. **Anais eletrônicos...** Nova Iorque, Estados Unidos, 2017.
- BECCHIO, C.; BOTTERO, M. C.; CORGNATI, S. P.; DELL’ANNA, F. Decision making for sustainable urban energy planning: an integrated evaluation framework of alternative

- solutions for a NZED (Net Zero-Energy District) in Turin. **Land Use Policy**, v. 78, p. 803-817, 2018, doi: 10.1016/j.landusepol.2018.06.048.
- BELPOLITI, V.; GHAZAL, R. A.; OUSADOU, N. O.; OBAID, D. G. A comparative analysis of retrofit versus new construction: the case study of Mohammed Bin Rashid Housing Establishment headquarter (MBRHE). In: *Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, 2019, Dubai, Emirados Árabes Unidos. **Anais eletrônicos...** Dubai, Emirados Árabes Unidos, 2019, doi: 10.1109/ICASET.2019.8714556.
- BERARDI, U.; MANCA, M. The energy saving and indoor comfort improvements with latent thermal energy storage in building retrofits in Canada. **Energy Procedia**, v. 111, p. 462-471, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.208.
- BERG, F.; FLYEN, A.; GODBOLT, A. L.; BROSTRÖM, T. User-driven energy efficiency in historic buildings: a review. **Journal of Cultural Heritage**, v. 28, p. 188-195, 2017, doi: 10.1016/j.culher.2017.05.009.
- BERTONE, E.; SAHIN, O.; STEWART, R. A.; ZOU, P. X. W.; ALAM, M.; HAMPSON, K.; BLAIR, E. Role of financial mechanisms for accelerating the rate of water and energy efficiency retrofits in Australian public buildings: Hybrid Bayesian Network and System Dynamics modelling approach. **Applied Energy**, v. 210, p. 409-419, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.08.054.
- BESSEN, P.; BOARIN, P. The future of historic buildings: retrofitting to improve the thermal performance of New Zealand architectural heritage. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, v. 217, p. 15-27, 2018, doi: 10.2495/SDP180021.
- BIOLCHINI, J. C. A.; MIAN, P. G.; NATALI, A. C. C.; CONTE, T. U.; TRAVASSOS, G. H. Scientific research ontology to support systematic review in software engineering. **Advanced Engineering Informatics**, v. 21, n. 2, p. 133-151, 2007, doi: 10.1016/j.aei.2006.11.006.
- BITTENBINDER, F.; LIU, C.; MORETTI, N.; TAGLIABUE, L. C.; CIRIBINI, A. L. C.; CECCONI, F. R. KOVACIC, I. The organization of a “Learnscape” node in the cognitive university campuses network in Poveglia Island. **Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems**, v. 8, n. 4, p. 788-814, 2020, doi: 10.13044/j.sdewes.d7.0317.
- BONAMENTE, E.; BRUNELLI, C.; CASTELLANI, F.; GARINEI, A.; BIONDI, L.; MARCONI, M.; PICCIONI, E. A life-cycle approach for multi-objective optimisation in building design: methodology and application to a case study. **Civil Engineering and Environmental Systems**, v. 35, n. 1-4, p. 158-179, 2018, doi: 10.1080/10286608.2019.1576646.
- BRAMBILLA, A.; SALVALAI, G.; IMPERADORI, M.; SESANA, M. M. Nearly zero energy building renovation: From energy efficiency to environmental efficiency, a pilot case study. **Energy and Buildings**, v. 166, p. 271-283, 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.02.002.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2020 – Ano base 2019: Relatório Síntese**. Rio de Janeiro, 2020.
- BRUNORO, S.; GIULIO, R. D.; LUIG, K.; JANSEN, D.; BIZZARRI, G. Optimizing energy efficiency in collective self-organized housing: oriented business model and application.

- Journal of Architectural Engineering**, v. 24, n. 3, 2018, doi: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000317.
- BURROUGHS, S. Improving office building energy-efficiency ratings using a smart-engineering–computer-simulation approach: an Australian case study. **Advances in Building Energy Research**, v. 12, n. 2, p. 217-234, 2018, doi: 10.1080/17512549.2017.1287127.
- CADELANO, G.; CICOLIN, F.; EMMI, G.; MEZZASALMA, G.; POLETTO, D.; GALGARO, A.; BERNARDI, A. Improving the energy efficiency, limiting costs and reducing CO₂ emissions of a museum using geothermal energy and energy management policies. **Energies**, v. 12, n. 16, artigo 3192, 2019, doi: 10.3390/en12163192.
- CAMPBELL, J. Is your building a candidate for adaptive reuse?. **Journal of Property Management**, v. 61, n. 1, 1996.
- CAMPOS, J.; CSONTOS, C.; HARMAT, A.; CSÜLLÖG1, G.; MUNKÁCSY, B. Heat consumption scenarios in the rural residential sector: the potential of heat pump-based demand-side management for sustainable heating. **Energy, Sustainability and Society**, v. 10, artigo 40, 2020, doi: 10.1186/s13705-020-00271-4.
- CEBALLOS-FUENTEALBA, I.; ÁLVAREZ-MIRANDA, E.; TORRES-FUCHSLOCHER, C.; CAMPO-HITSCHFELD, M. L.; DÍAZ-GUERRERO, J. A simulation and optimisation methodology for choosing energy efficiency measures in non-residential buildings. **Applied Energy**, v. 256, artigo 113953, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113953.
- CHANG, S.; CASTRO-LACOUTURE, D.; YAMAGATA, Y. Decision support for retrofitting building envelopes using multi-objective optimization under uncertainties. **Journal of Building Engineering**, v. 32, artigo 101413, 2020, doi: 10.1016/j.jobe.2020.101413.
- CHEN, Y.; HONG, T.; PIETTE, M. A. Automatic generation and simulation of urban building energy models based on city datasets for city-scale building retrofit analysis. **Applied Energy**, v. 205, p. 323-335, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.07.128.
- CHO, H. M.; YUN, B. Y.; YANG, S.; WI, S.; CHANG, S. J.; KIM, S. Optimal energy retrofit plan for conservation and sustainable use of historic campus building: case of cultural property building. **Applied Energy**, v. 275, artigo 115313, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115313.
- CHOW, D. H. C.; SHARPLES, S. The feasibility of retrofitting existing office buildings to combat energy consumption due to future climate change in three key regions of China. In: First International Conference on Sustainable Buildings and Structures, 2015, Suzhou, China. **Anais eletrônicos...** Suzhou, China, 2015.
- CHRISTEN, M.; ADEY, B. T.; WALLBAUM, H. On the usefulness of a cost-performance indicator curve at the strategic level for consideration of energy efficiency measures for building portfolios. **Energy and Buildings**, v. 119, p. 267–282, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.02.056.
- CIUGUDEANU, C.; BEU, D.; RASTEI, E. Living building laboratory – educational building project in Cluj-Napoca. **Energy Procedia**, v. 85, p. 125-131, 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2015.12.282.

- CLIMATE-DATA. **Climate-Data**. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org>>. Acesso em: 21 ago. 2020.
- COSTA-CARRAPIÇO, I.; RASLAN, R.; GONZÁLEZ, J. A systematic review of genetic algorithm-based multi-objective optimisation for building retrofitting strategies towards energy efficiency. **Energy and Buildings**, v. 210, artigo 109690, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109690.
- CUCCA, G.; IANAKIEV, A. Assessment and optimisation of energy consumption in building communities using an innovative co-simulation tool. **Journal of Building Engineering Assessment**, v. 32, artigo 101681, 2020, doi: 10.1016/j.job.2020.101681.
- DADZIE, J.; DING, G.; RUNESON, G. Relationship between sustainable technology and building age: evidence from Australia. **Procedia Engineering**, v. 180, p. 1131-1138, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.273.
- D'AGOSTINO, D.; CUNIBERTI, B.; MASCHIO, I. Criteria and structure of a harmonised data collection for NZEBs retrofit buildings in Europe. **Energy Procedia**, v. 140, p. 170-181, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.11.133.
- D'ALPAOS, C.; BRAGOLUSI, P. Multicriteria prioritization of policy instruments in buildings energy retrofit. **Valori e Valutazioni**, v. 21, p. 16-24, 2018.
- DELMASTRO, C.; GARGIULO, M. Capturing the long-term interdependencies between building thermal energy supply and demand in urban planning strategies. **Applied Energy**, v. 268, artigo 114774, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114774.
- DIMITROVA, E.; PETROVA-TASHEVA, M.; MUTAFCHIISKA, I.; BUROV, A. Energy-related policy in the housing sector of Bulgaria: in search for a meeting point of social and technical dimensions. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 329, artigo 012005, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/329/1/012005.
- DJORDJEVIĆ, K. T.; JOKSIMOVIĆ, O. D.; JOVANOVIĆ-POPOVIĆ, M. D. Emission reductions energy consumption and CO₂ trough (sic) refurbishment of residential buildings' roofs by applying the green roof system – Case study. **Thermal Science**, v. 22, n. 4, p. 1217-1229, 2018, doi: 10.2298/TSCI170530127D.
- DOUGLAS, J. **Building adaptation**. 2. ed. [S.l.]: Routledge, 2006.
- DROUILLES, J.; AGUACIL, S.; HOXHA, E.; JUSSELME, T.; LUFKIN, S.; REY, E. Environmental impact assessment of Swiss residential archetypes: a comparison of construction and mobility scenarios. **Energy Efficiency**, v. 12, p. 1661-1689, 2019, doi: 10.1007/s12053-019-09811-0.
- EL-DARWISH, I.; GOMAA, M. Retrofitting strategy for building envelopes to achieve energy efficiency. **Alexandria Engineering Journal**, v. 56, p. 579–589, 2017.
- ELIOPOULOU, E.; MANTZIOU, E. Architectural Energy Retrofit (AER): an alternative building's deep energy retrofit strategy. **Energy and Buildings**, v. 150, p. 239-252, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.05.001.
- ENERGY CHARTER SECRETARIAT. **China Energy Efficiency Report**. Brussels: 2018.
- ESTADOS UNIDOS. Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. **2011 Buildings Energy Data Book**. 2012.
- EUROPEAN COMMISSION. **Energy performance of buildings directive**. 2019. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient>>

buildings/energy-performance-buildings-directive_en?redir=1>. Acesso em: 15 nov. 2020.

- FALKE, T.; SCHNETTLER, A. Investment planning of residential energy supply systems using dual dynamic programming. **Sustainable Cities and Society**, v. 23, p. 16-22, 2016, doi: 10.1016/j.scs.2016.02.014.
- FERENHOF, H. A.; FERNANDES, R. F. Desmistificando a revisão de literatura como base para redação científica: Método SSF. **Revista ACB: Biblioteconomia em Santa Catarina**, v. 21, n. 3, p. 550-563, 2016.
- FERNANDES, L. O.; LABAKI, L. C.; MATHEUS, C.; LANTELME, E. Procedure for analysis of thermo-energetic and economic performance of passive strategies for retrofitting a building in Brazil. **Revista Ingeniería de Construcción**, v. 33, n. 3, p. 251-262, 2018, doi: 10.4067/S0718-50732018000300251.
- FERRANTE, A.; FOTOPOULOU, A.; MAZZOLI, C. Sustainable urban regeneration through densification strategies: the Kallithea district in Athens as a pilot case Study. **Sustainability**, v. 12, n. 22, artigo, 9462, 2019, doi: 10.3390/su12229462.
- FREGONARA, E.; CARBONARO, C.; PASQUARELLA, O. LCC analysis to evaluate the economic sustainability of technological scenarios on the district scale. **Valori e Valutazioni**, v. 21, p. 59-73, 2018.
- FREGONARA, E.; GIORDANO, R.; ROLANDO, D.; TULLIANI, J. Integrating environmental and economic sustainability in new building construction and retrofits. **Journal of Urban Technology**, v. 23, n. 4, p. 3-28, 2016, doi: 10.1080/10630732.2016.1157941.
- FREGONARA, E.; VERSO, V. R. M. L.; LISA, M.; CALLEGARI, G. Retrofit scenarios and economic sustainability. a case-study in the Italian context. **Energy Procedia**, v. 111, p. 245-255, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.026.
- GASPARI, J.; FABBRI, K.; GABRIELLI, L. Retrofitting hospitals: a parametric design approach to optimize energy efficiency. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 290, artigo 012130, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/290/1/012130.
- GIANFRATE, V.; PICCARDO, C.; LONGOA, D.; GIACHETTA, A. Rethinking social housing: behavioural patterns and technological innovations. **Sustainable Cities and Society**, v. 33, p. 102-112, 2017, doi: 10.1016/j.scs.2017.05.015.
- GIGLIARELLI, E.; CALCERANO, F.; CESSARI, L. Heritage bim, numerical simulation and decision support systems: an integrated approach for historical buildings retrofit. **Energy Procedia**, v. 133, p. 135-144, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.379.
- GILLICH, A.; SUNIKKA-BLANK, M.; FORD, A. Lessons for the UK Green Deal from the US BBNP. **Building Research & Information**, v. 45, n. 4, p. 384-395, 2017, doi: 10.1080/09613218.2016.1159500.
- GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. **Energy and Buildings**, v. 18, n. 1, p. 11-23, 1992, doi: 10.1016/0378-7788(92)90047-K.
- GOHARDANI, N.; BJORK, F. Sustainable refurbishment in building technology. **Smart and Sustainable Built Environment**, v. 1, n. 3, p. 241-252, 2012.

- GOLZ, S.; NIKOLOWSKI, J.; NAUMANN, T. Energy saving and climate adaptation of buildings: a paradox?. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 290, artigo 012164, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/290/1/012164.
- GONZÁLEZ, A. G.; ZOTANO, M. A. G.; SWAN, W.; BOUILLARD, P.; ELKADI, H. Maturity Matrix Assessment: evaluation of energy efficiency strategies in Brussels historic residential stock. **Energy Procedia**, v. 111, p. 407-416, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.202.
- GORSE, C.; HIGHFIELD, D. **Refurbishment and Upgrading of Buildings**. 2. ed. Abingdon: Spon Press, 2009.
- GUARDIGLI, L.; BRAGADIN, M. A.; FORNACE, F. D.; MAZZOLI, C.; PRATI, D. Energy retrofit alternatives and cost-optimal analysis for large public housing stocks. **Energy and Buildings**, v. 166, p. 48-59, 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.02.003.
- HABIBI, S.; OBONYO, E. A.; MEMARI, A. M. Design and development of energy efficient re-roofing solutions. **Renewable Energy**, v. 151, p. 1209–1219, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.11.128.
- HÄKKINEN, T.; ALA-JUUSELA, M.; MÄKELÄINEN, T.; JUNG, N. Drivers and benefits for district-scale energy refurbishment. **Cities**, v. 94, p. 80-95, 2019, doi: 10.1016/j.cities.2019.05.019.
- HEJTMÁNEK, P.; VOLF, M.; SOJKOVÁ, K.; BRANDEJS, R.; KABRHEL, M.; BEJČEK, M.; NOVÁK, E.; LUPÍŠEK, A. First stepping stones of alternative refurbishment modular system leading to zero energy buildings. **Energy Procedia**, v. 111, p. 121-130, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.014.
- HOSSEINI, S. M.; SHIRMOHAMMADI, R.; ASLANI, A. Achieving to a low carbon-energy commercial building in the hot-dry climate area. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, 2020, doi: 10.1080/15567036.2020.1826013.
- HU, M. Assessment of effective energy retrofit strategies and related impact on indoor environmental quality: a case study of an elementary school in the State of Maryland. **Journal of Green Building**, v. 12, n. 2, p. 38-55, 2017, doi: 10.3992/1943-4618.12.2.38.
- IZIEADIANA, N.; ZAKARIA, R.; SHAMSUDDIN, S. M.; AHMAD, F. Decision making of green technology retrofitting in higher learning institution. **International Journal of Advanced Science and Technology**, v. 29, n. 6, p. 2033-2042, 2020.
- JAFARI, A.; VALENTIN, V. Proposing a conceptual decision support system for building energy retrofits considering sustainable triple bottom line criteria. In: Construction Research Congress: Construction Information Technology, 2018, New Orleans, Estados Unidos. **Anais eletrônicos...** New Orleans, Estados Unidos, 2018.
- JOHANSSON, T.; OLOFSSON, T.; MANGOLD, M. Development of an energy atlas for renovation of the multifamily building stock in Sweden. **Applied Energy**, v. 203, p. 723-736, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.06.027.
- JOPPOLO, C. M.; CURTO, D. D.; LUCIANI, A.; VALISI, L. P.; BELLEBONO, M. Keeping it modern, making it sustainable. Monitoring and energy retrofitting the Urbino University Colleges. **Energy Procedia**, v. 133, p. 243-256, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.363.

- JAGARAJAN, R.; ASMONI, M. N. A. M.; MOHAMMED, A. H.; JAAFAR, M. N.; MEI, J. L. Y.; BABA, M. Green retrofitting – A review of current status, implementations and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, p. 1360-1368, 2017.
- JORGJI, O.; BARI, R. D. LENZ, K. GANTNER, J.; HORN, R. Analysing the impact of retrofitting and new construction through probabilistic life cycle assessment. A method applied to the environmental-economic payoff value of an intervention case in the Albanian building sector. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 323, artigo 012184, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/323/1/012184.
- KAEWUNRUEN, S.; SRESAKOOLCHAI, J.; KERINNONTA, L. Potential reconstruction design of an existing townhouse in Washington DC for approaching net zero energy building goal. **Sustainability**, v. 11, n. 23, artigo 6631, 2019, doi: 10.3390/su11236631.
- KASS, K.; BLUMBERGA, A.; BLUMBERGA, D.; ZOGLA, G.; KAMENDERS, A.; KAMENDERE, E. Pre-assessment method for historic building stock renovation evaluation. **Energy Procedia**, v. 113, p. 346-353, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.04.004.
- KASTIUKAS, G.; ZHOU, X. Green integrated structural elements for retrofitting and new construction of buildings. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 660, artigo 012074, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/660/1/012074.
- KIM, J. T.; YU, C. W. F. Sustainable development and requirements for energy efficiency in buildings – The Korean perspectives. **Indoor and Built Environment**, v. 27, n. 6, p. 734-751, 2018, doi: 10.1177/1420326X18764618.
- KONSTANTINOU, T.; KNAACK, U. Refurbishment of residential buildings: a design approach to energy-efficiency upgrades. **Procedia Engineering**, v. 21, p. 666-675, 2011.
- LABEODAN, T.; BAKKER, C. D.; ROSEMANN, A.; ZEILER, W. On the application of wireless sensors and actuators network in existing buildings for occupancy detection and occupancy-driven lighting control. **Energy and Buildings**, v. 127, p. 75-83, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.05.077.
- LANGSTON, C. Green adaptive reuse: issues and strategies for the built environment. In: WU, D. D. **Modeling Risk Management in Sustainable Construction**. [S.l.]: Springer, 2011. p. 199-209.
- LASSANDRO, P.; COSOLA, T.; Climate change mitigation: resilience indicators for roof solutions. **International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment**, v. 9, n. 1, p. 4-17, 2018, doi: 10.1108/IJDRBE-11-2016-0046.
- LAZZERONI, P.; OLIVERO, S.; STIRANO, F.; MICONO, C.; MONTALDO, P.; ZANZOTTERA, G.; CALÍ, F. U.; REPETTO, M. Energy efficiency measures for buildings in Hebron city and their expected impacts in the distribution grid. **Procedia Engineering**, v. 134, p. 121–130, 2017.
- LEE, J.; SHEPLEY, M. M.; CHOI, J. Exploring the effects of a building retrofit to improve energy performance and sustainability: a case study of Korean public buildings. **Journal of Building Engineering**, v. 25, artigo 100822, 2019, doi: 10.1016/j.job.2019.100822.
- LEE, M. S. N.; MASROM, M. A. N.; MOHAMED, S.; GOH, K. C.; SARPIN, N.; MANAP, N. Examining risk as guideline in design stage for green retrofits projects: a review.

- IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 723, artigo 012043, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/713/1/012043.
- LI, G.; XU, Y.; FAN, Y. The design of sustainable retrofitting strategies and energy-efficiency optimization for residential buildings. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 556, artigo 012054, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/556/1/012054.
- LI, Y.; REN, J.; JING, Z.; JIANPING, L.; YE, Q.; LV, Z. The existing building sustainable retrofit in China – a review and case study. **Procedia Engineering**, v. 205, p. 3638-3645, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.224.
- LIAPOPOULOU, E.; THEODOSIOU, T. Energy performance analysis and low carbon retrofit solutions for residential buildings. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 410, artigo 012026, 2020, doi: 10.1088/1755-1315/410/1/012026.
- LINGARD, J. Residential retrofit in the UK: The optimum retrofit measures necessary for effective heat pump use. **Building Services Engineering Research and Technology**, p. 1-14, 2020, doi: 10.1177/0143624420975707.
- LIU, Q.; REN, J. Research on technology clusters and the energy efficiency of energy-saving retrofits of existing office buildings in different climatic regions. **Energy, Sustainability and Society**, v. 8, artigo 24, 2018, doi: 10.1186/s13705-018-0165-0.
- LIU, Q.; REN, J. Research on the building energy efficiency design strategy of Chinese universities based on green performance analysis. **Energy and Buildings**, v. 224, artigo 110242, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110242.
- LIU, Y. S.; LIU, C. H.; LI, W. A review of the existing residential building retrofit in Tianjin, China. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 329, artigo 012036, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/329/1/012036.
- LONGO, D.; BOERI, A.; GIANFRATE, V.; PALUMBO, E.; BOULANGER, S. O. M. Resilient cities: mitigation measures for urban districts. A feasibility study. **International Journal of Sustainable Development and Planning**, v. 13, n. 5, p. 734-745, 2018, doi: 10.2495/SDP-V13-N5-734-745.
- LUCCHI, E.; DELERA, A. C. Enhancing the historic public social housing through a user-centered design-driven approach. **Buildings**, v. 10, n. 9, artigo 159, 2020, doi: 10.3390/buildings10090159.
- MA, Z.; COOPER, P.; DALY, D.; LEDO, L. Existing building retrofits: methodology and state-of-the-art. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 889-902, 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.08.018.
- MANCINI, F.; CLEMENTE, C.; CARBONARA, E.; FRAIOLI, S. Energy and environmental retrofitting of the university building of Orthopaedic and Traumatological Clinic within Sapienza Città Universitaria. **Energy Procedia**, v. 126, p. 195-202, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.08.140.
- MANNI, M.; TECCE, R.; CAVALAGLIO, G.; COCCIA, V.; NICOLINI, A.; PETROZZI, A. Architectural and energy refurbishment of the headquarter of the University of Teramo. **Energy Procedia**, v. 126, p. 565-572, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.08.290.
- MARINI, A.; PASSONI, C.; BELLERI, A.; FEROLDI, F.; PRETI, M.; METELLI, G.; RIVA, P.; GIURIANI, E.; PLIZZARI, P. Combining seismic retrofit with energy

- refurbishment for the sustainable renovation of RC buildings: a proof of concept. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 21, 2017, doi: 10.1080/19648189.2017.1363665.
- MARIQUE, A.; ROSSI, B. Cradle-to-grave life-cycle assessment within the built environment: comparison between the refurbishment and the complete reconstruction of an office building in Belgium. **Journal of Environmental Management**, v. 224, p. 396-405, 2018, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.02.055.
- MAURO, G. M.; MENNA, C.; VITIELLO, U.; ASPRONE, D.; ASCIONE, F.; BIANCO, N.; PROTA, A.; VANOLI, G. P. A multi-step approach to assess the lifecycle economic impact of seismic risk on optimal energy retrofit. **Sustainability**, v. 9, n. 6, artigo 989, 2017, doi: 10.3390/su9060989.
- MAURO, M.; ZUZANA, P.; UMBERTO, B.; SILVANA, F. L.; FELIPE, P.; TERESA, B. The energy retrofit of building façades in 22@ innovation district of Barcelona: energy performance and cost-benefit analysis. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 609, n. 7, artigo 072067, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/609/7/072067.
- MCARTHUR, J. J.; JOFEH, C. G. H. Portfolio retrofit evaluation: a methodology for optimizing a large number of building retrofits to achieve triple-bottom-line objectives. **Sustainable Cities and Society**, v. 27, p. 263-274, 2016, doi: 10.1016/j.scs.2016.03.011.
- MCDOWELL, C.; KOKOGIANNAKIS, G.; COOPER, P.; TIBBS, M. A bottom-up data collection methodology for characterising the residential building stock in Australia. In: Central Europe towards Sustainable Building (CEBS), 2016, Praga, República Checa. **Anais eletrônicos...** Praga, República Checa, 2016.
- MECCA, U.; PIANTANIDA, P.; REBAUDENGO, M.; VOTTAR, A. Indirect green façade systems: a proposal of a global performance indicator for in/out evaluation. Section In: International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM), 2019, Albena, Bulgária. **Anais eletrônicos...** Albena, Bulgária, 2019, doi: 10.5593/sgem2019V/6.3/S10.060.
- MEDAL, L.; KIM, A. Context-driven factors for implementing energy efficiency retrofit in a portfolio of buildings. In: Construction Research Congress: Infrastructure Systems and Sustainability, 2020, Tempe, Estados Unidos. **Anais eletrônicos...** Tempe, Estados Unidos, 2020.
- MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. [S.l.]: IBRACON, 2011.
- MEHR, S. Y.; WILKINSON, S. Technical issues and energy efficient adaptive reuse of heritage listed city halls in Queensland Australia. **International Journal of Building Pathology and Adaptation**, v. 36, n. 5, p. 529-542, 2018, doi: 10.1108/ijbpa-02-2018-0020.
- MICKAITYTE, A.; ZAVADSKAS, E. K.; KAKLAUSKAS, A.; TUPENAITE, L. The concept model of sustainable buildings refurbishment. **International Journal of Strategic Property Management**, v. 12, n. 1, p. 53-68, 2008, doi: 10.3846/1648-715X.2008.12.53-68.
- MIRZAEI, K.; SAFARI, A.; ZALILZADEH, S.; MOSTAFAZADEH, F.; TAVAKOLAN, M.; SAFARI, M. Environmental, social, and economic benefits of buildings energy

- retrofit projects: a case study in Iran's construction industry. In: Construction Research Congress: Infrastructure Systems and Sustainability, 2020, Tempe, Estados Unidos. **Anais eletrônicos...** Tempe, Estados Unidos, 2020.
- MOGHADAM, S. T.; COCCOLO, S.; MUTANI, G.; LOMBARDI, P.; SCARTEZZINI, J.; MAUREE, D. A new clustering and visualization method to evaluate urban heat energy planning scenarios. **Cities**, v. 88, p. 19-36, 2019, doi: 10.1016/j.cities.2018.12.007.
- MOHANTY, B. Achieving higher prosumption by sharing the renewable energy investment with energy demand management: the case of an office building. In: Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE), 2018, Phuket, Tailândia. **Anais eletrônicos...** Phuket, Tailândia, 2018, doi: 10.23919/ICUE-GESD.2018.8635700.
- MOHELNÍKOVÁ, J.; NOVOTNÝ, M.; MOCO VÁ, P. Evaluation of School Building Energy Performance and Classroom Indoor Environment. **Energies**, v. 13, n. 10, artigo 2489, 2020, doi: 10.3390/en13102489.
- MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J.; ALTMAN, D. G.; The PRISMA Group. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. **Guidelines and Guidance**, v. 6, n. 7, e1000097, 2009, doi: 10.1371/journal.pmed.1000097.
- MYHREN, J. A.; HEIER, J.; HUGOSSON, M.; ZHANG, X. The perception of Swedish housing owner's on the strategies to increase the rate of energy efficient refurbishment of multi-family buildings. **Intelligent Buildings International**, v. 12, n. 3, p. 153-168, 2020, doi: 10.1080/17508975.2018.1539390.
- NABER, E.; LÜTZKENDORF, T.; VOLK, R.; SCHULTMANN, F. A survey of private landlords in Karlsruhe and their perception of deep energy retrofit. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 323, artigo 012165, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/323/1/012165.
- NAPOLI, G.; BOTTERO, M.; CIULLA, G.; DELL'ANNA, F.; FIGUEIRA, J. R.; GRECO, S. Supporting public decision process in buildings energy retrofitting operations: the application of a Multiple Criteria Decision Aiding model to a case study in Southern Italy. **Sustainable Cities and Society**, v. 60, artigo 102214, 2020, doi: 10.1016/j.scs.2020.102214.
- NASTASI, B.; MATTEO, U. D. Innovative use of hydrogen in energy retrofitting of listed buildings. **Energy Procedia**, v. 111, p. 435-441, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.205.
- NAZI, W. I. W. M.; ROYAPOOR, M.; WANG, Y.; ROSKILLY, A. P. Office building cooling load reduction using thermal analysis method – a case study. **Applied Energy**, v. 185, p. 1574-1584, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.12.053.
- NEGRO, E.; D'AMATO, M.; CARDINALE, N. Non-invasive methods for energy and seismic retrofit in historical building in Italy. **Frontiers in Built Environment**, v. 5, artigo 125, 2019, doi: 10.3389/fbuil.2019.00125.
- NEMRY, F.; UIHLEN, A.; COLODEL, C. M.; WETZEL, C.; BRAUNE, A.; WITTSTOCK, B.; HASAN, I.; KREIBIG, J.; GALLON, N.; NIEMEIER, S.; FRECH, Y. Options to reduce the environmental impacts of residential buildings in the European Union – Potential and costs. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 7, p. 976-984, 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.01.009.

- NGUYEN, P. A.; BOKEL, R.; DOBBELSTEEN, A. V. D. Refurbishing houses to improve energy efficiency – Potential in Vietnam. In: *Passive Low Energy Architecture (PLEA)*, v. 3, 2017, Edimburgo, Escócia. **Anais eletrônicos...** Edimburgo, Escócia, 2017.
- NOCERA, F.; GAGLIANO, A.; EVOLA, G.; MARLETTA, L.; FARACI, A. The Kyoto Rotation Fund as a policy tool for climate change mitigation: the case study of an Italian school. **International Journal of Heat and Technology**, v. 35, n. 1, p. 159-165, doi: 10.18280/ijht.35Sp0122.
- OGUNTONA, O. A.; MASEKO, B. M.; AIGBAVBOA, C. O.; THWALA, W. D. Barriers to retrofitting buildings for energy efficiency in South Africa. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 640, artigo 012015, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/640/1/012015.
- OZARISOY, B.; ALTAN, H. Adoption of energy design strategies for retrofitting mass housing estates in Northern Cyprus. **Sustainability**, v. 9, n. 8, artigo 1477, 2017, doi: 10.3390/su9081477.
- OZARISOY, B.; ALTAN, H. Low-energy design strategies for retrofitting existing residential buildings in Cyprus. **Institution of Civil Engineers – Engineering Sustainability**, v. 172, n. 5, p. 241-255, 2018, doi: 10.1680/jensu.17.00061.
- PACCHIEGA, C.; FAUSTI, P. A study on the energy performance of a ground source heat pump utilized in the refurbishment of an historical building: comparison of different design options. **Energy Procedia**, v. 133, p. 349-357, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.360.
- PAIHO, S.; KETOMÄKI, J.; KANNARI, L.; HÄKKINEN, T.; SHEMEIKKA, J. A new procedure for assessing the energy-efficient refurbishment of buildings on district scale. **Sustainable Cities and Society**, v. 46, artigo 101454, 2019, doi: 10.1016/j.scs.2019.101454.
- PARDO-BOSCH, F.; CERVERA, C.; YSA, T. Key aspects of building retrofitting: Strategizing sustainable cities. **Journal of Environmental Management**, v. 248, artigo 109247, 2019, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.07.018.
- PERERA, P.; HEWAGE, K.; ALAM, M. S.; MÈRIDA, W.; SADIQ, R. Scenario-based economic and environmental analysis of clean energy incentives for households in Canada: Multi criteria decision making approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 198, p. 170-186, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.014.
- PIAIA, E.; TURILLAZZI, B.; LONGO, D.; BOERI, A.; GIULIO, R. D. Plug-and-Play and innovative process technologies (Mapping/Modelling/Making/Monitoring) in deep renovation interventions. **Journal of Technology for Architecture and Environment**, v. 18, p. 215-225, 2019, doi: 10.13128/techne-7533.
- PIGLIAUTILE, I.; CASTALDO, V. L.; MAKAREMI, N.; PISELLO, A. L.; CABEZA, L. F.; COTANA, F. On an innovative approach for microclimate enhancement and retrofit of historic buildings and artworks preservation by means of innovative thin envelope materials. **Journal of Cultural Heritage**, v. 36, p. 222–231, 2019, doi: 10.1016/j.culher.2018.04.017.
- PINI, F.; VERZARI, S.; D'ANGELO, A. Energy savings in an university educational building – the case of chemistry building of Sapienza. In: *World Congress on New Technologies*, 2019, Lisboa, Portugal. **Anais eletrônicos...** Lisboa, Portugal, 2019, doi:

- 10.11159/icert19.123.
- PIOPPI, B.; PISELLI, C.; CRISANTI, C.; PISELLO, A. L. Human-centric green building design: the energy saving potential of occupants' behaviour enhancement in the office environment. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 13, n. 6, p. 621-644, 2020, doi: 10.1080/19401493.2020.1810321.
- PITTAU, F.; AMATO, C.; CUFFARI, S.; IANNACCONE, G.; MALIGHETTI, L. E. Environmental consequences of refurbishment vs. demolition and reconstruction: a comparative life cycle assessment of an Italian case study. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 296, artigo 012037, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/296/1/012037.
- POHORYLES, D. A.; MADUTA, C.; BOURNAS, D. A.; KOURIS, L. A. Energy performance of existing residential buildings in Europe: a novel approach combining energy with seismic retrofitting. **Energy & Buildings**, v. 223, artigo 110024, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110024.
- POMBO, O.; RIVELA, B.; NEILA, J. Life cycle thinking toward sustainable development policy-making: the case of energy retrofits. **Journal of Cleaner Production**, v. 206, p. 267-281, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.09.173.
- POMBO, O.; RIVELA, B.; NEILA, J. The challenge of sustainable building renovation: assessment of current criteria and future outlook. **Journal of Cleaner Production**, v. 123, p. 88-100, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.06.137.
- POWER, A. Does demolition or refurbishment of old and inefficient homes help to increase our environmental, social and economic viability?. **Energy Policy**, v. 36, n. 12, p. 4487-4501, 2008, doi: 10.1016/j.enpol.2008.09.022.
- PRACUCCI, A.; MAGNANI, S.; CASADEI, O. The integration of vacuum insulated glass in unitized façade for the development of innovative lightweight and highly insulating energy efficient building envelope – the results of eensulate façade system design. **Designs**, v. 4, artigo 40, 2020, doi: 10.3390/designs4040040.
- QADIR, G.; HADDAD, M.; HAMDAN, D. Potential of energy efficiency for a traditional Emirati house by Estidama Pearl Rating system. **Energy Procedia**, v. 160, p. 707-714, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.02.189.
- RABANI, M.; MADESSA, H. B.; NORD, N. A state-of-art review of retrofit interventions in buildings towards nearly zero energy level. **Procedia Engineering**, v. 134, p. 317-326, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.534.
- RISPOLI, M.; ORGAN, S. The drivers and challenges of improving the energy efficiency performance of listed pre-1919 housing. **International Journal of Building Pathology and Adaptation**, v. 37, n. 3, p. 288-305, 2019, doi: 10.1108/IJBPA-09-2017-0037.
- ROBERTS, S. Altering existing buildings in the UK. **Energy Policy**, v. 36, n. 12, p. 4482-4486, 2008, doi: 10.1016/j.enpol.2008.09.023.
- ROBICHAUD, L. B.; ANANTATMULA, V. S. Greening project management practices for sustainable construction. **Journal of Management in Engineering**, v. 27, n. 1, p. 48-57, 2011, doi: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000030.
- RUOCCO, G. D.; SICIGNANO, C.; SESSA, A. Integrated methodologies energy efficiency of historic buildings. **Procedia Engineering**, v. 180, p. 1653-1663, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.328.

- RUUD, S.; ÖSTMAN, L.; ORÄDD, P. Energy savings for a wood based modular pre-fabricated façade refurbishment system compared to other measures. **Energy Procedia**, v. 96, p. 768-778, 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.09.139.
- 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. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 40, n. 4, p. 470-491, 2019, doi: 10.1177/0143624419844753.
- SALVALAI, G.; SESANA, M. M.; IANNACCONE, G. Deep renovation of multi-storey multi-owner existing residential buildings: a pilot case study in Italy. **Energy and Buildings**, v. 148, p. 23-36, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.05.011.
- SANHUDO, L.; RAMOS, N. M. M.; MARTINS, J. P.; ALMEIDA, R. M. S. F.; BARREIRA, E.; SIMÕES, M. L.; CARDOSO, V. Building information modeling for energy retrofitting – a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 89, p. 249-260, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.064.
- SARETTA, E.; CAPUTO, P.; FRONTINI, F. A review study about energy renovation of building facades with BIPV in urban environment. **Sustainable Cities and Society**, v. 44, p. 343-355, 2019, doi: 10.1016/j.scs.2018.10.002.
- SATTLER, S.; ÖSTERREICHER, D. Assessment of Sustainable Construction Measures in Building Refurbishment – Life Cycle Comparison of Conventional and Multi-Active Façade Systems in a Social Housing Complex. **Sustainability**, v. 11, artigo 4487, 2019, doi: 10.3390/su11164487.
- SEKKI, T.; AIRAKSINEN, M.; SAARI, A. Effect of energy measures on the values of energy efficiency indicators in Finnish daycare and school buildings. **Energy and Buildings**, v. 139, p. 124-132, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.01.005
- SI, J.; MARJANOVIC-HALBURD, L.; NASIRI, F.; BELL, S. Assessment of building-integrated green technologies: a review and case study on applications of Multi-Criteria Decision Making (MCDM) method. **Sustainable Cities and Society**, v. 27, p. 106-115, 2016, doi: 10.1016/j.scs.2016.06.013.
- SIEW, R. Y. J. Financing options for energy efficiency retrofit projects – a Malaysian perception. **Malaysian Construction Research Journal**, v. 24, n. 1, p. 97-111, 2018.
- SIMONS, R. A.; ROBINSON, S. J.; LEE, E. Green office buildings: a qualitative exploration of green office building attributes. **The Journal of Sustainable Real Estate**, v. 6, n. 1, p. 211-232, 2014.
- SLEE, B.; HYDE, R. Improving the thermal performance and energy efficiency of NSW Demountable classrooms using a community led retrofitting strategy. A proposal for Broken Hill. In: 9th Windsor Conference: Making Comfort Relevant, Windsor, Inglaterra. **Anais eletrônicos...** Windsor, Inglaterra, 2016.
- SON, H.; KIM, C. Evolutionary multi-objective optimization in building retrofit planning problem. **Procedia Engineering**, v. 145, p. 565-570, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.04.045.
- STIERNON, D.; TRACHTE, S.; DUBOIS, S.; DESARNAUD, J. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1314, artigo 012179, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1343/1/012179.

- TAGLIABUE, L. C.; GIUDA, G. M. D.; VILLA, V.; ANGELIS, E. D.; CIRIBINI, A. L. C. Techno-economical analysis based on a parametric computational evaluation for decision process on envelope technologies and configurations. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 736-749, 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.10.004.
- TALEB, H. M. Enhancing the skin performance of hospital buildings in the UAE. **Journal of Building Engineering**, v. 7, p. 300-311, 2016, doi: 10.1016/j.job.2016.07.006.
- THOMAS, A.; MENASSA, C. C.; KAMAT, V. R. A systems simulation framework to realize net-zero building energy retrofits. **Sustainable Cities and Society**, v. 41, p. 405-420, 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.05.045.
- THOMAS, L. E. Evaluating design strategies, performance and occupant satisfaction: a low carbon office refurbishment. **Building Research and Information**, v. 38, n. 6, p. 610-624, 2010, doi: 10.1080/09613218.2010.501654.
- TRENCHER, G.; HEIJDEN, J. Instrument interactions and relationships in policy mixes: achieving complementarity in building energy efficiency policies in New York, Sydney and Tokyo. **Energy Research & Social Science**, v. 54, p. 34-45, 2019, doi: 10.1016/j.erss.2019.02.023.
- TROVATO, M. R.; NOCERA, F.; GIUFFRID, S. Life-cycle assessment and monetary measurements for the carbon footprint reduction of public buildings. **Sustainability**, v. 12, artigo 3460, 2020, doi: 10.3390/su12083460.
- TULLEY, J.; ZHIVOV, A.; CLARK, B. Deep energy retrofit of presidio army barracks. **ASHRAE Transactions**, v. 123, n. 1, p. 39-54, 2017.
- ULPIANI, G.; GIULIANI, D.; ROMAGNOLI, A.; PERNA, C. Experimental monitoring of a sunspace applied to a NZEB mock-up: assessing and comparing the energy benefits of different configurations. **Energy and Buildings**, v. 152, p. 194-215, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.04.034.
- WAHLSTRÖM, A.; GLADER, K. Not even close to the goals – a “snapshot” of Swedish property owners’ energy renovation plans. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 588, artigo 022020, 2020, doi: 10.1088/1755-1315/588/2/022020.
- WEATHERBASE. **Weatherbase**. Disponível em: <<https://www.weatherbase.com>>. Acesso em: 20 ago. 2020.
- WELDU, Y. W.; AL-GHAMDI, S. G. Evaluating the environmental and economic sustainability of energy efficiency measures in buildings. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 257, artigo 012028, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/257/1/012028.
- WILLIAM, M. A.; ELHARIDI, A. L.; HANAFY, A. A.; ATTIA, A.; ELHELW, M. Energy-efficient retrofitting strategies for healthcare facilities in hot-humid climate: Parametric and economical analysis. **Alexandria Engineering Journal**, v. 59, n. 6, p. 4549-4562, 2020, doi: 10.1016/j.aej.2020.08.011.
- WU, Z.; LI, Q.; WU W.; ZHAO, M. Crowdsourcing model for energy efficiency retrofit and mixed-integer equilibrium analysis. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 16, n. 7, p. 4512-4524, 2020, doi: 10.1109/TII.2019.2944627.

- XIA, X. Control problems in building energy retrofit and maintenance planning. **Annual Reviews in Control**, v. 44, p. 78-88, 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.arcontrol.2017.04.003>.
- YANG, L. Energy-saving retrofitting strategies in historical buildings. **International Journal of Smart Grid and Clean Energy**, v. 6, n. 3, p. 182-189, 2017, doi: [10.12720/sgce.6.3.182-189](https://doi.org/10.12720/sgce.6.3.182-189).
- YAO, R.; SHAHRESTANI, M.; HAN, S.; LI, B.; LI, X. Evaluation of building retrofit strategies in different climate zones. **ASHRAE Transactions**, v. 122, n. 1, p. 289-299, 2016.
- YILDIZ, Y.; KOÇYIĞIT, M. A study on the energy-saving potential of university campuses in Turkey. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering Sustainability**, v. 173, n. 8, p. 379-396, 2020, doi: [10.1680/jensu.20.00006](https://doi.org/10.1680/jensu.20.00006).
- YIN, R. K. **Estudo de Caso: Planejamento e Métodos**. Porto Alegre: Bookman, 2015.
- ZHANG, X.; LOVATI, M.; VIGNA, I.; WIDÉN, J.; HAN, M.; GAL, C.; FENG, T. A review of urban energy systems at building cluster level incorporating renewable-energy-source (RES) envelope solutions. **Applied Energy**, v. 230, p. 1034-1056, 2018, doi: [10.1016/j.apenergy.2018.09.041](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.041).
- ZHOU, X.; ZHU, Y.; PENG, H.; ZENG, Z.; HUANG, Y.; LI, L. Energy efficiency optimization for building envelopes on a green campus in Guangzhou. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 238, artigo 012024, 2019, doi: [10.1088/1755-1315/238/1/012024](https://doi.org/10.1088/1755-1315/238/1/012024).
- ZHOU, Z.; ZHANG, S.; WANG, C.; ZUO, J.; HE, Q.; RAMEEZDEEN, R. Achieving energy efficient buildings via retrofitting of existing buildings: a case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, n. 5, p. 3605-3615, 2016, doi: [10.1016/j.jclepro.2015.09.046](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.046).
- ZUO, J.; ZHAO, Z. Green building research – Current status and future agenda: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 30, p. 271-281, 2014, doi: [10.1016/j.rser.2013.10.021](https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.021).

APÊNDICE A – Caracterização dos estudos de caso sobre *retrofits* em edificações

Tabela 2 – Caracterização dos estudos de caso abordando estratégias de *retrofit* em edificações

Referência	Local do estudo	Clima	Tipologia					Tipo de edificação					Nº	Época	Aspectos				Estratégias					Programas	
			RU	RM	IE	C	O	EE	PE	PT	P	H			R	A	E	S	T	MS	FR	IT	MF		IN
Abdelrazek e Yilmaz (2020)	Istambul, Turquia	Csa			•		•			•	•	•	1	1846	•	•	•	•	•	•		•			DesignBuilder
Abdullah e Alibaba (2017)	Erbil, Iraque	Csa				•	•						1		•	•	•		•					OpenStudio; EnergyPlus; Grasshopper	
Abidin <i>et al.</i> (2019)	Johor Bahru, Malásia	Af			•		•						1		•	•		•	•		•	•	•		
Abu-Hijleh <i>et al.</i> (2017)	EAU		•							•	•	•	4	1980 a 2010	•	•				•				IES-VE	
Adam <i>et al.</i> (2019)	Romênia			•						•			1	Anos 1970	•	•		•				•		TRNSYS	
Aghamolaei e Ghaani (2020)	Yazd, Irã	Bwh	•							•			1	Anterior a 1990	•	•		•		•	•			EnergyPlus	
Aguacil <i>et al.</i> (2017)	Espanha		•	•						•			*	Anterior a 2001	•	•		•	•	•			•	DesignBuilder; EnergyPlus	
Ali e Al-Hashlamun (2019)	Abu Alanda, Jordânia	Bsh			•					•	•		1	1970 a 2000			•			•	•			DesignBuilder	
Alkhateeb e Hijleh (2017)	Abu Dhabi, EAU	Bwh				•		•			•		1	2010	•	•		•		•	•			IES-VE	
Ardiani <i>et al.</i> (2018)	Nottingham, Reino Unido	Cfb				•		•			•		1	Anterior a 1970	•	•	•		•	•			•		
Artino <i>et al.</i> (2019)	Catânia, Itália	Csa		•			•						1	1950 a 1980	•	•	•	•		•	•			SketchUp; EnergyPlus	

Tipologia: RU – residencial unifamiliar, RM – residencial multifamiliar, IE – instituição de ensino, C – comercial ou de escritórios, O – outros; Tipo de edificação: EE – edificação existente, PE – projeto de edificação, PT – projeto típico, P – pública, H – histórica, R – reformada após a construção; Nº – número de edificações, * – quantidade indefinida; Época – época de construção; Aspectos: A – ambiental, E – econômico, S – social, T – técnico; Estratégias: MS – melhoria dos sistemas da edificação, FR – fontes renováveis de energia, IT – isolamento térmico do envelope, MF – materiais de mudança de fase, IN – iluminação natural, VN – ventilação natural e/ou fachada ventilada, FV – fachada verde, cobertura verde e/ou cobertura fria, UA – uso racional de água.

Tabela 2 – Caracterização dos estudos de caso abordando estratégias de *retrofit* em edificações (continuação)

Referência	Local do estudo	Clima	Tipologia					Tipo de edificação					Nº	Época	Aspectos				Estratégias						Programas
			RU	RM	IE	C	O	EE	PE	PT	P	H			R	A	E	S	T	MS	FR	IT	MF	IN	
Ascione <i>et al.</i> (2019)	Termoli, Itália	Csa		•			•			•	•	•	1	Anos 1990	•	•	•			•	•		•	•	DesignBuilder; EnergyPlus
Baggio <i>et al.</i> (2017)	Treviso, Itália	Cfb		•			•			•	•	•	1	1922		•	•	•	•		•			DesignBuilder; EnergyPlus	
Balocco e Colaianni (2018)	Florença, Itália	Cfb		•			•				•		1	1876	•	•	•	•	•		•			TRNSYS	
Becchio <i>et al.</i> (2018)	Turim, Itália	Cfb		•						•			5	Anos 1920 a 1980	•	•	•		•	•	•				
Belpoliti <i>et al.</i> (2019)	Dubai, EAU	Bwh				•		•			•		1	2004	•	•	•	•		•		•		DesignBuilder; EnergyPlus	
Berardi e Manca (2017)	Toronto e Vancouver, Canadá	Cfb; Dfb		•						•			1		•	•	•				•			EnergyPlus	
Bertone <i>et al.</i> (2018)	Austrália					•	•				•		*		•	•			•	•				•	
Bittenbinder <i>et al.</i> (2020)	Veneza, Itália	Cfa		•				•			•	•	*		•	•	•			•	•			EnergyPlus	
Bonamente <i>et al.</i> (2018)	Cuneo, Itália	Cfb					•	•					1	1985	•	•	•		•	•	•			Termolog EpiX	
Brambilla <i>et al.</i> (2018)	Milão, Itália	Cfb				•		•					1		•	•	•		•	•	•		•	•	TRNSYS
Brunoro <i>et al.</i> (2018)	Villa Minozzo, Itália	Cfb		•				•					*		•	•	•	•		•					
Buda, Pracchi e Sannasardo (2019)	Sicília, Itália	Csa				•	•	•			•	•	•	38	Séc. XI a XX	•	•	•	•	•	•	•			

Tipologia: RU – residencial unifamiliar, RM – residencial multifamiliar, IE – instituição de ensino, C – comercial ou de escritórios, O – outros; Tipo de edificação: EE – edificação existente, PE – projeto de edificação, PT – projeto típico, P – pública, H – histórica, R – reformada após a construção; Nº – número de edificações, * – quantidade indefinida; Época – época de construção; Aspectos: A – ambiental, E – econômico, S – social, T – técnico; Estratégias: MS – melhoria dos sistemas da edificação, FR – fontes renováveis de energia, IT – isolamento térmico do envelope, MF – materiais de mudança de fase, IN – iluminação natural, VN – ventilação natural e/ou fachada ventilada, FV – fachada verde, cobertura verde e/ou cobertura fria, UA – uso racional de água.

Tabela 2 – Caracterização dos estudos de caso abordando estratégias de *retrofit* em edificações (continuação)

Referência	Local do estudo	Clima	Tipologia					Tipo de edificação					Nº	Época	Aspectos				Estratégias						Programas		
			RU	RM	IE	C	O	EE	PE	PT	P	H			R	A	E	S	T	MS	FR	IT	MF	IN		VN	FV
Burroughs (2018)	Sydney, Austrália	Cfa				•	•					•	1	1991	•	•	•		•								
Cadelano <i>et al.</i> (2019)	Zagreb, Croácia	Cfb					•	•			•	•	1	1949	•	•	•	•	•								TRNSYS
Campos <i>et al.</i> (2020)	Hungria		•					•				*	1945 a 1979	•	•	•		•	•	•							
Ceballos-Fuentealba <i>et al.</i> (2019)	Puerto Montt, Chile	Cfb			•			•				1	2012	•	•	•				•						DesignBuilder; EnergyPlus	
Chang, Castro-Lacouture e Yamagata (2020)	Tóquio, Japão	Cfa	•	•				•				4		•	•	•	•		•	•	•			•		EnergyPlus	
Chen, Hong e Piette (2017)	São Francisco, Estados Unidos	Csc				•					•	5		•	•			•		•						CityBES; EnergyPlus	
Cho <i>et al.</i> (2020)	Seul, Coreia do Sul	Dwa			•			•			•	1	1924	•	•	•	•	•	•	•	•					DesignBuilder; EnergyPlus	
Chow e Sharples (2016)	China					•					•	3		•	•	•				•		•				IES-VE	
Ciugudeanu, Beu e Rastei (2016)	Cluj-Napoca, Rômenia	Dfb			•			•			•	1	1948	•	•	•		•					•				
Cucca e Ianakiev (2020)	Nottingham, Reino Unido	Cfb	•					•				10	Anos 1960	•	•			•	•	•						Dymola ; DesignBuilder; EnergyPlus;	
Delmastro e Gargiulo (2020)	Turim, Itália	Cfb	•	•	•	•	•				•	16	Séc. XX e XXI	•	•			•	•								

Tipologia: RU – residencial unifamiliar, RM – residencial multifamiliar, IE – instituição de ensino, C – comercial ou de escritórios, O – outros; Tipo de edificação: EE – edificação existente, PE – projeto de edificação, PT – projeto típico, P – pública, H – histórica, R – reformada após a construção; Nº – número de edificações, * – quantidade indefinida; Época – época de construção; Aspectos: A – ambiental, E – econômico, S – social, T – técnico; Estratégias: MS – melhoria dos sistemas da edificação, FR – fontes renováveis de energia, IT – isolamento térmico do envelope, MF – materiais de mudança de fase, IN – iluminação natural, VN – ventilação natural e/ou fachada ventilada, FV – fachada verde, cobertura verde e/ou cobertura fria, UA – uso racional de água.

Tabela 2 – Caracterização dos estudos de caso abordando estratégias de *retrofit* em edificações (continuação)

Referência	Local do estudo	Clima	Tipologia					Tipo de edificação					N ^o	Época	Aspectos				Estratégias						Programas		
			RU	RM	IE	C	O	EE	PE	PT	P	H			R	A	E	S	T	MS	FR	IT	MF	IN		VN	FV
Dimitrova <i>et al.</i> (2019)	Sofia, Bulgária	Cfb	•				•						2	Anos 1930	•	•			•	•	•						
Dirutigliano, Delmastro e Moghadam (2018)	Turim, Itália	Cfb	•	•						•			5		•	•	•		•	•	•						
Djordjević, Joksimović e Jovanović-Popović (2018)	Nova Belgrado, Sérvia	Cfa		•						•			2	1971	•	•					•			•			KnaufTherm
Drouilles <i>et al.</i> (2019)	Neuchâtel, Suíça	Cfb	•	•						•		•	2	Anos 1940 a 1970	•	•			•	•	•						DesignBuilder; EnergyPlus
Eliopoulou e Mantziou (2017)	Atenas, Grécia	Csa			•			•			•		1	1931	•	•	•			•		•	•				EnergyPlus
Falke e Schnettler (2016)	Alemanha		•	•						•			2		•	•				•	•						
Farghaly e Hassan (2019)	Guizé, Egito	Bwh			•			•			•		1	1972	•	•				•							DesignBuilder; EnergyPlus
Fernandes <i>et al.</i> (2018)	Campinas, Brasil	Cfa			•			•			•		1		•	•	•				•	•	•				SketchUp; EnergyPlus
Ferrante, Fotopoulou e Mazzoli (2020)	Atenas, Grécia	Csa	•	•				•					19		•	•			•	•		•		•			
Fregonara, Carbonaro e Pasquarella (2018)	Alexandria, Itália	Cfa		•				•			•		11		•	•			•	•	•						TerMus

Tipologia: RU – residencial unifamiliar, RM – residencial multifamiliar, IE – instituição de ensino, C – comercial ou de escritórios, O – outros; Tipo de edificação: EE – edificação existente, PE – projeto de edificação, PT – projeto típico, P – pública, H – histórica, R – reformada após a construção; N^o – número de edificações, * – quantidade indefinida; Época – época de construção; Aspectos: A – ambiental, E – econômico, S – social, T – técnico; Estratégias: MS – melhoria dos sistemas da edificação, FR – fontes renováveis de energia, IT – isolamento térmico do envelope, MF – materiais de mudança de fase, IN – iluminação natural, VN – ventilação natural e/ou fachada ventilada, FV – fachada verde, cobertura verde e/ou cobertura fria, UA – uso racional de água.

Tabela 2 – Caracterização dos estudos de caso abordando estratégias de *retrofit* em edificações (continuação)

Referência	Local do estudo	Clima	Tipologia					Tipo de edificação					N ^o	Época	Aspectos				Estratégias						Programas	
			RU	RM	IE	C	O	EE	PE	PT	P	H			R	A	E	S	T	MS	FR	IT	MF	IN		VN
Fregonara <i>et al.</i> (2016)	Turim, Itália	Cfb	•				•						3	Anos 1970	•	•		•	•							BEES
Fregonara <i>et al.</i> (2017)	Turim, Itália	Cfb	•				•						1	1963	•	•		•	•	•					Termolog EpiX	
Gaspari, Fabbri e Gabrielli (2019)	Bolonha, Itália	Cfa					•	•		•	•	•	1	1934	•	•	•	•	•		•				Termolog EpiX	
Gianfrate <i>et al.</i> (2017)	Savona e Bolonha, Itália	Cfa	•				•						15	Anos 1970	•	•	•		•	•						
Gigliarelli, Calcerano e Cessari (2017)	Frigento, Itália	Csa	•				•			•			1		•	•		•	•		•					
Golz, Nikolowski e Naumann (2019)	Dresden, Alemanha	Cfb	•				•			•			1	1909	•	•		•			•					
González <i>et al.</i> (2017)	Bruxelas, Bélgica	Cfb	•	•						•		•	4	Anterior a 1945	•	•		•			•					
Guardigli <i>et al.</i> (2018)	Bolonha, Itália	Cfa					•	•		•	•		3	Séc. XX e XXI	•	•		•	•	•						
Habibi, Obonyo e Memari (2020)	New Kensington, Estados Unidos	Dfb					•	•		•			1	1942	•	•		•	•		•				IES-VE; HelioScope	
Hejtmánek <i>et al.</i> (2017)	Milevsko, República Tcheca	Cfb	•				•						1	1958	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		

Tipologia: RU – residencial unifamiliar, RM – residencial multifamiliar, IE – instituição de ensino, C – comercial ou de escritórios, O – outros; Tipo de edificação: EE – edificação existente, PE – projeto de edificação, PT – projeto típico, P – pública, H – histórica, R – reformada após a construção; N^o – número de edificações, * – quantidade indefinida; Época – época de construção; Aspectos: A – ambiental, E – econômico, S – social, T – técnico; Estratégias: MS – melhoria dos sistemas da edificação, FR – fontes renováveis de energia, IT – isolamento térmico do envelope, MF – materiais de mudança de fase, IN – iluminação natural, VN – ventilação natural e/ou fachada ventilada, FV – fachada verde, cobertura verde e/ou cobertura fria, UA – uso racional de água.

Tabela 2 – Caracterização dos estudos de caso abordando estratégias de *retrofit* em edificações (continuação)

Referência	Local do estudo	Clima	Tipologia					Tipo de edificação					Nº	Época	Aspectos				Estratégias						Programas
			RU	RM	IE	C	O	EE	PE	PT	P	H			R	A	E	S	T	MS	FR	IT	MF	IN	
Hosseini, Shirmohammadi e Aslani (2020)	Tehran, Irã	Csa			•		•					1	2007	•	•				•	•					DesignBuilder
Hu (2017)	Glen Burnie, Estados Unidos	Cfa			•		•			•	•	1	1968	•	•	•			•			•		Revit	
Joppolo <i>et al.</i> (2017)	Urbino, Itália	Cfa			•		•			•		1	Séc. XX	•	•	•		•	•					MasterClima	
Jorgji <i>et al.</i> (2019)	Tirana, Albânia	Csa	•							•		1	1960 a 1980	•	•				•	•					
Kaewunruen, Sresakoolchai e Kerinnonta (2019)	Washington D.C., Estados Unidos	Cfa		•			•					1		•		•		•	•					Revit; Green Building Studio	
Labeodan <i>et al.</i> (2016)	Holanda					•	•				•	1	1992	•	•	•		•							
Lassandro e Cosola (2018)	Itália				•		•			•		1		•	•				•			•		DesignBuilder; EnergyPlus	
Lazzeroni <i>et al.</i> (2017)	Hebron, Cisjordânia	Bsh	•	•	•	•				•		4		•	•			•	•					IES-VE	
Lee, Shepley e Choi (2019)	Seul, Coreia do Sul	Dwa			•		•			•		2	1960 a 1970	•	•	•		•	•	•				Energy#	
Li, Xu e Fan (2019)	Dalian, China	Dwa		•						•		1	1980 a 2000	•	•		•		•			•		Revit; EnergyPlus	
Li <i>et al.</i> (2017)	Shanghai, China	Cfa			•		•			•		*	Anos 1920	•	•	•	•		•	•		•	•	•	•
Liapopoulou e Theodosiou (2020)	Tessalônica, Grécia	Cfa		•						•		1		•	•			•	•	•				DesignBuilder	

Tipologia: RU – residencial unifamiliar, RM – residencial multifamiliar, IE – instituição de ensino, C – comercial ou de escritórios, O – outros; Tipo de edificação: EE – edificação existente, PE – projeto de edificação, PT – projeto típico, P – pública, H – histórica, R – reformada após a construção; Nº – número de edificações, * – quantidade indefinida; Época – época de construção; Aspectos: A – ambiental, E – econômico, S – social, T – técnico; Estratégias: MS – melhoria dos sistemas da edificação, FR – fontes renováveis de energia, IT – isolamento térmico do envelope, MF – materiais de mudança de fase, IN – iluminação natural, VN – ventilação natural e/ou fachada ventilada, FV – fachada verde, cobertura verde e/ou cobertura fria, UA – uso racional de água.

Tabela 2 – Caracterização dos estudos de caso abordando estratégias de *retrofit* em edificações (continuação)

Referência	Local do estudo	Clima	Tipologia					Tipo de edificação					Nº	Época	Aspectos				Estratégias						Programas		
			RU	RM	IE	C	O	EE	PE	PT	P	H			R	A	E	S	T	MS	FR	IT	MF	IN		VN	FV
Lingard (2020)	Reino Unido		•								•			1		•	•		•	•							IES-VE
Liu e Ren (2018)	China					•					•	•		2		•	•		•	•	•		•	•			DeST
Longo <i>et al.</i> (2018)	Bolonha, Itália	Cfa	•	•				•			•			3	Anos 1920 a 1960	•	•	•	•		•	•					
Lucchi e Delera (2020)	Milão, Itália	Cfb		•				•			•	•		*	1932 a 1947	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	
Mancini <i>et al.</i> (2017)	Roma, Itália	Csa			•			•			•	•		1	1935	•	•		•	•		•					
Manni <i>et al.</i> (2017)	Téramo, Itália	Cfa			•			•			•	•	•	1	1929	•	•		•	•					•	DesignBuilder; EnergyPlus	
Marini <i>et al.</i> (2017)	Bréscia, Itália	Cfa		•				•						1	1972	•	•	•	•		•	•		•			
Marique e Rossi (2018)	Bruxelas, Bélgica	Cfb				•		•			•			1	1934	•	•	•	•		•	•					
Mauro <i>et al.</i> (2017)	Milão e Nórcia, Itália	Cfb		•								•		1	Anos 1970	•	•	•	•		•	•	•				EnergyPlus
Mauro <i>et al.</i> (2019)	Barcelona, Espanha	Csa		•						•				1				•				•		•	•		EnergyPlus
McArthur e Jofeh (2016)	Canadá					•		•						2		•	•			•	•	•					
Mehr e Sara (2018)	Austrália							•	•			•	•	•	Séc. XIX e XX	•	•		•	•		•	•				
Mirzaei <i>et al.</i> (2020)	Tehran, Irã	Csa		•				•						1	1966	•	•	•		•	•						EnergyPlus

Tipologia: RU – residencial unifamiliar, RM – residencial multifamiliar, IE – instituição de ensino, C – comercial ou de escritórios, O – outros; Tipo de edificação: EE – edificação existente, PE – projeto de edificação, PT – projeto típico, P – pública, H – histórica, R – reformada após a construção; Nº – número de edificações, * – quantidade indefinida; Época – época de construção; Aspectos: A – ambiental, E – econômico, S – social, T – técnico; Estratégias: MS – melhoria dos sistemas da edificação, FR – fontes renováveis de energia, IT – isolamento térmico do envelope, MF – materiais de mudança de fase, IN – iluminação natural, VN – ventilação natural e/ou fachada ventilada, FV – fachada verde, cobertura verde e/ou cobertura fria, UA – uso racional de água.

Tabela 2 – Caracterização dos estudos de caso abordando estratégias de *retrofit* em edificações (continuação)

Referência	Local do estudo	Clima	Tipologia					Tipo de edificação					Nº	Época	Aspectos				Estratégias						Programas
			RU	RM	IE	C	O	EE	PE	PT	P	H			R	A	E	S	T	MS	FR	IT	MF	IN	
Moghadam <i>et al.</i> (2019)	Turim, Itália	Cfb	•	•			•				•	*	Séc. XIX e XX	•	•					•					CitySim
Mohanty (2018)	Índia					•	•				•	1	Séc. XVIII	•	•			•	•						
Mohelníková, Novotný e Mocová (2020)	República Tcheca			•						•	•	18	1887 a 1994	•	•	•			•		•				Teplo
Nastasi e Matteo (2017)	Gardone Riviera, Itália	Cfa					•	•			•	1	Séc. XX	•	•		•	•							
Nazi <i>et al.</i> (2017)	Putrajaya, Malásia	Af				•	•					1		•	•	•			•	•	•				DesignBuilder; EnergyPlus
Negro, D'Amato e Cardinale (2019)	Matera, Itália	Csa			•		•			•	•	1	1540	•	•	•	•			•					EnergyPlus
Nocera <i>et al.</i> (2017)	Paterno, Itália	Csa			•		•			•		1	2001	•	•		•		•				•		Termolog EpiX
Ozarisoy e Altan (2018)	Famagusta, Chipre	Bsh	•				•					1	Anos 2010	•	•	•			•	•	•		•	•	Revit; Green Building Studio
Pacchiega e Fausti (2017)	Ferrara, Itália	Cfa	•				•			•	•	1	Séc. XV	•	•		•	•							
Perera <i>et al.</i> (2018)	Canadá		•								•	1	2017	•	•				•	•	•				
Pigliatile <i>et al.</i> (2019)	Perúgia, Itália	Csa					•	•			•	1	Séc. XIV			•				•					DesignBuilder; EnergyPlus
Pini, Verzari e D'Angelo (2019)	Roma, Itália	Csa		•			•			•	•	1	1938	•	•		•	•	•	•	•	•			Stima10/TFM

Tipologia: RU – residencial unifamiliar, RM – residencial multifamiliar, IE – instituição de ensino, C – comercial ou de escritórios, O – outros; Tipo de edificação: EE – edificação existente, PE – projeto de edificação, PT – projeto típico, P – pública, H – histórica, R – reformada após a construção; Nº – número de edificações, * – quantidade indefinida; Época – época de construção; Aspectos: A – ambiental, E – econômico, S – social, T – técnico; Estratégias: MS – melhoria dos sistemas da edificação, FR – fontes renováveis de energia, IT – isolamento térmico do envelope, MF – materiais de mudança de fase, IN – iluminação natural, VN – ventilação natural e/ou fachada ventilada, FV – fachada verde, cobertura verde e/ou cobertura fria, UA – uso racional de água.

Tabela 2 – Caracterização dos estudos de caso abordando estratégias de *retrofit* em edificações (continuação)

Referência	Local do estudo	Clima	Tipologia					Tipo de edificação					Nº	Época	Aspectos				Estratégias						Programas		
			RU	RM	IE	C	O	EE	PE	PT	P	H			R	A	E	S	T	MS	FR	IT	MF	IN		VN	FV
Pioppi <i>et al.</i> (2020)	Milão, Itália	Cfb				•	•						1			•	•	•			•						DesignBuilder; EnergyPlus
Pittau <i>et al.</i> (2019)	Lecco, Itália	Cfb					•	•				•	1	Anos 1920 a 1950		•					•						
Pohoryles <i>et al.</i> (2020)	Diversos países europeus			•								•	5			•	•										EnergyPlus
Pombo, Rivela e Neila (2019)	Madri, Sevilha e Bilbao, Espanha	Csa; Cfb				•						•	1	1950 a 1980		•	•				•				•	DesignBuilder; EnergyPlus	
Pracucci, Magnani e Casadei (2020)	Dzierżoniów, Polônia	Cfb			•						•		1														THERM
Qadir, Haddad e Hamdan (2019)	Abu Dhabi, EAU	Bwh	•								•		1			•	•				•	•	•				Revit
Ruocco, Sicignano e Sessa (2017)	Salerno, Itália	Csa			•						•		1	1929		•	•										TerMus
Ruud, Östman e Orädd (2016)	Noruega, Suécia e Finlândia			•								•	1	1965 a 1975		•	•				•						TMF Energi
Salem, Bahadori-Jahromi e Mylona (2019)	High Wycombe, Reino Unido	Cfb				•	•						1			•	•	•			•	•	•		•	•	EDSL Tas
Salvalai, Sesana e Iannaccone (2017)	Milão, Itália	Cfb		•							•		1	1971		•	•								•		Rhino

Tipologia: RU – residencial unifamiliar, RM – residencial multifamiliar, IE – instituição de ensino, C – comercial ou de escritórios, O – outros; Tipo de edificação: EE – edificação existente, PE – projeto de edificação, PT – projeto típico, P – pública, H – histórica, R – reformada após a construção; Nº – número de edificações, * – quantidade indefinida; Época – época de construção; Aspectos: A – ambiental, E – econômico, S – social, T – técnico; Estratégias: MS – melhoria dos sistemas da edificação, FR – fontes renováveis de energia, IT – isolamento térmico do envelope, MF – materiais de mudança de fase, IN – iluminação natural, VN – ventilação natural e/ou fachada ventilada, FV – fachada verde, cobertura verde e/ou cobertura fria, UA – uso racional de água.

Tabela 2 – Caracterização dos estudos de caso abordando estratégias de *retrofit* em edificações (continuação)

Referência	Local do estudo	Clima	Tipologia					Tipo de edificação					Nº	Época	Aspectos				Estratégias						Programas	
			RU	RM	IE	C	O	EE	PE	PT	P	H			R	A	E	S	T	MS	FR	IT	MF	IN		VN
Sattler e Österreicher (2019)	Viena, Áustria	Cfb	•				•						2	Anos 1950 a 1970	•	•				•	•				•	
Sekki, Airaksinen e Saari (2017)	Espoo, Finlândia	Dfb		•			•					•	6	1970 a 2010	•	•		•	•		•		•	•		
Si <i>et al.</i> (2016)	Londres, Reino Unido	Cfb		•			•				•		1	1919	•	•			•	•						
Slee e Hyde (2016)	Broken Hill, Austrália	Bwh		•						•			1		•	•	•			•			•		THERM	
Son e Kim (2016)	Seul, Coreia do Sul	Dwa		•			•				•		1		•	•	•			•	•				EnergyPlus	
Stiernon <i>et al.</i> (2019)	Valônia, Bélgica	Cfb	•							•		•	5	Anterior a 1914	•	•	•	•		•					DesignBuilder	
Tagliabue <i>et al.</i> (2018)	Milão, Roma e Palermo, Itália	Csa; Cfb		•						•			1		•	•			•						jEPlus ; EnergyPlus	
Taleb (2016)	Abu Dhabi, EAU	Bwh					•	•				•	1	1984	•	•	•			•		•	•		IES-VE	
Thomas, Menassa e Kamat (2018)	Estados Unidos				•					•			16		•	•				•					AnyLogic	
Trovato, Nocera e Giuffrid (2020)	Módica, Itália	Csa					•	•			•		1	1962	•	•	•	•		•				•	DesignBuilder; EnergyPlus	
Tulley, Zhivov e Clark (2017)	Monterey, EUA	Csc					•	•					1	Anos 1950	•	•			•	•		•			EnergyPlus	
Ulpiani <i>et al.</i> (2017)	Agugliano, Itália	Cfa					•	•					1		•	•	•			•	•				DesignBuilder; EnergyPlus	

Tipologia: RU – residencial unifamiliar, RM – residencial multifamiliar, IE – instituição de ensino, C – comercial ou de escritórios, O – outros; Tipo de edificação: EE – edificação existente, PE – projeto de edificação, PT – projeto típico, P – pública, H – histórica, R – reformada após a construção; Nº – número de edificações, * – quantidade indefinida; Época – época de construção; Aspectos: A – ambiental, E – econômico, S – social, T – técnico; Estratégias: MS – melhoria dos sistemas da edificação, FR – fontes renováveis de energia, IT – isolamento térmico do envelope, MF – materiais de mudança de fase, IN – iluminação natural, VN – ventilação natural e/ou fachada ventilada, FV – fachada verde, cobertura verde e/ou cobertura fria, UA – uso racional de água.

Tabela 2 – Caracterização dos estudos de caso abordando estratégias de *retrofit* em edificações (continuação)

Referência	Local do estudo	Clima	Tipologia					Tipo de edificação					Nº	Época	Aspectos				Estratégias						Programas			
			RU	RM	IE	C	O	EE	PE	PT	P	H			R	A	E	S	T	MS	FR	IT	MF	IN		VN	FV	UA
Weldu e Al-Ghamdi (2019)	Qatar							•		•					1		•	•						•				Revit
William <i>et al.</i> (2020)	Alexandria, Egito	Bwh						•		•					1		•	•	•			•			•		DesignBuilder; EnergyPlus	
Yang (2017)	Xangai, China	Cfa						•		•			•	•	1	1906	•	•		•		•				•		
Yang, Javanroodi e Nik (2020)	Espanha e Suécia		•	•									•		*		•	•					•		•		IDA ICE	
Yao <i>et al.</i> (2016)	China e Reino Unido												•		2	Anterior a 1980	•	•				•		•		•	EnergyPlus	
Yildiz e Koçyiğit (2020)	Balıkesir, Turquia	Csa						•		•			•		4	1990 a 2010	•	•				•		•		•	DesignBuilder; EnergyPlus	
Zhou <i>et al.</i> (2019)	Cantão, China	Cfa						•		•			•		1	2004	•	•					•		•		DesignBuilder; EnergyPlus	
Zhou <i>et al.</i> (2016)	Tianjin, China	Dwa						•		•					1	1998	•	•				•	•	•			eQUEST	

Tipologia: RU – residencial unifamiliar, RM – residencial multifamiliar, IE – instituição de ensino, C – comercial ou de escritórios, O – outros; Tipo de edificação: EE – edificação existente, PE – projeto de edificação, PT – projeto típico, P – pública, H – histórica, R – reformada após a construção; Nº – número de edificações, * – quantidade indefinida; Época – época de construção; Aspectos: A – ambiental, E – econômico, S – social, T – técnico; Estratégias: MS – melhoria dos sistemas da edificação, FR – fontes renováveis de energia, IT – isolamento térmico do envelope, MF – materiais de mudança de fase, IN – iluminação natural, VN – ventilação natural e/ou fachada ventilada, FV – fachada verde, cobertura verde e/ou cobertura fria, UA – uso racional de água.