

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Lorena Silva Saraiva

**MÉTODO RETROCLIMA PARA SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS DE
RETROFIT ENERGÉTICO DE SISTEMAS DE CONDICIONAMENTO
DE AR DE EDIFICAÇÕES**

Porto Alegre
dezembro 2021

LORENA SILVA SARAIVA

**MÉTODO RETROCLIMA PARA SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS DE
RETROFIT ENERGÉTICO DE SISTEMAS DE CONDICIONAMENTO
DE AR DE EDIFICAÇÕES**

Orientadora: Prof.^a Ângela de Moura Ferreira Danilevicz, Dr.^a

Coorientador: Prof. Maurício Carvalho Ayres Torres, Dr.

Dissertação a ser apresentada ao Programa de Pós-Graduação
Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para
obtenção do título de mestre em Engenharia Civil

Porto Alegre
dezembro 2021

Dedico este trabalho a minha família por sempre estarem
ao meu lado e por toda sua dedicação, carinho e suporte
em todos os momentos

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à minha família pelo infinito apoio, incentivo e amor ao longo de toda minha vida. Vocês são as minhas maiores motivações e uma parte essencial de cada etapa e conquista na minha vida. Em especial agradeço aos meus pais, Jane e José pela vida, por serem meu porto seguro e pelos valores que me transmitiram. Muito obrigada, mãe, por ser meu oásis, meu exemplo de pessoa e minha grande amiga!

Agradeço com muito carinho ao meu irmão mais velho, Roberto, meu orgulho e eterno melhor amigo, por sempre cuidar de mim, estar ao meu lado, e me inspirar! Muito obrigada por torcer por mim em cada etapa, por celebrar comigo os bons momentos e por estar presente para me consolar e me ajudar nos ruins!

Agradeço à minha amada sobrinha Olivia, por ser nosso tesouro e por trazer muita luz e alegria para nossas vidas! À Sandra por todos os conselhos e por acolher meus desabafos com compreensão e empatia. Fostes essencial para que eu conseguisse concluir essa etapa!

Agradeço aos meus amigos, em especial, Roberto, Anne, Carol e Júlia pela amizade, pelas risadas, pela ajuda, pelos conselhos e por sempre estarem ao meu lado, tornando a minha jornada acadêmica mais feliz e menos árdua! Agradeço também aos meus colegas de mestrado com os quais tive o prazer de estudar por compartilharem comigo essa etapa!

Principalmente agradeço a minha querida orientadora Ângela Danilevicz, que ao longo desse trabalho foi muito mais que minha professora, mas sim uma mentora inteligente, corajosa, visionária e uma verdadeira amiga! Pelo incansável apoio, carinho, por tornar esse trabalho possível e por todos os ensinamentos ao longo da dissertação. Muito obrigado!

Agradeço o meu coorientador, o professor Maurício Torres, por toda a dedicação, todos os ensinamentos, toda paciência e todo o incentivo durante o tempo em que trabalhamos juntos e desenvolvemos este trabalho. Muito obrigado pela oportunidade de aprendizado e pela grande contribuição na realização deste trabalho!

Registro meu agradecimento a todos os professores da Escola de Engenharia da UFRGS por generosamente compartilharem seus conhecimentos comigo, pois o conhecimento tem a característica fantástica de crescer quando é dividido. Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, especialmente aos professores que trilharam comigo o caminho em direção a um mundo mais sustentável. Agradeço também com muito carinho ao Professor Formoso, que acreditou em mim e no potencial deste estudo desde o começo: Muito obrigado!

Registro ainda, minha profunda gratidão aos especialistas Mario, Ricardo e Cristiano que compartilharam sua experiência, conhecimento e sabedoria no aperfeiçoamento deste estudo. Por fim, agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Energia e persistência conquistam tudo.

Benjamin Franklin

Para enfrentar o desafio energético, é necessária a energia
mais importante de todas: a criatividade humana.

Daniel Yergin

RESUMO

No cenário atual de padrões de consumo de energia em ascensão e de urgência em mitigar os efeitos adversos das mudanças climáticas, o *retrofit* energético do parque de edificações existentes vem se destacando pelo seu potencial para redução do consumo energético global e de emissões de gases de CO₂-eq, em escala global. Para tanto, os sistemas condicionadores de ar têm papel vital, pois são responsáveis pela maior parcela de consumo de energia de edificações, bem como pelo conforto térmico e qualidade do ar do ambiente interno. Ainda que exista uma significativa gama de tecnologias para *retrofit* de sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado de edificações (AVAC), bem como ferramentas para identificar as soluções mais adequadas para determinadas circunstâncias, o processo decisório de seleção desses sistemas segue sendo um grande desafio. A escolha de qual solução de *retrofit* energético de sistemas de AVAC implementar envolve requisitos e preferências de tomadores de decisão com objetivos e valores diferentes e, frequentemente conflitantes, fazendo com que identificar uma solução unanimemente satisfatória seja muito complexo e demorado. Nesse contexto, foi proposto um método, concebido conforme as diretrizes do *design science research*, para seleção de alternativas de sistemas de AVAC de edificações com o intuito de fornecer suporte estruturado ao processo decisório em etapas iniciais de implementação de *retrofit* de sistemas de AVAC de edificações. Para tanto, uma revisão sistemática da literatura foi conduzida na qual foram levantados os elementos chave que influenciam o processo decisório descrito. Para validação do método desenvolvido, bem como para conferir também a perspectiva de profissionais do mercado ao instrumento, não somente da academia, foram realizadas entrevistas qualitativas com especialistas da área de sistemas condicionadores de ar de edificações. Essa pesquisa apresenta contribuições práticas para a área estudada, pois fornece um método simplificado e abrangente, baseado nos princípios do desenvolvimento sustentável, que os profissionais podem utilizar para selecionar alternativas de *retrofit* energético de sistemas de AVAC com acurácia. Também apresenta contribuições acadêmicas através da definição de critérios relevantes para auxiliar o processo decisório de seleção de alternativas de *retrofit* de sistemas de AVAC considerando aspectos ambientais, econômicos, sociais e de tecnologia. O método proposto foi considerado por especialistas da área de sistemas de AVAC como sendo útil, bem sistematizado, de fácil compreensão e aplicação, bem como adequado para uso acadêmico e profissional.

Palavras-chave: retrofit energético; sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado; tomada de decisão, análise de decisão multicritério, ciências do design

ABSTRACT

In the current scenario of rising energy consumption patterns and the increasingly urgent need to mitigate the adverse effects of climate change, the energy retrofit of the existing building stock has been singled out by its enormous potential to reduce global energy consumption and CO_2 -eq emissions on a global scale. Heating, ventilating and air-conditioning (HVAC) systems play a vital role in this, as they are responsible for the largest portion of energy consumption in buildings, while also being responsible for providing thermal comfort and indoor air quality. Despite the significant range of technologies available for retrofitting HVAC buildings systems, as well as great number of exiting tools to identify the most suitable solutions for certain cases, the decision-making process for selecting HVAC systems still poses a great challenge. Choosing which HVAC system energy retrofit solution to implement involves considering the requirements and preferences of decision makers with different, and often conflicting, goals and values, which makes identifying an unanimously satisfactory solution a very complex and time-consuming process. In this context, a decision-making method was developed, constructed according to the principles of design science research, for the selection of HVAC systems retrofit solutions in order to provide structured support in the early stages of building retrofitting. Thus, a systematic literature review was conducted in which the key elements that influence the decision-making process were determined, according to economic, environmental, social and technology aspects. To validate the method developed, as well as to afford the instrument the perspective of market professionals not only from academia qualitative interviews were conducted with experts in the field of HVAC buildings systems. This research offers practical contributions to the studied area, as it provides a simplified and comprehensive method that professionals can use to select alternatives for energy retrofit of HVAC systems accurately and based on the principles of sustainable development. Furthermore, this study brings forward academic contributions through the definition of relevant criteria to assist the decision-making process for the selection of retrofit alternatives for HVAC systems considering environmental, economic, social and technological aspects. The experts interviewed found the developed method useful, well systematized, easy to understand and apply, as well as suitable for both academic and professional use.

Keywords: energy retrofit; HVAC systems; decision-making; multicriteria decision analysis, design science research

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fornecimento total de energia primária por combustível, 1971 e 2019.....	14
Figura 2 – Participação das edificações e setor de construção no uso final de energia e emissões de CO2-eq em escala global para o ano de 2019	15
Figura 3 – Uso de energia por tipo no setor de edificações no mundo, 2010-2019	16
Figura 4 – Produção de eletricidade bruta por fonte, 2019	17
Figura 5 – Cenários de demanda de energia final para aquecimento e resfriamento até 2050 conforme o estado da arte e condições sub-ótimas	24
Figura 6 – Evolução da tarifa média da energia elétrica para a classe residencial.....	25
Figura 7 – Fluxograma da revisão sistemática da literatura conforme o protocolo PRISMA..	38
Figura 8 – Tipos de artefatos do Design Science Research.....	39
Figura 9 – Método para condução de estudos que usam a Design Science Research.....	40
Figura 10 – Lógica para construção de classes de problemas	41
Figura 11 – Diagrama indicativo de como as etapas se relacionam entre si.	44
Figura 12 – Proporção dos temas preponderantes das publicações incluídas no estudo.....	45
Figura 13 – Número de artigos de cada publicação incluída nos resultados da revisão sistemática	46
Figura 14 – Proporção de representação de cada tipologias de edificação estudada	47
Figura 15 – Fatores que influenciam o processo decisório de retrofit.....	49
Figura 16 – Dimensões associadas ao processo de seleção de alternativas de retrofit energético de edificações	50
Figura 17 – Elementos chave que influenciam o retrofit de edificações.....	52
Figura 18 – Exemplo das interações entre os critérios para seleção de alternativas de retrofit.....	54
Figura 19 – Critérios preponderantes da dimensão econômica conforme a literatura	55
Figura 20 – Critérios preponderantes da dimensão ambiental conforme a literatura.....	57
Figura 21 – Critérios preponderantes da dimensão social conforme a literatura	59
Figura 22 – Critérios preponderantes da dimensão tecnologia conforme a literatura.....	61
Figura 23 – Representação das dimensões nas publicações estudadas	64
Figura 24 – Detalhamento da representatividade das tipologias de edificação na revisão sistemática	65
Figura 25 – Proporção de trabalhos que analisam critérios das dimensões estudadas para a tipologia residencial.....	66
Figura 26 – Proporção de trabalhos que analisam critérios das dimensões estudadas para a tipologia educacional.....	66
Figura 27 – Proporção de trabalhos que analisam critérios das dimensões estudadas para a subtipologia escritório	67
Figura 28 – Proporção de trabalhos que analisam critérios das dimensões estudadas para a subtipologia comercial (geral).....	68
Figura 29 – Proporção de trabalhos que analisam critérios das dimensões estudadas para a subtipologia hotel	68
Figura 30 – Proporção de trabalhos que analisam critérios das dimensões estudadas para a tipologia de edificação pública.....	69

Figura 31 – Proporção de trabalhos que analisam critérios das dimensões estudadas para a tipologia hospitalar	70
Figura 32 – Proporção de trabalhos que analisam critérios das dimensões estudadas para a tipologia histórica	71
Figura 33 – Comparativo das proporções de publicações que analisam critérios das dimensões incluídas no método proposto para todas as tipologias de edificação estudadas.....	71
Figura 34 – Categorias de abordagens metodológicas para aprimoração da eficiência energética em edificações	76
Figura 35 – Categorias de abordagens metodológicas para retrofit de edificações.....	77
Figura 36 – Escala Likert de 9 pontos utilizada no Método Retroclima	79
Figura 37 – Composição do Potencial de Exequibilidade do Método Retroclima.....	80
Figura 38 – Passos da versão preliminar do Método Retroclima	84
Figura 39 – Contexto de utilização do Método Retroclima no processo de seleção de alternativas de retrofit energético	86
Figura 40 – Passos para aplicação do Método Retroclima	102
Figura 41 – Matriz de avaliação do Método Retroclima	104

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	13
1.1 APRESENTAÇÃO DO TEMA.....	13
1.2 JUSTIFICATIVA.....	22
1.3 DIRETRIZES DA PESQUISA.....	28
1.3.1 Questão de pesquisa.....	28
1.3.2 Objetivos de pesquisa	28
1.3.3 Delimitações	28
1.3.4 Estrutura da dissertação	29
CAPÍTULO 2 –PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	31
2.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	31
2.2 CONDUÇÃO DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA.....	31
2.2.1 Objetivo da Revisão Sistemática.....	33
2.2.2 Critérios de elegibilidade de publicações.....	33
2.2.3 Fontes e bases de dados	34
2.2.4 Estratégias de busca	34
2.2.5 Seleção dos estudos incluídos na pesquisa.....	35
2.2.6 Risco de viés	36
2.2.7 Fluxograma da revisão sistemática da literatura	37
2.3 DESENVOLVIMENTO DO ARTEFATO.....	38
CAPÍTULO 3 – RESULTADOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	45
3.1 DESCRIÇÃO DAS PUBLICAÇÕES INCLUÍDAS NA PESQUISA	45
3.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCESSO DECISÓRIO DE SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS DE RETROFIT DE SISTEMAS DE AVAC.....	48
3.3 CRITÉRIOS PREPONDERANTES NO PROCESSO DE SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS DE RETROFIT DE SISTEMAS DE AVAC.....	50
3.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA.....	63
CAPÍTULO 4 – MÉTODO RETROCLIMA PARA SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS DE RETROFIT ENERGÉTICO DE SISTEMAS CONDICIONADORES DE AR DE EDIFICAÇÕES	75
4.1 VERSÃO PRELIMINAR DO MÉTODO RETROCLIMA	75
4.2 VALIDAÇÃO QUALITATIVA DO ARTEFATO.....	84
4.3 VERSÃO FINAL DO MÉTODO RETROCLIMA.....	93
4.3.1 Apresentação e refinamento do artefato.....	93
4.3.2 Passos para aplicação do Método Retroclima	102
CAPÍTULO 5 – COMENTÁRIOS FINAIS	106
5.1 CONCLUSÕES.....	106
5.2 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....	109
REFERÊNCIAS	110

**APÊNDICE A – BANCO DE ALTERNATIVAS DE *RETROFIT* ENERGÉTICO DE SISTEMAS
CONDICIONADORES DE AR DE EDIFICAÇÕES 125**

**APÊNDICE B – ROTEIRO DAS ENTREVISTAS SEMIESTRUTURADAS COM ESPECIALISTAS DA
ÁREA DE SISTEMAS DE CONDICIONAMENTO DE AR DE EDIFICAÇÕES..... 137**

**APÊNDICE C – RELAÇÃO COMPLETA DOS CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS DE
RETROFIT ENERGÉTICO DE SISTEMAS DE AVAC DE EDIFICAÇÕES PRESENTES NOS
TRABALHOS COLETADOS NA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA 146**

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Nesta seção introdutória são explicitados o tema desta dissertação, a justificativa do presente estudo, as questões e objetivos de pesquisa, bem como as delimitações do trabalho desenvolvido.

1.1 APRESENTAÇÃO DO TEMA

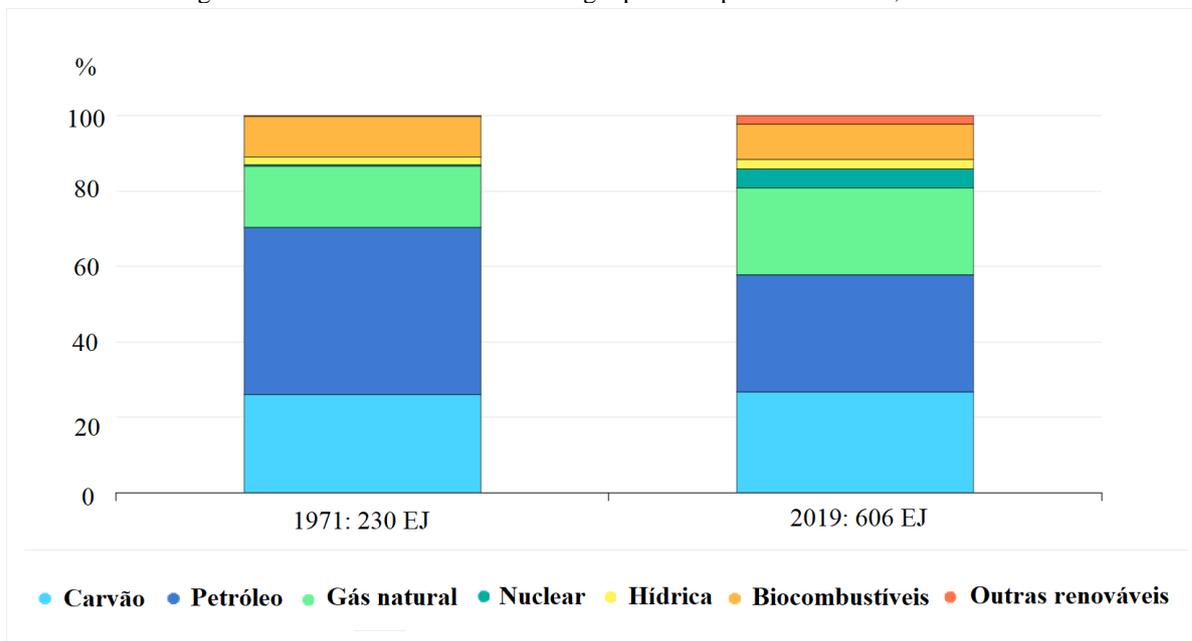
A energia é um dos alicerces que sustentam as economias modernas, sendo fundamental para a prosperidade e o desenvolvimento econômico, porém, ainda é majoritariamente dependente de fontes de combustíveis fósseis (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019). O consumo e a demanda crescentes por energia estão intimamente associados ao aquecimento global e às mudanças climáticas, que são os maiores desafios atuais da humanidade.

Fatores como o desenvolvimento industrial, o crescimento populacional acelerado, as mudanças nos padrões de consumo, de uso do solo e de energia contribuem substancialmente para elevação da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, e é a presença destes gases, por sua vez, a principal causa das mudanças climáticas (UNITED NATIONS POPULATION FUND, 2011; ABDELAZIM et al., 2017; INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2014). Sendo assim, controlar a produção e a liberação destas substâncias no meio ambiente vem se impondo como um requisito para o desenvolvimento sustentável da vida na Terra.

Ademais, a busca por soluções para a crise global em razão das mudanças climáticas se torna ainda mais urgente frente ao aumento da frequência e severidade de eventos extremos decorrentes das mudanças climáticas (GLOBAL ALLIANCE FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION & OBSERVATOIRE DE L'IMMOBILIER DURABLE, 2021). Conforme Abdelazim et al. (2017), a continuada dependência de fontes de energia fóssil, as quais são limitadas e esgotáveis por natureza, pode gerar uma crise de energética mundial. Atualmente, essas fontes ainda representam a maior parte da matriz energética global, conforme pode ser observado na Figura 1, na qual são apresentados o fornecimento total de energia primária mundial por fonte de combustível para os anos de 1971 e 2019. Nesse período, ainda que o uso de combustível fóssil (carvão, petróleo e gás natural) tenha diminuído ligeiramente, estes

seguem sendo responsáveis pela grande maioria da matriz energética mundial (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021a).

Figura 1 – Fornecimento total de energia primária por combustível, 1971 e 2019



(fonte: INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021a)

Como resultado de décadas de discussão internacional sobre o tema, em dezembro de 2015, durante a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima, foi assinado o Acordo de Paris, um acordo internacional de comprometimento e colaboração global para combater as mudanças climáticas, garantindo simultaneamente a produção de alimento e o desenvolvimento econômico. Para tanto, foi definido como objetivo central limitar o aumento da temperatura média global a bem abaixo de 2°C, ampliando os esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C. (ROGELJ et al., 2016; HARAN et al., 2020). Em março de 2020, 189 dos 197 países signatários endossaram formalmente seus compromissos com o Acordo de Paris de 2015 (ROGELJ et al., 2016).

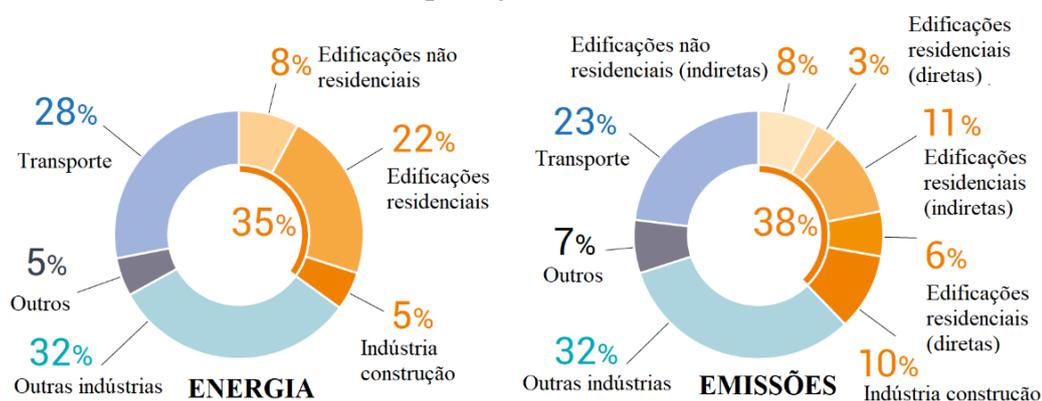
A demanda por energia há algumas décadas se destaca como um dos principais itens nas agendas de líderes mundiais. A capacidade de produção e distribuição de energia são limites que preocupam governos ao redor do globo na medida em que são fatores fundamentais para o desenvolvimento e estabilidade das estruturas e instituições econômicas e sociais de uma nação ou região.

Um dos setores mais proeminentes em que há uma significativa gama de oportunidades para redução do consumo de energia, diminuição da pegada de carbono e ampliação da eficiência energética é o de edificações. A modernização do setor de construção civil e

edificações, especialmente em áreas urbanas e industrializadas, pode ser o fator determinante que possibilitará a superação da crise climática ou pode ser responsável pela inviabilização total ou parcial da vida na Terra (ALMEIDA e FERREIRA, 2017; ASADI et al., 2013; SON e KIM, 2016). Por todos esses fatores, é possível afirmar que a demanda pelo aumento da eficiência energética de edificações é atualmente uma das medidas mais eficazes para redução de emissões de gases de efeito estufa e promoção de desenvolvimento sustentável, distribuição de riqueza e justiça social.

O relatório publicado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas mais recente, intitulado Mudanças Climática 2014, aponta o setor de edificações entre os que apresentam as mais importantes contribuições para as emissões diretas e indiretas de gases de efeito estufa (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2014). Paradoxalmente, ao contrário do que seria desejado para fins de mitigação das mudanças climáticas, na última década essa tendência aumentou ao invés de diminuir, de forma que, em 2019, a operação de edificações e a indústria da construção foram responsáveis pelo maior valor de emissões globais diretas e indiretas relacionadas a energia já registrado nestes setores: 38%, como pode ser observado na Figura 2 (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2020). Ademais, o uso de energia em edificações vem se intensificando de forma constante a uma taxa de crescimento médio anual de cerca de 1,1% desde 2000 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019).

Figura 2 – Participação das edificações e setor de construção no uso final de energia e emissões de CO₂-eq em escala global para o ano de 2019



(fonte: UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2020)

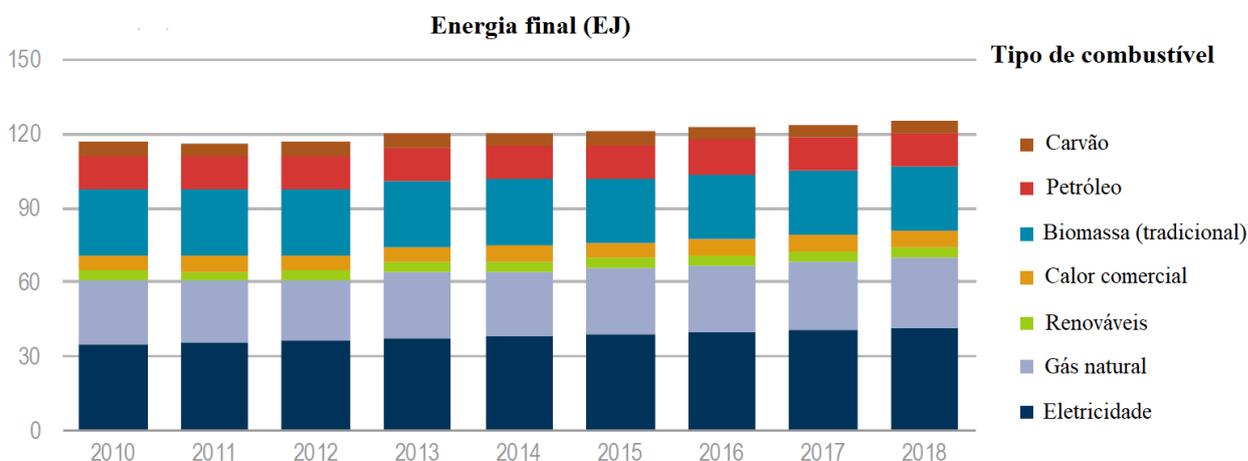
Nesse contexto, nos últimos anos, em um esforço internacional coordenado, o aumento da eficiência energética vem sendo reconhecido como umas principais estratégias para mitigar os efeitos adversos das mudanças climáticas, pois permite reduzir o consumo de energia e,

consequentemente, também as emissões de CO₂ (BILLIO et al., 2020). Com esse objetivo, pesquisadores em diversos países vêm identificando onde estão as oportunidades de diminuição do consumo de energia e aumento da eficiência.

Abdallah e El-Rayes (2016), por exemplo, apontam que edificações antigas representam 70% do parque imobiliário dos Estados Unidos e salientam que essas edificações frequentemente necessitam urgentemente de modernizações para aprimorar seus desempenhos operacionais, econômicos e sociais. Nessa esteira, Almeida e Ferreira (2017) afirmam que edificações com baixo desempenho energético representam a maior parte das edificações existentes de todo o continente europeu, bem como de outros países desenvolvidos. A partir de estudos como esses, o setor de construção civil e edificações foi identificado como um daqueles em que há mais necessidade de inovação e aprimoramento com o objetivo de reduzir o consumo de energia e promover o aumento da eficiência energética.

Conforme o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), para fins de mitigação de emissões de gases de efeito estufa é necessário investir em fornecimento de eletricidade de baixo carbono e eficiência energética em setores chave, dentre os quais se destaca o das edificações. (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2014). O uso de fontes de energia renováveis no setor de edificações ainda é muito pequeno e depende principalmente de eletricidade, gás natural, biomassa tradicional (carvão e recursos florestais ou agrícolas) e petróleo, como pode ser observado na Figura 3 (GLOBAL ALLIANCE FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION, INTERNATIONAL ENERGY AGENCY AND THE UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2019).

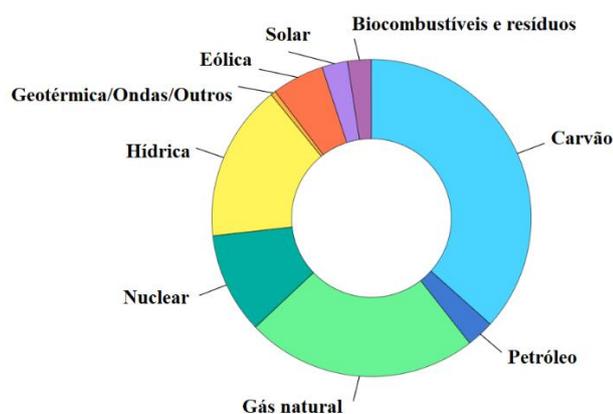
Figura 3 – Uso de energia por tipo no setor de edificações no mundo, 2010-2019



(fonte: GLOBAL ALLIANCE FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION, INTERNATIONAL ENERGY AGENCY AND THE UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2019)

Cabe ressaltar ainda, que a eletricidade, que é citada na estatística anterior, também depende substancialmente de carvão e gás, conforme pode-se observar na Figura 4. De 2010 a 2018 o uso global de eletricidade em edificações cresceu 19%, o que corresponde a um aumento de demanda cinco vezes maior em relação aos avanços na intensidade de uso de carbono do setor de energia (GLOBAL ALLIANCE FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION e INTERNATIONAL ENERGY AGENCY AND THE UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2019).

Figura 4 – Produção de eletricidade bruta por fonte, 2019



(fonte: INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021b)

Para reduzir impactos ambientais e elevar a eficiência energética do setor da construção, existem duas principais alternativas: a demolição da edificação existente aliada à construção subsequente de uma edificação mais eficiente ou um processo de renovação, regeneração, adequação, adaptação ou modificação da edificação existente conhecido como *retrofit* ou *refurbishment*. Conforme aponta Dixon (2014), na literatura existe muito debate sobre o significado dos termos *retrofit* e *refurbishment*.

O estudo referido salienta que diversos autores consideram que os termos *retrofit* e *refurbishment* são sinônimos e, portanto, podem ser utilizados de maneira quase intercambiável. No entanto, segundo Vilches et al. (2017), existem diferenças no significado dos termos e seu uso equivocado em artigos de pesquisa e relatórios institucionais pode representar obstáculos para a implementação de cada conceito.

O termo *retrofit*, que teve sua origem nos Estados Unidos no final da década de 1940 como uma combinação dos termos “*retroactive*” (retroativo, que se refere ao passado) e “*fit*” (adaptar, ser compatível com), diz respeito a intervenções para instalação ou substituição de elementos, sistemas ou materiais por outros mais modernos com o intuito de aprimorar

desempenhos energético, de uso de água ou de geração de resíduos (DIXON, 2014; DIXON et al., 2014; VILCHES et al., 2017). Por outro lado, o termo *refurbishment* se refere a um processo cíclico de melhoria da edificação com o propósito de que essa retorne ou supere as condições iniciais do momento de sua construção (DIXON, 2014; DIXON et al., 2014).

Dessa forma, um processo de *refurbishment* pode, potencialmente, impactar a eficiência no uso de energia e/ou água, bem como a geração de resíduos da edificação (DIXON, 2014; DIXON et al., 2014). Outra distinção importante entre ambos os processos é que o *retrofit* está associado a melhorias de sistemas inteiros ou adição de elementos novos a sistemas existentes ao passo que o *refurbishment* diz respeito a alterações significativas na envoltória ou serviços, feita de forma sistêmica e no nível da edificação como um todo (DIXON, 2014; DIXON et al., 2014).

Conforme Abdelazim et al. (2017), devido à percepção de haver uma maior gama de ações e intervenções passíveis de serem aplicadas, bem como menores restrições, grande parte dos estudos visando a sustentabilidade de edificações está voltada para construção de edificações novas altamente eficientes em comparação à melhoria do desempenho energético do parque de edificações existente. No entanto, segundo Baker (2009), inicialmente o impacto ambiental do *retrofit* quase sempre será menor do que o da demolição e a construção de uma nova edificação, pois todos os materiais carregam energia incorporada e sua substituição, bem como o processo de demolição e eliminação de resíduos geram adicionais emissões de CO₂. Nesse contexto, o *retrofit* de edificações existentes deve ser considerado uma melhor alternativa, pois a sua pegada de carbono tende a ser significativamente menor.

Ademais, as edificações não são apenas estruturas físicas presentes em um ambiente, pois podem ser lares conquistados por uma família, muitas vezes como resultado de uma vida inteira de esforços. Em contextos sociais mais amplos, as edificações também podem representar símbolos de cultura, poder, ordem, refinamento, elegância, entre outros.

Sendo assim, as edificações integram o patrimônio histórico e cultural de uma civilização, de modo que a sua destruição é frequentemente traumática e associada a catástrofes para a comunidade em que a edificação se encontrava. Além do insubstituível valor histórico, social, identitário e de poder econômico e cultural de grande parte das edificações mundiais, o tempo e os recursos que seriam necessários para a destruição e substituição de edificações ineficientes do ponto de vista energético por novas edificações sustentáveis tornam essa alternativa quase que completamente inviável em escala global.

Devido ao significativo impacto do setor de edificações no consumo de energia e, conseqüentemente do seu caráter estratégico para a mitigação dos efeitos nocivos das mudanças climáticas é possível que sem a adoção em larga escala de obras de *retrofit* e *refurbishment* seja inviável atingir importantes metas e objetivos globais, como os presentes no Acordo de Paris. Conforme Fan e Xia (2018), as edificações existentes são a principal causa do elevado consumo de energia no setor de construção civil, uma vez que sua grande maioria está obsoleta e apresenta desempenho energético baixo, representando uma alta gama de oportunidades para aprimorar seus sistemas e equipamentos.

Nessa esteira a Aliança Global para Edifícios e Construção (2016) aponta que as edificações existentes apresentam elevado potencial para fins de redução de consumo de energia e emissões de carbono, uma vez que constituem mais de um terço do parque imobiliário mundial. Ademais, a Agência Internacional de Energia estima que 75% a 90% das edificações existentes continuarão em serviço em 2050 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2013). Não obstante, mesmo sendo considerável a parte das edificações que se encontra obsoleta e com desempenho energético baixo, sua taxa de substituição por edificações novas mais energeticamente eficientes é pequena, representando apenas 1 a 3% ao ano. (MA et al., 2012).

Dentre os fatores que contribuem para um índice de substituição tão baixo, pode ser salientado que a substituição de edificações implica em uma série de problemas e encontra muitas limitações impostas por questões financeiras, de disponibilidade de tecnologia e *know-how* para utilização de novas tecnologias (materiais, equipamentos, técnicas, entre outros) e ainda, a substituição de edificações também encontra problemas socioculturais. Esses fatores além de explicar por que a taxa de substituição de edificações é tão baixa também reforçam as vantagens do *retrofit* sobre a alternativa de substituição.

Nesse cenário, o *retrofit* de edificações existentes com o objetivo de ampliar a sua eficiência energética ganha grande relevância, uma vez que os fatores sociais, históricos, e culturais podem ser preservados e ainda atender às demandas por eficiência, redução do consumo de energia e diminuição de emissões de gases de efeito estufa. Para tanto, o *retrofit* de edificações existente não só deve ser uma prioridade, mas também se destaca como a alternativa principal, mais realística e com maior potencial de impacto (ASCIONE et al., 2019; MA et al., 2012; ALMEIDA e FERREIRA, 2017, KOLOKOTSA, 2016; ROVERS, 2004).

De qualquer modo, é necessário considerar que os processos definidos como *retrofit* de edificações também exigem recursos financeiros, tecnológicos e humanos, que tampouco são homogêaneamente distribuídos globalmente. Além disso, há uma enorme variedade de opções e

alternativas disponíveis para cada objetivo de *retrofit*. Dessa maneira, se fazem necessárias ferramentas capazes de identificar quais destas alternativas de *retrofit* podem atender às necessidades de cada projeto, produzindo os melhores resultados, viabilizando a otimização de recursos humanos, financeiros, de materiais e de técnicas.

Dentre os diferentes tipos de regeneração possíveis de serem efetuados em uma edificação, destaca-se o *retrofit* para fins de eficiência energética que se refere a renovações ou readaptações de uma edificação que visam reduzir eficientemente seu consumo de energia primária (MA et al., 2012). Conforme Sun et al. (2018), a eficiência energética de estratégias de *retrofit* pode ser categorizada em soluções ativas, tais como *retrofit* de sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado, e soluções passivas que visam fornecer maior eficiência energética a componentes arquitetônicos, a fim de reduzir a dependência em soluções ativas, tais como *retrofit* de telhados e envoltórias de edificações.

Dentre as muitas alternativas de *retrofit* de edificações para ampliação da eficiência energética, se destacam as que dizem respeito aos sistemas de condicionamento de ar, pois estes são os serviços que mais consomem energia em uma edificação, sendo responsáveis por aproximadamente metade do uso final da energia e de gases de efeito estufa associados ao setor da construção civil de tal forma que seu acelerado crescimento tem se tornado um agravante para a crise energética e ambiental mundial (ASDRUBALI e DESIDERI, 2019; CHO et al. 2014, BAKER, 2009; PEREZ-LOMBARD et al., 2011). Nesse contexto Baker (2009) aponta que sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado devem ser o principal objetivo em qualquer tentativa de *retrofit* de uma edificação que vise atingir maior sustentabilidade.

Conforme Kuan e Ong (2018), os sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado de edificações se tornaram uma parte essencial da vida cotidiana moderna. Tais sistemas não somente são vitais para proporcionar conforto térmico e condições satisfatórias de qualidade do ar de ambientes internos (AVGELIS e PAPADOPOULOS, 2009).

Tendo em vista que existem muitas alternativas de *retrofit* para ampliação de eficiência energética de edificações focadas nos sistemas de condicionamento de ar, seu processo de seleção deve ser criterioso. Conforme Asadi et al. (2012), no processo de seleção de alternativas de *retrofit*, os tomadores de decisão devem reconciliar fatores ambientais, técnicos, financeiros, relacionados a energia, regulamentos e fatores sociais para encontrar a melhor concessão possível para atender todas as necessidades e requisitos.

Dessa forma, a seleção de alternativas de *retrofit* é um *trade-off* entre o investimento financeiro e os benefícios decorrentes de sua implementação que se torna mais complexo

devido a existência de milhares de alternativas de *retrofit*. (MA et al., 2012; HASHEMPOUR et al., 2020). As decisões sobre a combinação ideal de medidas de adaptação em uma edificação específica são problemas tipicamente complexos, multidimensionais e que envolvem vários atores com objetivos diferentes e possivelmente contrastantes (JAFARI e VALENTIM, 2018; KIVINIEMI, 2005; ALANNE, 2004; ASADI et al., 2013; D'ALPAOS e BRAGOLUSI, 2019; DIAKAKI et al., 2010; PANTELIC et al., 2012; TADEU et al., 2016).

Conforme aponta Kaklauskas et al. (2005), análises multicritérios se adequam à complexidade do processo de *retrofit*, pois permitem a avaliação simultânea de diferentes aspectos de forma que as decisões sejam feitas em conformidade com os requerimentos e recursos dos tomadores de decisão (clientes, projetistas, empreiteiros, usuários e outros participantes), que são expressos no sistema através de valores e pesos para critérios quantitativos e qualitativos.

Segundo Steskens et al. (2015), os modelos de tomada de decisão são ferramentas úteis para estruturar o processo de renovação a fim de obter uma solução ótima de *retrofit*. De acordo com Hashempour et al. (2020), a necessidade de desenvolver ferramentas adequadas para tomada de decisão em processos que visam aprimorar a eficiência energética de edificações é elevada, pois a escolha dessas soluções pode significativamente aumentar ou diminuir a sustentabilidade no ambiente construído.

Além dos possíveis benefícios ambientais e econômicos (redução do consumo de energia e emissões relacionadas a edificações, minimização dos custos operacionais, entre outros), os *retrofits* de sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado também podem fornecer maior conforto térmico, maximização da qualidade do ar no interior de edificações, garantir maior conforto acústico, aumentar produtividade e bem-estar de usuários, entre outros. (HASHEMPOUR et al., 2020; MA et al., 2012). No entanto, ainda que a maioria dos trabalhos na área considere tanto aspectos ambientais quanto econômicos, poucos estudos analisam os três pilares da sustentabilidade (HASHEMPOUR et al., 2020).

Nesse contexto, esse estudo surge com o objetivo de contribuir com o processo de tomada de decisão para escolha das alternativas de *retrofit* energético de sistemas condicionadores de ar de edificações conforme as necessidades e requisitos de cada parte envolvida. Para tanto, é proposta uma ferramenta dinâmica, customizável e atualizável, que permite a adaptação e modernização do instrumento que se destina a aumentar a eficiência energética de sistemas de condicionamento de ar de edificações. Dessa forma, se espera contribuir para a elevação da sustentabilidade, em seus três pilares, do ambiente construído.

1.2 JUSTIFICATIVA

Conforme já mencionado, o aquecimento de ambientes é o maior responsável pelo uso de energia em edificações, consumindo um terço da demanda global de energia em edificações. (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2020). Segundo a Agência Internacional de Energia o processo de descarbonização dos sistemas de aquecimento de edificações existentes depende da realização de *retrofits* energéticos na parte majoritária do parque imobiliário mundial (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021c). Ainda conforme essa publicação, atualmente a taxa de realização de *retrofits* energéticos em edificações em escala global é de menos de 1% ao ano.

É preciso que essa taxa suba para, no mínimo, 2,5% por ano até 2030 para que seja possível atingir o objetivo, representado em códigos de energia de diversos países, de que a maior parte do parque de edificações mundial de 2050 tenha consumo líquido de energia nulo (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021c). Dessa forma, de acordo com a Agência Internacional de Energia, atingir o ritmo e a extensão de *retrofits* de edificações necessário é o maior desafio que o setor de construção enfrentará nos próximos anos (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021c).

Embora o consumo de energia utilizada para o aquecimento de edificações seja expressivo, o resfriamento de ambientes, que historicamente representa uma parcela pequena do uso de energia de edificações, é o tipo de uso de energia em edificações que mais vem crescendo, indo de 2,5% para 6% do consumo total de energia em edificações entre 1990 e 2016 (ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT & INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018) à medida que as economias se desenvolvem e as temperaturas globais aumentam de forma consistente e progressiva e a demanda por conforto em edificações aumenta (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018).

Conforme a Agência Internacional de Energia (2018), a menos que a eficiência energética de sistemas condicionadores de ar aumente, o uso de energia para resfriamento de ambientes em 2040 pode ser maior que o dobro do atual em decorrência do aumento do uso de aparelhos de ar-condicionado. Isso também significa que escolhas de políticas de resfriamento de ambientes terão elevado impacto nas redes de eletricidade (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018).

Ademais, com relação às tecnologias de aquecimento usadas em edificações, segundo a Agência Internacional de Energia (2019), o progresso continua abaixo do necessário, e

equipamentos que operam com o uso de combustíveis fósseis continuam sendo utilizados com maior frequência que alternativas mais eficientes, como bombas térmicas e opções renováveis como equipamentos de aquecimento solar. Ainda, segundo essa publicação, compras de aparelhos de ar-condicionado no mundo estão aumentando três vezes mais rápido que os aprimoramentos em eficiência energética de sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado. O desempenho destes aparelhos precisaria melhorar mais de 50% até 2030 para que o setor atingisse as metas do Acordo de Paris (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019).

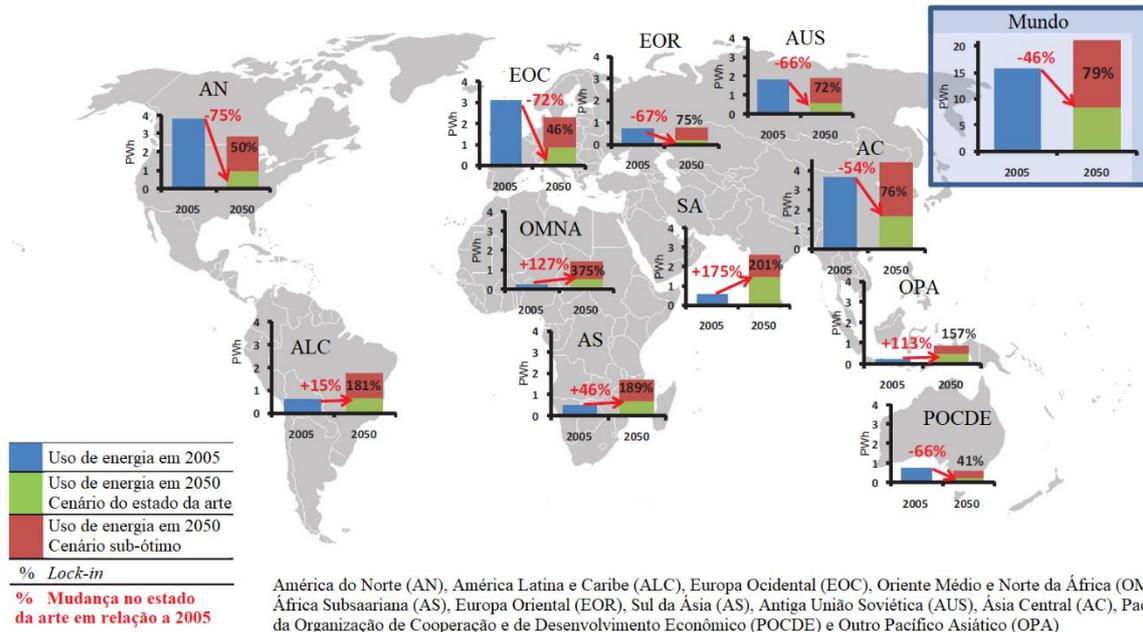
Sistemas de condicionamento de ar que foram dimensionados incorretamente ou selecionados com base em parâmetros de construção desatualizados podem acarretar maior uso de energia, custos mais elevados e estabelecimento de políticas de energia ineficazes. (JEON, 2016; HOWELL, 2017). Além disso, os sistemas de condicionamento de ar de edificações devem ser substituídos anteriormente ao término de sua vida útil com vistas a evitar sua falha definitiva e permitir que sistemas mais avançados e energeticamente mais eficientes sejam selecionados e instalados.

Edificações eficientes e flexíveis podem reduzir o impacto do consumo de energia elétrica e sistemas eficientes de condicionamento do ar podem reduzir a necessidade de capacidade energética em 1.330 gigawatts até 2050, o que equivale a capacidade instalada atual dos Estados Unidos da América e do Canadá (ÜRGE-VORSATZ et al., 2012). A Figura 5 apresenta o uso de energia para aquecimento e resfriamento em 2005 e ilustra a diferença na previsão de demanda por energia para os mesmos usos em 2050 em um cenário ideal e em um cenário sub-ótimo no consumo de sistemas de condicionamento de ar de edificações.

As análises são feitas tanto em nível mundial quanto para onze regiões distintas: América do Norte (AN), América Latina e Caribe (ALC), Europa Ocidental (EOC), Oriente Médio e Norte da África (OMNA), África Subsaariana (AS), Europa Oriental (EOR), Sul da Ásia (AS), Antiga União Soviética (AUS), Ásia Central (AC), Pacífico da Organização de Cooperação e de Desenvolvimento Econômico (POCDE) e Outro Pacífico Asiático (OPA).

Ainda na Figura 5, as barras azuis na imagem demonstram a demanda em 2005. As barras verdes ilustram o cenário ideal em 2050, no qual foram tomadas medidas para ampliação da eficiência no consumo de energia. As barras vermelhas por outro lado representam o uso de energia para aquecimento e resfriamento de edificações em 2050 no cenário sub-ótimo (ÜRGE-VORSATZ et al., 2012).

Figura 5 – Cenários de demanda de energia final para aquecimento e resfriamento até 2050 conforme o estado da arte e condições sub-ótimas



(fonte: ÜRGE-VORSATZ et al., 2012)

Na Figura 5 apresentada, Üрге-Vorsatz et al. (2012) também apontam os riscos de existir um cenário de “lock-in” no qual o uso substancial de energia e emissões de gases de efeito estufa ficariam fixos por muitas décadas caso políticas de aumento de eficiência energética não sejam executadas de forma obrigatória no estado da arte. Vale ressaltar que o cenário de *lock-in* já considera que sejam códigos construtivos visando eficiência energética sejam introduzidos de forma universal e que a taxa de *retrofits* energéticos seja acelerada.

No cenário de *lock-in*, o uso global de energia em edificações cresceria 33% em 2050 em relação aos níveis de 2005, ao contrário do potencial de redução de 46% entre o ano de 2005 e o cenário ideal em 2050 (ÜRGE-VORSATZ et al., 2012). Dessa forma, entre os anos de 2005 e 2050, é possível ter uma variação total de 79% (soma das porcentagens de 33% e 46%) no uso de energia com aquecimento e resfriamento de edificações dependendo de qual cenário seja adotado. Sendo assim, os autores salientam que a adoção de medidas para ampliação da eficiência energética de sistemas de condicionamento de ar de edificações é imprescindível e urgente (ÜRGE-VORSATZ et al., 2012).

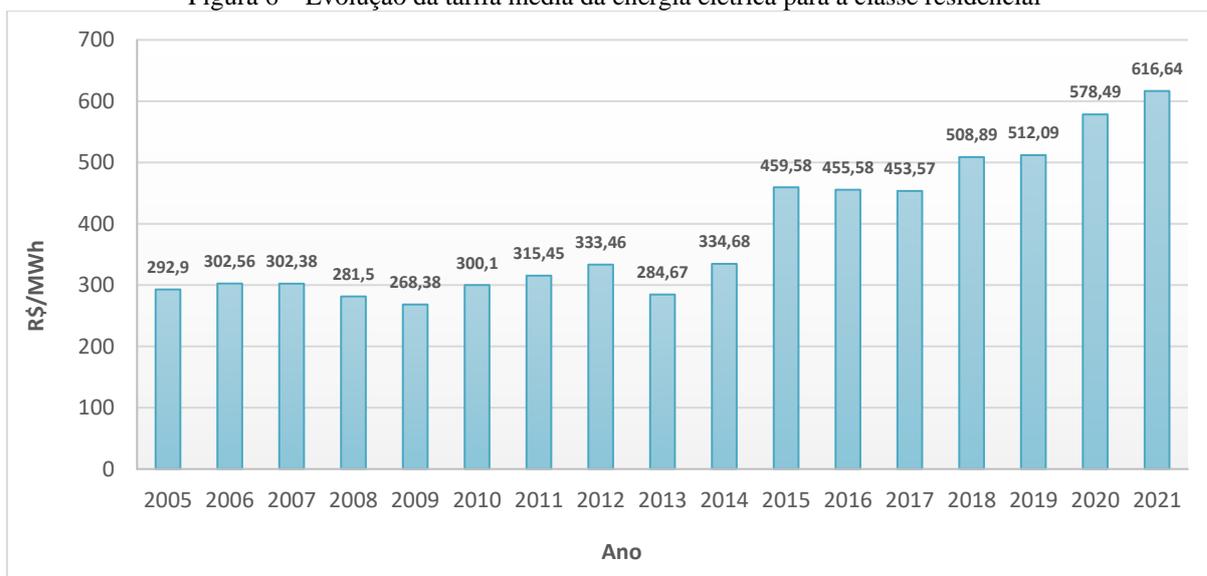
De acordo com Asdrubali e Desideri (2019), o uso total de energia em uma edificação é profundamente influenciado pelos requisitos, processos de aplicações específicas de sua tipologia, especialmente em instalações de produção e manutenção, hospitais e clínicas, restaurantes, entre outros. Encontrar a decisão ideal para o caso estudado torna-se um processo

de otimização, que consiste em uma técnica para maximizar ou minimizar funções objetivo-específicas sob restrições. Tais funções objetivo são formuladas de modo a representar os critérios de decisão e dependem das particularidades do problema (KOLOKOTSA et al., 2009).

Entretanto, do mesmo modo que o *retrofit* com foco em outros aspectos da edificação, o *retrofit* em sistemas de condicionamento de ar também é um processo complexo, com diversas características e especificidades que levam a soluções ótimas diferentes em cada caso. De acordo com Kontokosta (2016), um maior entendimento dos fatores que influenciam positivamente a decisão de implementar medidas de aprimoramento de eficiência energética de edificações pode agir como um catalizador para uma maior taxa de *retrofits*, bem como aumentar as chances de alcançar objetivos de sustentabilidade urbana.

Segundo Ma et al. (2012), a seleção apropriada de critérios e pesos é essencial na formulação de problemas de otimização multiobjetivo de seleção de *retrofits* mais vantajosos economicamente. Nesse âmbito, vale ressaltar que considerando a tendência global de aumento do custo da energia, as estratégias para otimização de investimento se tornam cada vez mais necessárias (HASHEMPOUR et al., 2020). No Brasil, essa tendência de aumento também vem sendo experimentada, para as edificações residenciais, por exemplo, a tarifa média da energia elétrica mais do que duplicou nos últimos oito anos, conforme pode ser observado na Figura 6 apresentada a seguir.

Figura 6 – Evolução da tarifa média da energia elétrica para a classe residencial



(fonte: BRASIL, 2021)

Conforme Jafari e Valentim (2018), existem diversos estudos que utilizam princípios de otimização de um objetivo único ou multiobjetivos para seleção de alternativas de *retrofit* de

edificações, porém, falta um método para identificar e selecionar a(s) função(ões) objetivo(s) para esse problema de otimização. Kolokotsa et al. (2009) pontuam que decisões sobre problemas de otimização energética que envolvem sustentabilidade costumam ser mal definidos e não ser estruturados. Os autores salientam que, com desenvolvimentos tecnológicos, as soluções e alternativas vêm aumentando continuamente de forma que o papel de sistemas de suporte de decisão é crucial, pois estes podem restringir ou expandir as opções consideradas pelos tomadores de decisão.

Ainda conforme Kolokotsa et al. (2009), o fornecimento de conjuntos limitados de operações e critérios restringem as técnicas e soluções passíveis de serem aplicadas, e, conseqüentemente, restringem também o processo de tomada de decisão. Por outro lado, ainda de acordo com os mesmos autores, sistemas que permitem a inclusão de critérios e julgamentos de usuários finais tendem a aumentar a flexibilidade e liberdade nos processos de decisórios de modo que critérios de usuários não sejam considerados apenas conforme o aspecto econômico. Nessa esteira, segundo Nielsen et al. (2016), o processo de desenvolvimento de ferramentas de suporte de tomada de decisão para *retrofits* de edificações pode ser aprimorado com a criação de instrumentos flexíveis quanto a escolhas de critérios e pesos.

Complementam Jafari e Valentim (2017), que apesar de existirem diversas ferramentas de suporte de decisão orientadas para processos de *retrofit* energético de edificações, o estudo de variáveis importantes que afetam essas decisões permanece limitado, de modo que são necessários mais estudos na área de desenvolvimento de modelos de apoio de decisão para seleção de estratégias de *retrofit* a fim de maximizar benefícios ambientais, econômicos e sociais. O presente estudo surge, portanto, com o objetivo de contribuir para o processo de tomada de decisão para escolha da alternativa ótima de *retrofit* para cada projeto de acordo com as necessidades e possibilidades de cada *stakeholder* através de uma ferramenta dinâmica, customizável e atualizável.

Segundo Howell (2017), cada tipologia de edificação possui um conjunto de condições exclusivas que influenciam o projeto e a aplicação de sistemas de condicionamento de ar conforme as especificidades do caso. Ainda, de acordo com essa publicação, as demandas funcionais do espaço geralmente ditam a maioria dos critérios exclusivos, como requisitos de temperatura e umidade, critérios de som e outras condições e preocupações ambientais. Conforme Hashempour et al. (2020), o potencial de otimização de *retrofits* para redução do consumo de energia de certas tipologias de edificações, tais como hotéis e varejo, ainda não foi estudado o suficiente e, portanto, deve ser avaliado.

Outra limitação presente nas ferramentas existentes é apontada por Kolokotsa et al. (2009) no que diz respeito à necessidade de que sejam desenvolvidos sistemas de apoio de tomada de decisão que levem em consideração os contínuos avanços tecnológicos de soluções voltadas para eficiência energética, que forneçam suporte a especialistas em construção na aplicação de seus conhecimentos e que auxiliem tomadores de decisão menos experientes a abordarem tais decisões da mesma forma que fariam os especialistas.

Sendo assim, o método descrito nesse trabalho foi desenvolvido com vistas a explorar a lacuna de conhecimento na área de métodos para apoio de tomada de decisão de processos de seleção de alternativas de *retrofit* energético de sistemas de condicionamento de ar de edificações avaliando aspectos da sustentabilidade conforme a tipologia da edificação, bem como critérios flexíveis e pesos atribuídos pelos diferentes tomadores de decisão. Para tanto, foram aplicados os princípios do *Design Science Research* (DSR) para o desenvolvimento de um artefato (método) no qual foram avaliados diferentes *trade-offs* do processo de seleção de alternativas de *retrofit* energético de sistemas de condicionamento de ar de edificações no qual foram analisadas as seguintes dimensões: econômica, ambiental, social e tecnologia.

O método desenvolvido não se limita aos níveis mínimos de eficiência energética obrigatórios, previstos em códigos de construção, legislação ou objetivos climáticos, pois esse parâmetro pode ser alterado, uma vez que é um *input* definido pelo usuário, resultando em maior flexibilidade para diferentes países e permitindo a sua adaptação e atualização mesmo em cenários de mudança na legislação ou nas políticas públicas.

Vale ressaltar que são mantidas fixas as dimensões (econômica, ambiental, social e técnica) que regem o processo decisório de seleção de alternativas de *retrofit* energético de sistemas de condicionamento de ar de edificações, porém, conforme necessário ou desejado, os critérios analisados nas dimensões podem ser adaptados. Isso concede flexibilidade ao método e o torna passível de compatibilização com diferentes requisitos legais, ou referentes à climas e aspectos culturais locais, permitindo a sua adaptação às mudanças decorrentes de questões políticas, normativas, climáticas, bem como ao avanço da tecnologia, mudanças no mercado, entre outros.

O método proposto permite a incorporação de inovações e novas tecnologias aplicadas à construção civil e é importante pontuar que a sua utilização permite, ainda, conciliar os requisitos e preferências de múltiplas partes envolvidas no processo decisório de seleção de alternativas de *retrofit* (projetistas e clientes).

1.3 DIRETRIZES DA PESQUISA

1.3.1 Questão de pesquisa

Com o intuito de contribuir para a área de conhecimento apresentada, o trabalho visa responder à questão de pesquisa sobre como selecionar soluções de *retrofit* energético de sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado de edificações dentro de um conjunto de alternativas analisadas, considerando aspectos de desenvolvimento sustentável. Além disso, o trabalho também visa responder quais são os elementos chave que podem influenciar o processo de tomada de decisão para escolha de alternativas de *retrofit* dos sistemas descritos previamente para diferentes tipologias da edificação.

1.3.2 Objetivos de pesquisa

O objetivo geral deste estudo é a construção de um método de suporte, em etapas iniciais, do processo decisório de seleção de alternativas de *retrofit* de sistemas condicionadores de ar de edificações. Como desdobramento do objetivo geral, o trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

- (i) identificação dos elementos chave a serem considerados em um processo de seleção de alternativas de *retrofit* energético de sistemas condicionares de ar para diferentes tipologias de edificação, com ênfase em desenvolvimento sustentável;
- (ii) construção de um banco de alternativas de *retrofit* energético de sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado de edificações para facilitar o uso do método desenvolvido por tomadores de decisão menos experientes.

1.3.3 Delimitações

O método proposto foi desenvolvido para ser utilizado na etapa de priorização de opções de sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado no processo decisório de seleção de alternativas de *retrofit* energético de sistemas condicionadores de ar de edificações. Para tanto, é necessário que também sejam realizadas as etapas anteriores do processo de implementação de *retrofits* energéticos, tais como auditoria energética, diagnóstico e avaliação de desempenho

da edificação existente. As informações obtidas nas etapas anteriores do processo de *retrofit* servem como subsídio para a utilização do método proposto conforme foi concebido, porém, não fazem parte do escopo da pesquisa.

Um dos elementos mais importantes que regem a escolha da solução de sistemas condicionadores de ar é carga térmica que deve ser atendida nas diferentes zonas térmicas da edificação. No entanto, segundo aponta a NBR16401-1 (2008, p.10) os cálculos das cargas térmicas é significativamente complexo de forma que “exceto para sistemas muito simples é inviável sem o auxílio de um programa de computador”. Sendo assim, não é foco do trabalho o cálculo de cargas térmicas.

Tendo em vista que o público-alvo do método concebido são estudantes de graduação dos cursos de arquitetura, engenharia civil e de serviços, bem como diferentes perfis de tomadores de decisão em processos de seleção de alternativas de *retrofit* de sistemas condicionadores de ar de edificações (projetistas, gestores, proprietários, investidores, ocupantes da edificação, entre outros) foi decidido não trabalhar com simulações numéricas.

Conforme Baker (2009), *retrofits* são frequentemente acompanhados por mudanças no uso de edificações, como por exemplo, uma edificação residencial que é convertida em escritórios. No entanto, não faz parte desse estudo abordar como mudanças no uso de edificações afetam o processo decisório de seleção de alternativas de *retrofit*.

Por fim, cabe ressaltar que existem incertezas inevitáveis associadas ao projeto e seleção de alternativas de sistemas de condicionamento de ar, tais como evoluções climáticas, comportamento dos ocupantes, expectativas dos usuários das edificações, degradação de desempenho de componentes tecnológicos, entre outros (ASDRUBALI e DESIDERI, 2019). Dessa maneira, não é foco desse trabalho estudar como as incertezas inerentes afetam o processo de seleção de alternativas de *retrofit* de sistemas de condicionamento de ar.

1.3.4 Estrutura da dissertação

O trabalho está estruturado em cinco capítulos. O primeiro, contém as diretrizes norteadoras sobre a pesquisa desenvolvida. No capítulo dois, considerando que o trabalho utiliza o método de *Design Science Research* (DRESCH et al., 2015), são apresentados os procedimentos metodológicos, os quais englobaram a realização de uma revisão sistemática da literatura e a criação de um artefato. No terceiro capítulo são apresentados e discutidos os

resultados obtidos na revisão sistemática da literatura efetuada no tema de *retrofits* energéticos de sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado de edificações presentes na literatura.

No capítulo quatro, são apresentados os elementos necessários para a proposição da versão preliminar do método para seleção de alternativas de *retrofit* de sistemas condicionadores de ar de edificações. Nesse capítulo também é detalhado o processo de validação do artefato concebido feita através de entrevistas com especialistas em sistemas condicionadores de ar de edificações e é descrita a versão final do método proposto, desenvolvido através da adaptação, bem como o refinamento da versão preliminar com base nas aprendizagens obtidas nas entrevistas de validação.

Por fim, no quinto e último capítulo, são apresentadas as considerações finais que englobam as conclusões acerca do trabalho desenvolvido e são apresentadas as sugestões de pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2 –PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A seguir, são apresentados os procedimentos metodológicos adotados neste estudo, incluindo sua classificação, delineamento e método utilizado na pesquisa.

2.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Esse estudo pode ser classificado como uma pesquisa da área de conhecimento das Engenharias, segundo sua finalidade é categorizada como pesquisa aplicada tendo em vista que pretende gerar conhecimentos de aplicação prática para solucionar problemas específicos. No que diz respeito aos objetivos mais gerais este estudo é classificado como prescritivo (SILVA e MENEZES, 2001; GIL, 2010; DRESCH et al., 2015).

Para assegurar robustez no estudo e seus resultados, o método de trabalho escolhido deve ser tal que: aborde a questão de pesquisa, seja reconhecido pela comunidade científica e evidencie adequadamente os procedimentos adotados. Sendo assim, o método científico selecionado foi o abduutivo, pois este consiste no estudo de fatos para fundamentar a proposição de teorias e novas ideias por meio de um processo criativo. (DRESCH et al., 2015).

No que diz respeito ao método de pesquisa mais apropriado considerando as características desse estudo, destaca-se o *Design Science Research* (DSR) uma vez que se pretende projetar e desenvolver artefatos ao longo do desenvolvimento do trabalho. As técnicas de coletas de dados serão bibliográficas (Revisão Sistemática da Literatura) e entrevistas com profissionais com expertise e/ou experiência de trabalho na área de sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado de edificações.

2.2 CONDUÇÃO DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Segundo Moher et al. (2009), uma revisão sistemática da literatura possui uma pergunta de pesquisa claramente formulada que utiliza métodos explícitos e sistemáticos para identificar, selecionar, avaliar estudos relevantes e coletar e analisar dados dos trabalhos que são incluídos na revisão. A importância da utilização de um protocolo na condução de uma revisão sistemática da literatura é baseada em diversos fatores, conforme Shamseer et al. (2015):

- (1) permite que revisores sistemáticos planejem cuidadosamente e antecipem possíveis problemas;
- (2) permite que os revisores documentem explicitamente o que está planejado antes de iniciar sua revisão, permitindo que outros comparem o protocolo e a revisão concluída (ou seja, identifiquem relatórios seletivos), repliquem os métodos de revisão, se desejado, e julguem a validade dos métodos planejados;
- (3) impede a tomada de decisões arbitrárias com relação aos critérios de inclusão e

extração de dados; e (4) pode reduzir a duplicação de esforços e aprimorar a colaboração, quando disponível.

A revisão sistemática da literatura foi conduzida de acordo com o Manual Cochrane para revisões sistemáticas de intervenções (HIGGINS e GREEN, 2020), utilizando a estratégia PICOS – *Problem, Intervention, Control or Comparison, Outcome, Study Type* ou Problema, Intervenção, Comparação, Desfecho, e Tipo de Estudo – para estruturar a pergunta de pesquisa e o relatório foi elaborado segundo o protocolo PRISMA – *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analyses* ou Principais itens para relatar em revisões sistemáticas e meta-análises (MOHER et al., 2009).

Segundo Santos et al. (2007), a utilização da estratégia PICOS para a construção da pergunta de pesquisa de uma revisão sistemática da literatura pode contribuir para orientar a busca bibliográfica de modo que pesquisadores encontrem a melhor informação científica disponível para esclarecer questionamentos de maneira acurada e rápida. Para tanto, conforme os autores, a estratégia PICOS é aplicada para descrever os componentes relacionados ao problema de modo que seja mais fácil identificar e estruturar a pergunta de pesquisa da revisão sistemática da literatura. Adaptando a estratégia PICOS para o contexto deste estudo, foram obtidos os componentes da estratégia de pesquisa expostos no Quadro 1 apresentado a seguir.

Quadro 1 – Aplicação da estratégia PICOS aos parâmetros do estudo

PICOS	Categorias de busca aplicadas na RSL conforme a estratégia PICOS
<i>Problem</i> (problema)	Levantamento dos fatores relevantes ao processo de seleção alternativas de <i>retrofit</i> energético de sistemas de condicionamento de ar de edificações
<i>Interventions</i> (intervenção)	Compilação de alternativas de <i>retrofit</i> energético de sistemas de condicionamento de ar encontradas na literatura
<i>Comparison</i> (comparação)	Agrupamentos das alternativas em macro grupos. Análise de aplicabilidade das soluções para certos contextos.
<i>Outcome</i> (desfecho)	Conscientização e formalização das faces do problema de pesquisa. Determinação da(s) classe(s) de problema(s). Identificação dos sistemas abrangidos pelo método.
<i>Study type</i> (tipo de estudo)	Dados qualitativos ou quantitativos, pois ambos serão avaliados

(fonte: elaborada pela autora com base em METHLEY et al., 2014)

De acordo com Moher et al. (2009), o protocolo PRISMA é composto por um *check-list* de 27 itens e um fluxograma de quatro fases: identificação, seleção, elegibilidade e inclusão. Moher et al. (2009) explicitam que o protocolo foi desenvolvido com o propósito de auxiliar outros autores a aprimorar a forma com a qual os resultados de revisão sistemáticas da literatura são relatados.

As diretrizes utilizadas na condução dessa revisão sistemática da literatura foram desenvolvidas com o intuito de aumentar a transparência, a precisão e a completude do relatório dos resultados obtidos na revisão conduzida (SHAMSEER et al., 2015; METHLEY et al., 2014). A seguir são descritos os principais elementos da revisão sistemática desenvolvida para fins dessa pesquisa conforme o protocolo PRISMA.

2.2.1 Objetivo da Revisão Sistemática

A revisão sistemática contida no presente trabalho foi realizada para fins de levantamento de critérios e alternativas de *retrofit* energético de sistemas de condicionamento de ar de edificações conforme sua tipologia. Vale ressaltar que os resultados da revisão sistemática da literatura também serviram como subsídio para a criação do Banco de Alternativas de *retrofit* energético de sistemas condicionadores de ar de edificações.

2.2.2 Critérios de elegibilidade de publicações

Os critérios de elegibilidade foram determinados conforme descrito com o intuito de identificar e incluir estudos relevantes, garantir o nível técnico da informação coletada e minimizar a ocorrência de viés na seleção de trabalhos.

Durante a condução da revisão sistemática, foram consideradas apenas trabalhos divulgados nos últimos vinte anos, publicados e disponíveis em português, inglês e espanhol. Além disso, foram considerados também a proximidade dos estudos com o tema da pesquisa e a qualidade técnica dos trabalhos.

Analogamente, publicações sob a forma de comentários, cartas, editoriais ou trabalhos de conclusão de curso de graduação foram descartados. No entanto, estudos com caráter preliminar foram incluídos, pois conforme apontam Dresch et al. (2015), pesquisas que utilizam o *Design Science Research* podem ser amplamente beneficiadas com aprendizagens provenientes de experimentos práticos mesmo que os resultados sejam desfavoráveis.

2.2.3 Fontes e bases de dados

Durante a condução da revisão sistemática presente nesta pesquisa, as maiores contribuições foram oriundas das bases de dados *Web of Science*, *Scopus* e *Science Direct*. No entanto, também foram utilizadas fontes monográficas (livros, dissertações, teses) e anais de eventos nacionais e internacionais.

As três bases de dados escolhidas são multidisciplinares, frequentemente atualizadas, revisadas por pares e de muito destaque e prestígio na comunidade acadêmica. O *Science Direct* cobre uma vasta coleção de revistas científicas da Elsevier sobre ciência, tecnologia e medicina. O *Web of Science* e o *Scopus* (também da Elsevier), por sua vez, abrangem todas as áreas de conhecimento e dispõem de artigos de periódicos, anais de eventos, revisões, livros na íntegra e em capítulos, entre outros.

O *Science Direct* contempla textos completos na literatura, em contrapartida o *Scopus* e o *Web of Science* são plataformas que permitem também a busca de resumos e citações, bem como analisam o fator de impacto das diferentes publicações. Dessa forma, as três bases de dados descritas se mostraram adequadas para atender aos objetivos da revisão sistemática dessa pesquisa em decorrência de sua elevada abrangência e relevância na área estudada.

2.2.4 Estratégias de busca

As buscas foram baseadas nos critérios de elegibilidade mencionados previamente e com processo de triagem e seleção realizados em duas etapas por um único revisor. Na primeira etapa foram analisados somente o título, palavras-chaves e resumo da publicação. Na segunda etapa, os textos completos foram avaliados.

Nos três idiomas contemplados na revisão sistemática, os termos de busca utilizados foram variações dos seguintes tipos: palavra exata, palavras truncadas, expressão exata e sinônimos. Foram empregados também os operadores booleanos “AND” e “OR”.

Outra estratégia de busca empregada foi a de *snowballing*, definida por Higgins e Green (2020) como busca das citações relevantes presentes nos trabalhos que atendem aos critérios de elegibilidade da busca. Isso foi realizado tanto para aperfeiçoamento da estratégia de busca, como para captação de estudos não recuperados nas buscas iniciais. O Quadro 2 a seguir apresenta a expressão lógica utilizada em cada busca.

Quadro 2 – Descrição das buscas efetuadas durante a condução da revisão sistemática da literatura

Busca	Expressão lógica utilizada
1	“energy efficien*” AND “retrofit*” OR “refurbishment” OR “upgrade” OR “improvement” OR “renovat*” OR “reconstruct*” OR “intervention*” AND “HVAC” OR “air condition*” OR “heating*” OR “cooling” OR “ventilation” OR “building service system” AND “multi-criteria” OR “multi-objective” OR “multi-variable” OR “decision variables” OR “objective functions” OR “constrains” AND “optim*” OR “maximiz*” OR “minimiz*” OR “optimal trade-off” OR “cost-optim*”
2	(TITLE-ABS-KEY (“energy efficien*” OR “low energy” OR sustainab* OR "energy conservation" OR “low carbon”) AND TITLE-ABS-KEY (retrofit* OR refurb* OR upgrad* OR renov* OR intervention) AND TITLE-ABS-KEY (hvac OR “air condition*” OR heating OR cooling OR ventilation OR “building service systems”) AND TITLE-ABS-KEY (“multi-criteria” OR “multi-objective” OR “multi-variable” OR “decision variables” OR “objective functions” OR “constrains” AND “optim*” OR “maximiz*” OR “minimize*” OR “optimal trade-off” OR “cost-optim*”))
3	(TITLE-ABS-KEY (“decision-making” OR “criteria” OR “variables” OR “parameters” OR “aid” OR “support” OR select*) AND TITLE-ABS-KEY (retrofit* OR refurb* OR upgrad* OR renovat*) AND TITLE-ABS-KEY (hvac OR “air condition*” OR heating OR cooling OR ventilation) AND TITLE-ABS-KEY (hospital OR healthcare))
4	(TITLE-ABS-KEY (“decision-making” OR “criteria” OR “variables” OR “parameters” OR “aid” OR “support” OR select*) AND TITLE-ABS-KEY (retrofit* OR refurb* OR upgrad* OR renovat*) AND TITLE-ABS-KEY (hvac OR “air condition*” OR heating OR cooling OR ventilation) AND TITLE-ABS-KEY (commercial OR office OR hotel))
5	(TITLE-ABS-KEY (“decision-making” OR “criteria” OR “variables” OR “parameters” OR “aid” OR “support” OR select*) AND TITLE-ABS-KEY (retrofit* OR refurb* OR upgrad* OR renovat*) AND TITLE-ABS-KEY (hvac OR “air condition*” OR heating OR cooling OR ventilation) AND TITLE-ABS-KEY (public AND building))
6	(TITLE-ABS-KEY (“decision-making” OR “criteria” OR “variables” OR “parameters” OR “aid” OR “support” OR select*) AND TITLE-ABS-KEY (retrofit* OR refurb* OR upgrad* OR renovat*) AND TITLE-ABS-KEY (hvac OR “air condition*” OR heating OR cooling OR ventilation) AND TITLE-ABS-KEY (school OR university OR education OR academi*))

(fonte: elaborada pela autora)

2.2.5 Seleção dos estudos incluídos na pesquisa

Após a eliminação dos artigos repetidos, a primeira etapa de triagem de artigos potencialmente relevantes para a pesquisa foi baseada no título, resumo e palavras-chave de cada publicação. Dessa forma, os trabalhos que não cumprissem os critérios de inclusão de escopo e tema de pesquisa também foram descartados.

Mais especificamente, parte dos estudos inicialmente coletados na revisão sistemática da literatura foi eliminada em decorrência das publicações não se referirem ao escopo e tema de pesquisa por:

- (i) Não tratem do tema de *retrofit* energético de edificações;
- (ii) Serem voltadas para *retrofit* energético, mas não cobrirem sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado;
- (iii) Serem sobre *retrofit* energético de sistemas condicionadores de ar de edificações, mas não abordarem fatores relevantes para seleção de tais sistemas.

Foram considerados como fatores relevantes os critérios relacionados ao processo decisório para escolha desses sistemas, bem como motivações, benefícios, barreiras e limitações para implementação de *retrofit* energético de sistemas de AVAC de edificações. Também foram coletados estudos que incluíssem soluções inovadoras e sustentáveis (tais como utilização de fontes de energia renováveis) para condicionamento de edificações ou artigos que apresentassem número significativo de alternativas de *retrofit* de sistemas de AVAC de edificações.

Essas publicações foram utilizadas para a construção do Banco de Alternativas de Retrofit Energético de Sistemas Condicionadores de Ar de Edificações, porém, não foram incluídas nos resultados da revisão sistemática tendo em vista que, em sua grande maioria, tais estudos não satisfaziam os critérios de inclusão descritos previamente. O Banco de Alternativas é apresentado no Apêndice A desse trabalho.

Tanto os estudos que cumpriam os requisitos para inclusão quanto os que não deixavam claro *a priori* se também satisfaziam os critérios de seleção foram incluídos na segunda etapa. Na segunda etapa foi realizada a leitura dos métodos, resultados e conclusões.

Analogamente à etapa anterior, para a segunda triagem de artigos, o conteúdo dos estudos foi analisado conforme o escopo e tema da revisão. Por fim, as publicações que foram incluídas na terceira etapa da triagem passaram por uma cuidadosa leitura de todo o texto afim de determinar quais artigos seriam incluídos nos resultados da pesquisa.

2.2.6 Risco de viés

De acordo com Dresch et al. (2015), uma das vantagens da condução de uma revisão sistemática da literatura é a diminuição da possibilidade de ocorrência de viés na pesquisa. Segundo estes autores, existe o risco de viés de relato de resultados ou de publicação quando pesquisadores consideram em seus estudos apenas trabalhos com resultados positivos ou estatisticamente positivos.

Conforme mencionado previamente, nesta pesquisa serão considerados também trabalhos que não apresentam resultados ou que tenham resultados negativos, desde que estas publicações atendam aos critérios de elegibilidade. A inclusão de tais trabalhos não somente pode contribuir significativamente para que aprendizagens oriundas de experimentos práticos sejam contempladas durante o desenvolvimento do método e instrumento propostos, como

também pode auxiliar na minimização das chances de ocorrência de viés de relato de resultado e viés de publicação.

Outro tipo de viés muito comum em pesquisas acadêmicas é o de disseminação que diz respeito ao acesso a estudos primários. Estudos com resultados positivos geralmente são publicados rapidamente, apresentam maior número de citações, estão disponíveis em mais bases de dados e têm maiores chances de possuir uma versão em língua inglesa (DRESCH et al., 2015).

Considerando este contexto, a estratégia de busca da revisão sistemática presente neste trabalho incluiu três idiomas diferentes (inglês, português e espanhol), não contemplou apenas pesquisas com resultados positivos e considerou um horizonte de tempo de vinte anos. Além disso, durante a condução da revisão sistemática foram utilizadas estratégias para diminuição das chances de ocorrência de viés de disseminações tais como utilização de diferentes expressões lógicas (palavras e expressões exatas, bem como palavras truncadas), operadores booleanos, operadores de proximidade, utilização de sinônimos (*retrofit*, *refurbishment*, *renovation*, etc), entre outros.

2.2.7 Fluxograma da revisão sistemática da literatura

Conforme mencionado previamente, a aplicação do protocolo PRISMA para estruturação de uma revisão sistemática da literatura inclui a confecção de um fluxograma característico. Tal fluxograma referente a essa pesquisa pode ser observado na Figura 7 que engloba todos os resultados da aplicação das expressões lógicas apresentadas no Quadro 2 nas três bases de dados utilizadas.

O protocolo PRISMA descreve as revisões sistemáticas da literatura como sendo compostas por quatro etapas: identificação, seleção, elegibilidade e inclusão. Na etapa de identificação foram aplicadas as estratégias de busca descritas previamente nas bases de dados *Scopus*, *Science Direct* e *Web of Science*.

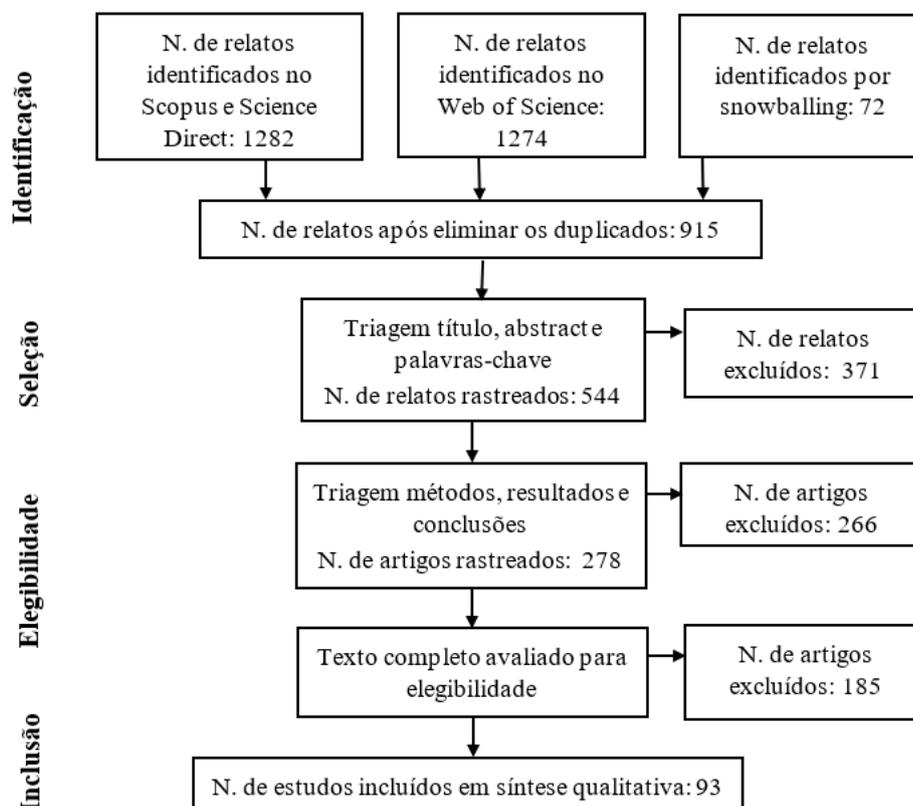
Também na etapa de identificação foram coletados 1282 relatos das bases Scopus e Science Direct, incluídos juntos em função de ambas as bases de dados pertencerem a Elsevier, e 1274 no *Web of Science*. Ainda na etapa de identificação foram excluídos 843 relatos duplicados.

Na etapa de seleção da revisão sistemática, foi realizada a primeira triagem base no título, resumo e palavras-chave das publicações conforme detalhado anteriormente. Nessa etapa foram rastreados 472 relatos e excluídos 371.

Na etapa de elegibilidade foi realizada uma segunda triagem dos trabalhos através da leitura dos métodos, resultados e conclusões das publicações. Nessa etapa foram considerados elegíveis 278 trabalhos e excluídos 266.

Na etapa de inclusão da revisão sistemática as publicações foram lidas na íntegra e 185 trabalhos foram excluídos. Foram incluídos na síntese qualitativa da revisão sistemática da literatura 93 trabalhos. Vale ressaltar que os critérios de elegibilidades e de inclusão descritos previamente foram utilizados para orientar as etapas de seleção, elegibilidade e inclusão.

Figura 7 – Fluxograma da revisão sistemática da literatura conforme o protocolo PRISMA.



(Fonte: elaborada pela autora com base em SHAMSEER et al., 2015).

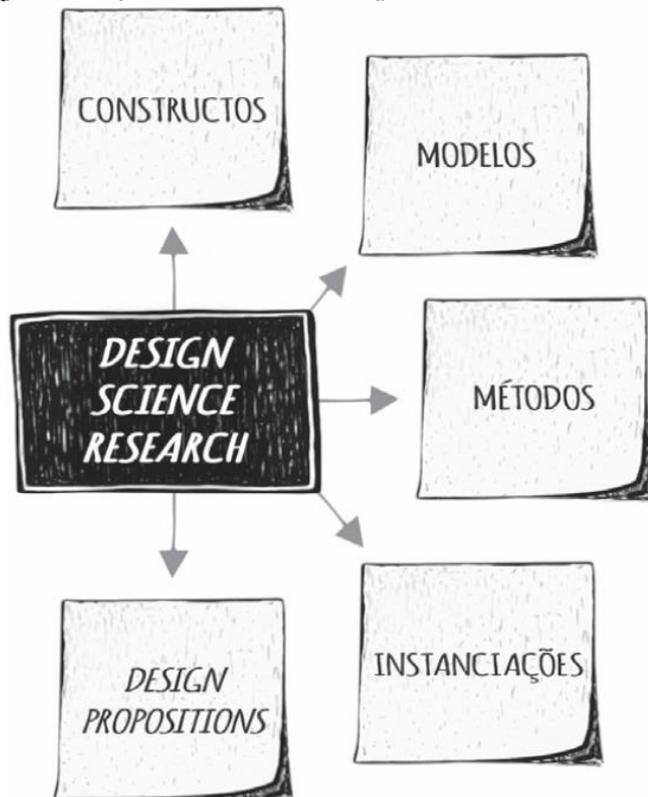
2.3 DESENVOLVIMENTO DO ARTEFATO

Conforme mencionado previamente, o artefato desenvolvido nesse estudo foi concebido conforme os princípios do *Design Science Research*. Esse método de pesquisa se embasa, fundamentalmente, em um paradigma de resolução de problemas que deve gerar como produto

um artefato viável que pode tomar diferentes formas, como pode ser observado na Figura 8 (HEVNER et al., 2004, DRESCH et al., 2015). Constructos são os conceitos utilizados para descrever problemas em um campo e para especificar suas possíveis soluções, modelos são representações da realidade que expressam as relações entre constructos, as instanciações, por sua vez, se referem a aplicações e/ou operacionalizações de artefatos (constructos, modelos, métodos) em dados ambientes (MARCH e SMITH, 1995). As *design propositions* são outro tipo de artefato que representa as contribuições teóricas oriundas da aplicação do *Design Science Research* (DRESCH et al., 2015).

Segundo March e Smith (1995) métodos são um conjunto de passos, algoritmos ou diretrizes utilizados para realizar uma tarefa. Os autores também pontuam que artefatos sob a forma de métodos frequentemente são utilizados para expressar conceitos e relações entre modelos e representações com o objetivo de solucionar um problema.

Figura 8 – Tipos de artefatos do *Design Science Research*



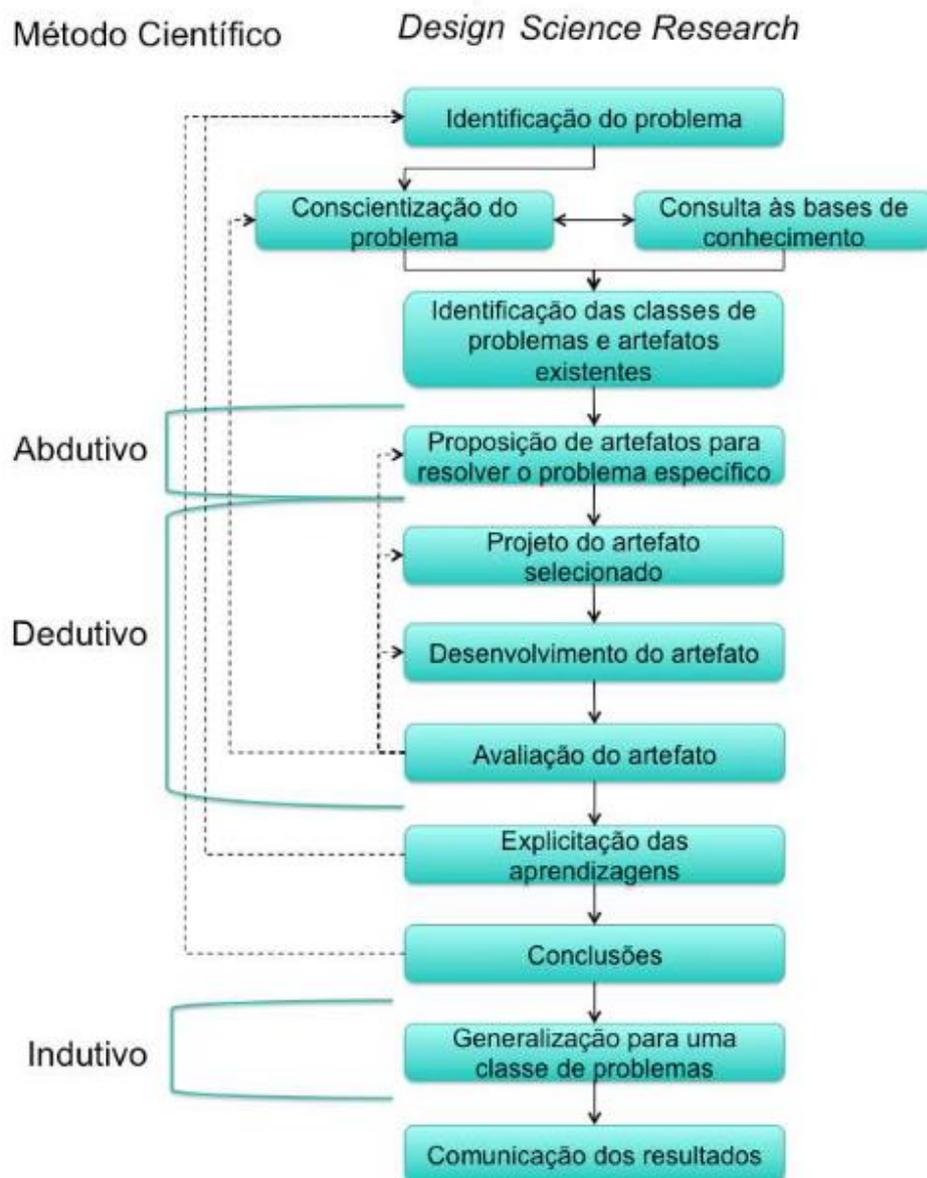
(fonte: DRESCH et al., 2015)

Dresch (2013) propõe um método para condução de trabalhos que aplicam a *Design Science Research* que aplica as abordagens científicas abduativas, dedutivas e indutivas. Vale

ressaltar que abordagens abduativas sugerem o que pode ser, dedutivas afirmam o que deve ser e indutivas afirmam a partir do que é (DRESCH et al., 2015).

Tendo em vista que o presente estudo se baseia nos princípios do *Design Science Research*, os procedimentos metodológicos utilizados para o desenvolvimento do método proposto foram conduzidos de forma muito semelhante ao postulado por Dresch (2013) na Figura 9 apresentada a seguir.

Figura 9 – Método para condução de estudos que usam a *Design Science Research*



(fonte: DRESCH, 2013)

Após a identificação do problema de pesquisa, foi realizada a revisão sistemática da literatura, conduzida conforme descrito previamente. As informações levantadas na revisão sistemática permitiram uma melhor conscientização do problema, bem como serviram como subsídio para todas as etapas seguintes do trabalho.

Como resultado direto da revisão sistemática da literatura foram identificados os pormenores dos artefatos existentes semelhantes ao conceito inicial do método que se desejava desenvolver. Esses resultados foram muito úteis para refinar a versão preliminar do método concebido com o intuito de cobrir as limitações e atingir o potencial não desenvolvido dos artefatos semelhantes existentes.

Para tanto, foi construída a classe de problema acerca do tema de pesquisa conforme apresentado na Figura 10. Dresch et al. (2015), apontam que as classes de problemas não existem, sendo sempre necessário criá-las através do esforço intelectual de pesquisadores. A classe de problemas dessa pesquisa é de análise de problemas e apoio à tomada de decisão sobre seleção de alternativas de *retrofit* de sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado de edificações.

Figura 10 – Lógica para construção de classes de problemas



(fonte: DRESCH et al., 2015; LACERDA, et al. 2013)

Também baseado nas informações coletadas na revisão sistemática da literatura, o método proposto foi projetado e desenvolvido. Conforme Dresch et al. (2015) existem diversos métodos e técnicas para avaliação de artefatos oriundos do *Design Science Research*, entre eles a avaliação analítica na qual o artefato é avaliado quanto a sua arquitetura interna e maneira de interação com o ambiente externo. Segundo esses autores, nesse tipo de validação, o principal objetivo é avaliar o desempenho do artefato, bem como quanto ele consegue melhorar o sistema estudado quando agregado a ele.

De acordo com Hevner e Chatterjee (2010), como diretriz para avaliação de artefatos do *Design Science Research*, é necessário demonstrar a utilidade, qualidade e eficácia do artefato no contexto no qual esse é introduzido. Segundo Pimentel et al. (2020), a avaliação de artefatos do *Design Science Research* deve analisar se o artefato desenvolvido resolve satisfatoriamente um problema em um dado contexto, satisfazendo adequadamente requisitos e corroborando conjecturas teóricas. Os autores apontam que pesquisadores devem decidir quais dispositivos e instrumentos são mais adequados para realizar as investigações empíricas necessárias para a validação de artefatos. Para tanto, ainda segundo Pimentel et al. (2020), pesquisadores podem utilizar diversas técnicas, tais como questionários, entrevistas, grupos focais, observação direta, entre outras.

Entrevistas de validação com especialistas em trabalhos de *Design Science Research* podem contribuir tanto para avaliação quanto para ajustes e consolidação de artefatos (SILVA, 2013; GASPARETO, 2018; SILVA et al., 2016; PIMENTEL et al., 2020). Sendo assim, para validação do artefato desenvolvido foram realizadas entrevistas com profissionais especialistas e/ou com experiência prévia de trabalho na área de sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado de edificações, eficiência energética, qualidade do ambiente interno e *retrofit* de edificações. O processo de amostragem dos profissionais que auxiliaram na terceira etapa do trabalho foi não-probabilístico intencional no qual o pesquisador seleciona como população, fontes que julga serem adequadas para adquirir a informação desejada. (OLIVEIRA, 2001). A escolha deste método de amostragem está fundamentada no fato de que a informação que se procura obter é de caráter técnico e específico.

Sendo assim, a seleção intencional de especialistas constitui um critério razoável de julgamento e que tende a chegar a resultados favoráveis. (OLIVEIRA, 2001). As entrevistas foram conduzidas de forma semiestruturada e conforme roteiro desenvolvido previamente. A documentação das entrevistas foi realizada através de gravações, anotações e transcrições. (CRESWELL, 2010). As entrevistas com especialistas da área de sistemas condicionadores de ar de edificações além de validar o artefato também foram essenciais para o refinamento do método proposto, transformando a versão preliminar na versão final.

Após a avaliação do método concebido, as aprendizagens ao longo de toda a pesquisa foram explicitadas, as conclusões do estudo foram desenvolvidas e generalizadas para a classe de problemas descrita previamente. Por fim, a presente dissertação de mestrado comunica os resultados obtidos durante a condução da pesquisa.

Os procedimentos metodológicos descritos foram desenvolvidos em quatro etapas distintas. Na primeira etapa, foi realizado um levantamento dos elementos chave para o processo decisório de seleção de alternativas de *retrofit* energético de sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (AVAC) para diferentes tipologias de edificação através de uma revisão sistemática da literatura.

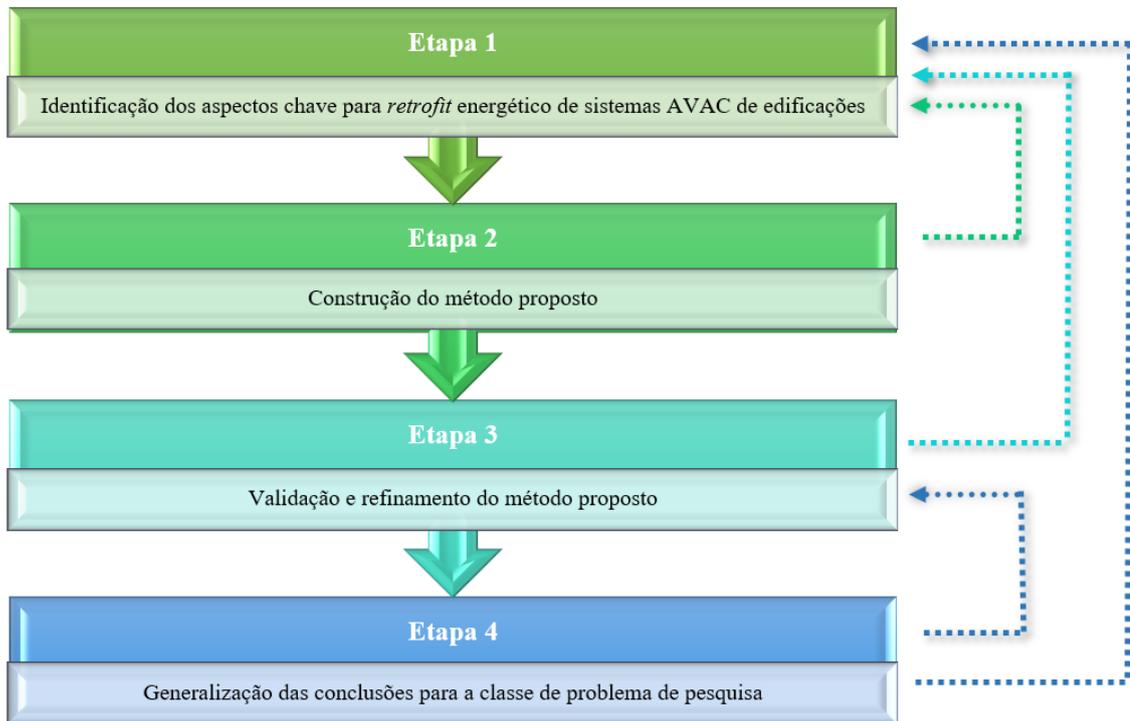
Ainda na primeira etapa e com base nos resultados da revisão sistemática da literatura, também foram identificadas as principais alternativas desse tipo de *retrofit* passíveis de implementação em diferentes tipologias de edificação, tais como prédios educacionais, escritórios, hospitais, hotéis, varejo, entre outros. O levantamento das principais alternativas para *retrofit* de sistemas condicionadores de ar de edificações serviu como subsídio para a criação de um Banco de Alternativas de *retrofit* que pode auxiliar tomadores de decisão menos experientes a escolher quais soluções incluir na análise.

Na segunda etapa da pesquisa, foi concebida a versão preliminar do método proposto para seleção de alternativas de *retrofit* energético de sistemas de condicionamento de ar de edificações. A versão preliminar do método desenvolvido identificou os critérios chave para seleção de possíveis alternativas de *retrofit* conforme as dimensões econômica, ambiental, social e tecnologia.

Na terceira etapa foi realizada a validação da versão preliminar do método desenvolvido, bem como dos elementos chave que regem o processo decisório de seleção de alternativas de *retrofit* de sistemas de AVAC de edificações considerados nela. Com base nos resultados da validação, ainda na terceira etapa, a versão preliminar do método concebido foi refinada na versão final do método proposto.

Na quarta etapa, foram explicitadas as aprendizagens ao longo de toda a pesquisa e com base nelas foram elaboradas as conclusões do estudo. A Figura 11 a seguir representa como as etapas de trabalho, descritas previamente, se relacionam entre si, inclusive quanto às iterações características de pesquisas fundamentadas nos princípios do *Design Science Research* (DSR). Nessa esteira, o Quadro 3, também apresentado a seguir, relaciona as etapas da pesquisa com seus respectivos resultados, bem como os métodos utilizados para obtê-los.

Figura 11 – Diagrama indicativo de como as etapas se relacionam entre si.



(fonte: elaborada pela autora)

Quadro 3 – Estrutura do trabalho proposto

Etapa	Método	Resultados
Etapa 1: Identificação dos aspectos chave para <i>retrofit</i> energético de sistemas condicionadores de ar de edificações	Revisão Sistemática da Literatura;	Levantamento dos elementos chave do processo decisório para seleção de alternativas de <i>retrofit</i> energético de diferentes tipologias de edificação. Determinação das dimensões de critérios a serem consideradas no artefato.
Etapa 2: Criação do método proposto	Aplicação das aprendizagens obtidas na etapa anterior	Versão preliminar do método proposto para seleção de alternativas de <i>retrofit</i> energético de sistemas condicionadores de ar de edificações. Elaboração do roteiro semiestruturado para entrevistas
Etapa 3: Validação e refinamento do método proposto	Condução de entrevistas com especialistas e público-alvo do estudo	Versão final do método proposto para seleção de alternativas de <i>retrofit</i> energético de sistemas condicionadores de ar de edificações
Etapa 4: Generalização das conclusões para a classe de problema de pesquisa	Revisão e explicitação das aprendizagens ao longo de todas as etapas da pesquisa	Generalização das conclusões para a classe de problema estudada. Elaboração das conclusões, considerações finais, contribuições e possibilidades de continuação do estudo. Comunicação dos resultados da pesquisa

(fonte: elaborada pela autora)