

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Ruane Fernandes de Magalhães

**O GERENCIAMENTO DE *TRADE-OFFS* PARA
INTEGRAÇÃO DE SUSTENTABILIDADE E DE
RESILIÊNCIA NA TRANSIÇÃO PARA ECONOMIAS
URBANAS DE BAIXO CARBONO**

Porto Alegre

2022

Ruane Fernandes de Magalhães

**O gerenciamento de *trade-offs* para integração de sustentabilidade e de resiliência
na transição para economias urbanas de baixo carbono**

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia, modalidade Acadêmica, na área de concentração em Sistemas de Produção.

Orientadora: Prof^ª. Márcia Elisa Soares Echeveste, Dra.
Co-Orientadora: Prof^ª. Ângela de Moura Ferreira Danilevicz, Dra.

Porto Alegre

2022

Ruane Fernandes de Magalhães

**O gerenciamento de *trade-offs* para integração de sustentabilidade e de resiliência
na transição para economias urbanas de baixo carbono**

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia na modalidade Acadêmica e aprovada em sua forma final pelos Orientadores e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof^ª. Dr^ª. Márcia Elisa Soares Echeveste
Orientadora PPGEP/UFRGS

Prof^ª. Dr^ª. Ângela de Moura Ferreira Danilevicz
Co-Orientadora PPGCI/UFRGS

Prof. Dr. Alejandro Germán Frank
Coordenador PPGEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Prof^ª. Dr^ª. Daniela Pigosso (Technical University of Denmark - DTU)

Prof^ª. Dr^ª. Juliana Klas (Departamento Interdisciplinar/UFRGS)

Prof^ª. Dr^ª. Ana Passuello (PPGCI/UFRGS)

Dedicatória

A todos os professores, que constroem
todos os dias, um mundo melhor, por
meio da educação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família que, em mais esse tempo, foi o alicerce para os momentos bons e os nem tão bons assim, que, acreditam sempre em mim e, apesar de todos os tropeços, me incentivam, todos os dias, a ser uma pessoa melhor.

Agradeço ao Lidiomar por todo amor, compreensão e paciência, que, em toda a jornada deste doutorado, esteve ao meu lado, incentivando, apoiando, sofrendo e vivendo alegrias acadêmicas ao meu lado.

Agradeço ao PPGEP e aos fantásticos professores que encontrei no caminho, por todas as oportunidades, ensinamentos, amparos e incentivos.

Agradeço aos colegas da SUINFRA UFRGS que disponibilizaram seu tempo e seu conhecimento para auxiliar no desbravamento do tema desta tese, Eng Edy Isaías Junior, Eng^a. Magda Elkfury, Eng. Eduardo Wilges, e Eng^a. Camila Simonetti.

Agradeço aos coautores dos artigos desta tese, que dividiram comigo seu conhecimento, e me incentivaram a não desanimar, mesmo diante de muitos desafios. Obrigada, especialmente, às Prof^{as}. Joana Siqueira de Souza, Ana Passuello e Juliana Klas por todo o carinho e conhecimento compartilhado. Vocês são inspiração!

Agradeço aos colegas dos grupos de pesquisa NIS e Life Sustainability, os quais foram fundamentais em seu apoio, união e compartilhamento. Agradeço especialmente ao Fernando Henrique Lermen que, mais do que colega pesquisador, se tornou um grande amigo, apoiador e companheiro, mesmo nas horas mais difíceis. Obrigada por tudo, Fer.

Agradeço às minhas amigas de vida Camila Rosa de Moura, Fabiana Maliszewski, Helena Szortika Quadros e Andrea Loguercio por serem minhas maiores incentivadoras, por acreditarem tanto em mim. Esta tese não existiria sem vocês.

Agradeço às minhas orientadoras, Prof^a Marcia Echeveste e Ângela Danilevicz por terem estado comigo nessa jornada tão incrível, compartilhando conhecimento, apoio e acolhimento. Obrigada, Prof^a Ângela, por ser tão importante na minha vida, por me ajudar a construir minha vida acadêmica; por não desistir de mim, por me ajudar a seguir, mesmo quando as coisas não estão bem. Obrigada de coração pela pessoa que és e por fazer parte da minha vida.

Mudar o mundo, meu amigo Sancho, não é loucura,
não é utopia, é justiça.

Miguel de Cervantes

RESUMO

Os crescentes efeitos das mudanças climáticas, desencadeados, principalmente, pelas atividades humanas, representam desafios relevantes para a gestão do ambiente urbano, demandando alterações profundas em seu planejamento. Nesse sentido, as infraestruturas urbanas estratégicas, como aquelas associadas ao fornecimento de água e de energia elétrica, podem, por um lado, ser responsáveis por intensos efeitos de mudanças climáticas, e, por outro, desempenhar papel fundamental como agentes de adaptação e mitigação às alterações do clima. Por isso, a gestão dessa infraestrutura, com foco sobre a ação climática, pode se constituir em um importante desafio para gestores e formuladores de políticas públicas. Esse desafio se torna ainda mais relevante quando considerados os altos níveis de complexidade do ambiente urbano, abrangendo a necessidade da consideração de múltiplos fatores, os quais podem se apresentar como complementares ou até mesmo conflitantes. Assim sendo, este estudo tem como objetivo desenvolver uma abordagem metodológica para o adequado gerenciamento de *trade-offs* de sustentabilidade e de resiliência urbana, como apoio ao planejamento à transição para economias de baixo carbono. Para tanto, são empregadas três etapas metodológicas, aprofundando o conhecimento acerca do gerenciamento de *trade-offs* sustentáveis e resilientes para o processo decisório. A etapa inicial da pesquisa é baseada em abordagens mistas, para exploração do tema, a partir da análise do gerenciamento de *trade-offs* de sustentabilidade em projetos complexos. Essa análise é conduzida com o auxílio de métodos multicritério, considerando a participação de especialistas. Na etapa intermediária, os *trade-offs* de sustentabilidade são investigados de forma mais aprofundada, com a aplicação de técnicas de avaliação do ciclo de vida em sistemas elétricos urbanos, os quais se constituem em elementos relevantes para o processo de transição energética. Por sua vez, a etapa avançada integra *trade-offs* de sustentabilidade e de resiliência, a partir de métodos quantitativos de avaliação do ciclo de vida e de capacidade de geração das fontes energéticas. Os resultados da pesquisa demonstram a complexidade do processo decisório para o planejamento de economias de baixo carbono, tendo em vista a diversidade de fatores a serem equilibrados no gerenciamento de *trade-offs*. No entanto, esses resultados destacam o potencial de complementaridade de tais fatores, evidenciando que as escolhas realizadas pelos gestores devem ser capazes de considerar características locais, tanto para minimização de efeitos climáticos negativos quanto para adaptação da infraestrutura das cidades frente aos riscos climáticos. Assim, os principais achados conduzem ao entendimento de que os conceitos de sustentabilidade e de resiliência não podem ser abordados de forma segregada, para o efetivo planejamento de transições para baixo carbono. Isso porque estratégias de resiliência que potencializem impactos ambientais e econômicos atuam retroalimentando os efeitos de mudanças climáticas, ampliando, assim, o problema principal a ser gerenciado. Nesse sentido, o estudo destaca a importância das escolhas das organizações, em soluções de fornecimento de energia elétrica, como agentes motores da transição energética, baseada no fomento a energias renováveis. A partir do alinhamento dessas escolhas ao planejamento das políticas públicas energéticas, é possível tornar mais efetivos os planos de transição para baixo carbono, obtendo, assim, importantes avanços na ação climática dos diferentes territórios.

Palavras-chave: Sustentabilidade Urbana; Resiliência Urbana; Transição para baixo carbono; Avaliação do Ciclo de Vida (ACV); Gerenciamento de *Trade-offs*; Planejamento energético sustentável.

ABSTRACT

The growing climate change effects, triggered mainly by human activities, represent relevant challenges for urban environment management, demanding profound changes in its planning. In this sense, critical urban infrastructures, such as those associated with the supply of water and electricity, can, on the one hand, be responsible for intense climate change effects and, on the other hand, play a fundamental role as agents of adaptation and mitigation to climate change. Therefore, the management of this infrastructure, focusing on climate action, can be a relevant challenge for managers and policymakers. This challenge becomes even more relevant when considering the high complexity levels of the urban environment, including the need to consider multiple factors, which can be complementary or even conflicting. Hence, this study aims to develop a methodological approach for the adequate management of sustainability and urban resilience trade-offs to support planning the transition to low-carbon economies. To this end, three methodological steps are used, deepening the knowledge about the management of sustainable and resilient trade-offs for the decision-making process. The initial stage is based on mixed approaches to explore the thematic, analyzing sustainability trade-offs in complex projects. This analysis is conducted from multi-criteria methods, considering the experts' involvement. In the intermediate stage, sustainability trade-offs are investigated more deeply, applying life cycle assessment techniques in urban electrical systems, which constitute relevant elements for the energy transition process. In turn, the advanced stage integrates sustainability and resilience trade-offs based on quantitative methods of Life Cycle Assessment and generation capacity of the energy sources. The research results demonstrate the complexity of the decision-making process for planning low-carbon economies, given the diversity of factors to be balanced in managing trade-offs. However, these results highlight the potential for complementarity of such factors, evidencing that the choices made by managers must be able to consider local characteristics, both to minimize negative climatic effects and to adapt cities' infrastructure to climate risks. Accordingly, the main findings lead to the understanding that the concepts of sustainability and resilience cannot be approached in a segregated way for the effective planning of low-carbon transitions. That is because resilience strategies that potentiate environmental and economic impacts act by feeding back the effects of climate change, expanding the main problem to be managed. In this sense, the study highlights the importance of the organizations' choices, in electricity solutions, as driving agents of the energy transition, based on the promotion of renewable energies. From the alignment of these choices to the planning of energy policies, it is possible to make the low-carbon transition plans more effective, obtaining relevant advances in climate action in different territories.

Keywords: Urban Sustainability; Urban Resilience; Low-carbon transitions; Life Cycle Assessment (LCA); Trade-offs Management; Sustainable Energy Planning.

LISTA DE FIGURAS

1 INTRODUÇÃO

Figura 1.1 – Etapas do método de pesquisa	22
Figura 1.2 – Estrutura da tese	27

2 ARTIGO 1

Figura 2.1 – Ferramenta para tomada de decisão em <i>trade-offs</i> de projetos sustentáveis - TODeM	44
Figura 2.2 – Aspectos aceitáveis e negociáveis no gerenciamento de <i>trade-offs</i>	47
Figura 2.3 – Matrizes de Probabilidade	53
Figura 2.4 – Matrizes de Impacto	53

LISTA DE TABELAS

2 ARTIGO 1

Tabela 2.1 – Diretrizes para o gerenciamento de <i>trade-offs</i>	46
Tabela 2.2 – Escala para priorização dos objetivos	52
Tabela 2.3 – Priorização dos objetivos e critérios de sustentabilidade	54
Tabela 2.4 – Planilha para operacionalização do gerenciamento de <i>trade-offs</i>	56

LISTA DE SIGLAS

AHP – *Analytical Hierarchy Process*

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BEN – Balanço Energético Nacional

BIM – *Building Information Modeling*

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

BSC – *Balanced Scorecard*

COP26 – *Conference of Parties 26*

DCO – Depleção da Camada de Ozônio

EPA – *Environmental Protection Agency*

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

GBM – *Green Building Materials*

GC – Geração Centralizada

GD – Geração Distribuída

GTP – *Global Temperature Potential*

GWP – *Global Warming Potential*

IC – Índice de Consistência

ICG – Índice de Capacidade de Geração

ICV – Análise de Inventário do Ciclo de Vida

IEA – *International Energy Agency*

IPCA – Índice de Preços para o Consumidor Amplo

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*

ISO – *International Organization for Standardization*

LCA – *Life Cycle Assessment*

LCC – *Life Cycle Costing*

LCIA – *Life Cycle Impact Assessment*

LCM – *Life Cycle Management*

LEED – *Leadership in Energy and Environmental Design*

MAUT – *Multi-Attribute Utility Theory*

MCDA – *Multi Criteria Decision Analysis*

ODS – Objetivo do Desenvolvimento Sustentável

ONS – Operador Nacional do Sistema

ONU – Organização das Nações Unidas

PIB – Produto Interno Bruto

PMI – *Project Management Institute*

PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

SIN – Sistema Interligado Nacional

SINAPI – Sistema Nacional de Preços da Construção Civil

TODeM – *Trade-off Decision-Making tool*

VP – Valor Presente

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Tema e justificativa do tema	18
1.2 Objetivos da Pesquisa	21
1.3 Procedimentos metodológicos adotados	22
1.4 Delimitações da pesquisa	25
1.5 Estrutura da tese	26
Referências	29
2 ARTIGO 1: GERENCIANDO <i>TRADE-OFFS</i> EM CENÁRIOS COMPLEXOS: UMA FERRAMENTA DE TOMADA DE DECISÃO PARA PROJETOS SUSTENTÁVEIS	35
2.1 Introdução	36
2.2 Background teórico	38
2.2.1 Sustentabilidade na gestão de projetos	38
2.2.2 Tomada de decisão em cenários complexos	40
2.3 Ferramenta para o processo decisório de <i>trade-offs</i> em projetos de sustentabilidade	43
2.3.1 Diretrizes para o gerenciamento de <i>trade-offs</i>	45
2.3.1.1 Grupo 1 – Decisões Iniciais	45
2.3.1.2 Grupo 2 – Aspectos aceitáveis e negociáveis	45
2.3.1.3 Grupo 3 – Suporte ao processo decisório	47
2.3.2 Análises dos <i>trade-offs</i> de projeto	48
2.3.2.1 Análise #1 – Etapas de projeto relacionadas aos critérios de sustentabilidade	48
2.3.2.2 Análise #2 – Etapas de ocorrência dos <i>trade-offs</i>	49
2.3.2.3 Análise #3 – Importância relativa dos critérios sustentáveis	49
2.3.2.4 Análise #4 – Relações fortes entre requisitos sustentáveis e critérios sustentáveis	49
2.3.2.5 Análise #5 – Relações entre critérios sustentáveis e requisitos estratégicos	50
2.3.3 Operacionalização do gerenciamento de <i>trade-offs</i>	50
2.3.3.1 Escopo e objetivos de projeto	51
2.3.3.2 Identificação de <i>Trade-offs</i>	51
2.3.3.3 Planilha para operacionalização do gerenciamento de <i>trade-offs</i>	52
2.3.3.4 Seleção e justificativa	57

2.4 Discussões	58
2.4.1 Modelos de <i>trade-offs</i> existentes para o processo decisório.....	58
2.4.2 Tratando <i>trade-offs</i> de sustentabilidade	59
2.4.3 Contribuições da TODeM	62
2.5 Considerações Finais	63
Referências	64
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
3.1 Contribuições teóricas e gerenciais	73
3.2 Limitações e sugestões para trabalhos futuros	75

1. INTRODUÇÃO

Os efeitos das mudanças climáticas têm se intensificado nas últimas décadas, demandando alterações profundas de paradigmas em processos produtivos, na oferta de serviços e em estratégias de gestão. Por esse motivo, a emergência climática tem provocado discussões acerca da necessidade de mudanças na política econômica mundial (UNFCCC, 2021), as quais foram discutidas na *Conference of Parties 26* (COP26), com a regulamentação do Mercado Global de Carbono (United Nations, 2015). Tais discussões se tornam ainda mais relevantes, a partir da compreensão de que estratégias econômicas adotadas em âmbitos regionais podem ter consequências globais para o clima (Gonçalves et al., 2022). Por conseguinte, há a premência de que o planejamento para ação climática seja embasado por métodos abrangentes, capazes de considerar fatores complementares, ou ainda conflitantes, do espaço urbano (Zhang et al., 2016; Ali-Toudert et al., 2017). Por sua vez, a seleção e a adoção de estratégias voltadas ao combate de mudanças climáticas podem representar um relevante desafio a gestores e formuladores de políticas, devido à necessidade de equilíbrio entre elementos de sustentabilidade ambiental, econômica e de adaptação climática (Eekhout; de Vente, 2019; Hurlimann et al., 2021).

Esse desafio pode se apresentar ainda mais complexo para a gestão e o planejamento de infraestruturas estratégicas para as cidades (Salimi; Al-Ghamd, 2020; Ramyar et al., 2021). As infraestruturas estratégicas, tais como o fornecimento de energia elétrica e de água, possuem papel fundamental para o desenvolvimento econômico e social das regiões, proporcionando acesso das populações a serviços básicos (Urlainis et al., 2022). Nesse sentido, a infraestrutura de fornecimento de energia elétrica, por um lado, desempenha importante papel enquanto impulsionadora de desenvolvimento econômico, relacionada ao crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) dos países (de Carvalho et al., 2015). Por outro lado, é responsável por intensos impactos ambientais (Volkart et al., 2018), devidos, principalmente, à etapa de geração e de uso da energia elétrica (Igos et al., 2015). O entendimento dos potenciais impactos desencadeados pelas fontes energéticas, embora se constitua de uma problemática ambiental global, também pode conduzir a importantes oportunidades para ação climática, por meio da transição energética (Bompard et al., 2020).

A transição energética, em que o planejamento energético busca impulsionar o uso de fontes renováveis (de Faria Jr et al., 2017), tem tomado espaço em discussões internacionais acerca do alcance das metas de manutenção da temperatura global, estabelecidas no Acordo de Paris. Isso se deve à relevância do uso extensivo de fontes fósseis para as mudanças climáticas, não só devido ao potencial de impactos ambientais, mas pelas relações de dependência de diferentes economias a essas fontes (Dyrstad et al., 2019). Assim, o planejamento para transição energética exige mudanças em processos decisórios consolidados, os quais reflitam em estratégias alinhadas aos planos energéticos de transição ao uso das fontes. Embora possuam um objetivo global, essas mudanças estão vinculadas a características regionais dos territórios, suas potencialidades de geração de energia elétrica, seus padrões de consumo, bem como ao quanto esses territórios estão vulneráveis aos efeitos de mudanças climáticas (Fortes et al., 2022). Nesse sentido, a transição energética não apenas se conecta a maiores níveis de sustentabilidade ambiental, mas ainda pode contribuir para que as comunidades se tornem mais resilientes às alterações no clima (United Nations, 2015a). Isso porque as mudanças em padrões climáticos afetam diretamente a produção de energia advinda de fontes renováveis (Wang et al., 2020), ao desencadear alterações em regimes de chuvas, períodos de secas prolongadas e aumento da temperatura global (IPCC, 2021). No entanto, frequentemente, a transição energética é relacionada unicamente a aspectos decisórios sustentáveis, havendo importantes lacunas de conhecimento associadas a seu papel para a construção da resiliência urbana (Nik et al., 2021). As lacunas na investigação conjunta dos conceitos de sustentabilidade e de resiliência podem conduzir a decisões fragmentadas, em que estratégias para adaptação resiliente podem, inclusive, retroalimentar os efeitos de mudanças climáticas. Logo, o planejamento para transição energética deve ser capaz de considerar aspectos interdisciplinares, conectando decisões relacionadas à oferta e à demanda de energia elétrica, bem como considerando os efeitos dinâmicos dessas decisões.

O tratamento de conceitos diversos induz maior complexidade ao processo decisório, uma vez que esse passe a incluir fatores múltiplos, sobrepostos, ou ainda contrários, exigindo que as abordagens empregadas sejam capazes de proporcionar um equilíbrio em sua ponderação (Zhang et al., 2016). Esse equilíbrio pode ser obtido a partir do adequado gerenciamento de *trade-offs*, em que soluções de compromisso orientam as decisões, de forma que essas expressem tanto o atendimento a requisitos relevantes aos

decisores quanto os objetivos a serem alcançados no processo decisório (Morrison-Saunders; Pope, 2013). Assim, no planejamento para transição energética, o gerenciamento de *trade-offs* pode ser relevante para a investigação das relações entre fatores sustentáveis, tendo em vista que, em diversos casos, elementos de sustentabilidade ambiental e econômica apresentam comportamentos conflitantes (Gibson, 2006). Ao incluir a análise de fatores resilientes, a necessidade por esse equilíbrio é expandida, não apenas para ampliar a compreensão teórica integrada desses conceitos, mas ainda como mecanismo decisório de gestores e formuladores de políticas públicas. Isso porque a escolha gerencial pelo uso de diferentes fontes energéticas pode se relacionar ao fomento concedido a essas fontes, por meio de políticas energéticas, as quais possam guiar a ação climática regional (Marques et al., 2019; Pablo-Romero et al., 2021).

Por conseguinte, neste estudo, entende-se que estratégias para o fortalecimento da resiliência devem ser apresentar, em primeiro lugar, com caráter sustentável, de modo que tais conceitos estejam completamente integrados ao processo decisório. Embora essa visão adicione complexidade ao planejamento da adoção de soluções de infraestrutura, também contribui para que as consequências das decisões possam ser consideradas de forma mais ampla. Para tal, é premente o desenvolvimento de avaliações estruturadas, ponderando características e potencialidades regionais para o planejamento energético urbano (Bradshaw; Jannuzzi, 2019).

1.1 Tema e justificativa do tema

As características do ambiente urbano podem torná-lo altamente vulnerável aos efeitos de mudanças climáticas. Essa vulnerabilidade está relacionada, principalmente, às interdependências entre os subsistemas de infraestrutura (Pandit et al., 2017), bem como à atuação dessa infraestrutura frente às mudanças do clima (Yuan et al., 2017). No entanto, tendo em vista a importância das funções das cidades para o desenvolvimento socioeconômico, essas são o território em que uma mudança de paradigmas, para redução de impactos ambientais globais, é possível (Leite; Awad, 2014). Essa afirmação vai ao encontro dos planos para ação climática, desenvolvidos por países como Reino Unido (UK Government, 2021) e Estados Unidos (EPA, 2021). Nesses planos, as principais estratégias de adaptação e de resposta à mudança climática têm como foco alterações relevantes em padrões de uso de recursos no ambiente urbano, como de fontes energéticas fósseis, tanto para transporte quanto para a geração de eletricidade.

Nesse sentido, a transição energética se apresenta como um dos temas mais promissores para condução de uma nova ordem econômica mundial, voltada à ação climática (Hafner et al., 2020). A transição energética não se constitui de um simples mecanismo decisório, uma vez que altera, de forma relevante, padrões de produção industrial, estratégias de desenvolvimento econômico e de planejamento da infraestrutura urbana (Tian et al., in press). Devido à diversidade de interconexões, a transição energética tem sido abordada sob diferentes pontos de vista na literatura, de forma ampla e interdisciplinar. Diversos estudos relacionam transição energética a temáticas de *Carbon Sequestration* (Ashworth et al., 2019); financiamentos de baixo carbono (Geddes et al., 2018; Barron; McJeon, 2019); modelos econômicos em mercados de carbono neutro (Desgain; Haselip, 2015; Cetkovic; Buzogany, 2016; McPherson et al., 2018); governança ética (Mabon et al., 2015); inovação e tecnologia (Anderson; Winne, 2007; Nordensvard; Urban, 2015; Ulsrud et al., 2018); justiça climática (Baker, 2019; Dong et al., 2021); e, principalmente, a planos de políticas públicas energéticas (Hak et al., 2017; Ahmed et al., 2020; Fragkos et al., 2021). Embora apresentem ampla inter-relação, essas temáticas são, frequentemente, abordadas, pelos autores, sob o ponto de vista de sustentabilidade, ou sob a ótica da resiliência, de forma isolada (Solecki et al., 2019).

Tendo em vista o alto nível de complexidade dos sistemas urbanos, a inclusão de sustentabilidade no planejamento de projetos e de planos integrados, nesses territórios, pode enfrentar diversas barreiras. Esse planejamento torna-se ainda mais desafiador quando consideradas as incertezas relacionadas aos efeitos de mudanças climáticas sobre o desempenho das soluções adotadas (Perera et al., 2021). Por esse motivo, os mecanismos empregados para avaliação de sustentabilidade, em cenários complexos, devem ser capazes de considerar efeitos dinâmicos das decisões (Sánchez, 2015), orientando a adaptação do processo decisório frente a mudanças inesperadas. De forma a apoiar o planejamento sistêmico da infraestrutura, a partir da consideração de diferentes características urbanas, a aplicação de *Life Cycle Management* (LCM) pode ser considerada uma abordagem efetiva e adequada (Tsang et al., 2014). Isso porque a LCM integra avaliações relacionadas aos três pilares de sustentabilidade (ambiental, social e econômico), considerando os diferentes estágios do ciclo de vida de processos, produtos e serviços (Sonnemann et al., 2015). Nessa abordagem, as técnicas para avaliação ambiental (*Life Cycle Assessment* (LCA)) e econômica (*Life Cycle Costing*

(LCC)) do ciclo de vida são apoiadas em métodos quantitativos e comparativos de cenários, identificando funções e elementos determinantes para redução de impactos negativos ao meio ambiente, com adequado equilíbrio econômico (Loiseau et al., 2014; Mazzi et al., 2017). Assim, os resultados obtidos, a partir da aplicação dessas técnicas, podem orientar o processo decisório para o planejamento da transição energética, uma vez que não se destinam à entrega de uma solução ótima para os problemas explorados. Em vez disso, buscam auxiliar a escolha por opções equilibradas, que induzam menores impactos ambientais e ampliem a viabilidade das soluções (Zanghelini et al., 2018). Apesar de sua relevância, para Jones et al. (2017), a modelagem de cenários e a combinação de abordagens ambientais e econômicas, na prática, é ainda uma área de conhecimento a ser explorada em sistemas energéticos.

A transição energética pode ainda ser entendida como um importante mecanismo para a construção da resiliência urbana, conforme discutem Solecki et al. (2019). Isso se deve ao fato de que a resiliência urbana se reflete em uma abordagem abrangente, capaz de considerar fatores climáticos, sociais, econômicos e ambientais, no planejamento do ambiente urbano. Para Ahern (2011), a resiliência aborda uma nova forma de pensar a sustentabilidade, a partir de um conceito mais estratégico do que normativo. Para o autor, a resiliência está necessariamente relacionada à sustentabilidade, de forma dinâmica, tendo em vista que condições estáticas não são capazes de se manter sustentáveis, em contextos de distúrbios e de mudanças inesperadas. Por isso, a resiliência urbana é concebida como a habilidade dos sistemas em se adaptar a choques inesperados, transformando-se, a fim de manter seu estado funcional (Meerow et al., 2016). Logo, Alberti (2016) entende que a resiliência urbana provê a amplitude de estabilidade dos sistemas, de forma que esses possam flutuar e se adaptar, absorvendo perturbações, frente aos riscos climáticos. Nesse contexto, a infraestrutura elétrica urbana, apesar de ser amplamente afetada pelos riscos climáticos (Lammers et al., 2020; Wang et al., 2020), também desempenha papel fundamental como *driver* para construção de estratégias de resiliência urbana (Serre; Heinzlef, 2018).

A integração dos conceitos de sustentabilidade e de resiliência denota o entendimento de que as soluções de infraestrutura urbana devem ser planejadas de tal forma a não induzir novos riscos climáticos ao ambiente urbano, devido aos seus próprios impactos ambientais associados. Por conseguinte, verifica-se a premência de que as relações entre sustentabilidade e resiliência urbana sejam investigadas, de maneira aprofundada,

especialmente em nível local (Meerow et al., 2016; Zhang; Li, 2018). Em um estágio mais avançado, é importante ainda compreender como essas relações podem ser geridas e fortalecidas por soluções inovadoras de infraestrutura (Dong et al., 2017). Assim, a compreensão ativa dessa área de conhecimento, em um caminho multidisciplinar, deve estar baseada em mediações estruturadas para o adequado gerenciamento de *trade-offs* (Nielsen et al., 2016), tanto entre elementos sustentáveis quanto entre esses elementos e os de resiliência.

O equilíbrio entre esses conceitos pode ser fortalecido pelo desenvolvimento de políticas públicas adequadas, tendo em vista que essas podem impulsionar a inovação e a escolha por soluções voltadas à ação climática. Por isso, no campo da infraestrutura energética, é relevante que os formuladores de políticas possam contar com mecanismos de análises estruturadas, considerando as características de uso e de geração da energia elétrica, bem como os efeitos das mudanças climáticas sobre fontes energéticas estratégicas (Jurasz et al., 2020). A partir de então, tais políticas podem orientar o processo decisório gerencial, a fim de que a infraestrutura elétrica urbana não apenas seja capaz de se adaptar às mudanças climáticas, mas ainda não retroalimente novos impactos ambientais ao espaço urbano. Nesse contexto, a tomada de decisão gerencial torna-se alinhada às diretrizes do Objetivo do Desenvolvimento Sustentável (ODS) nº 11, o qual busca o planejamento de cidades e de assentamentos humanos de maneira inclusiva, segura, resiliente e sustentável (ONU, 2015a). O ODS 11 aborda, além da construção da resiliência urbana, a relevância da redução dos impactos ambientais negativos, associados às diversas funções desempenhadas pelas cidades. Dessa forma, a investigação integrada desses conceitos torna-se fundamental para o desenvolvimento sustentável urbano.

1.2 Objetivos da Pesquisa

Como forma de contribuição ao campo de pesquisa apresentado, este estudo tem como objetivo principal desenvolver uma abordagem metodológica para o adequado gerenciamento de *trade-offs* de sustentabilidade e de resiliência urbana, como apoio ao planejamento à transição para economias de baixo carbono. A partir do objetivo principal, são desdobrados ainda três objetivos específicos:

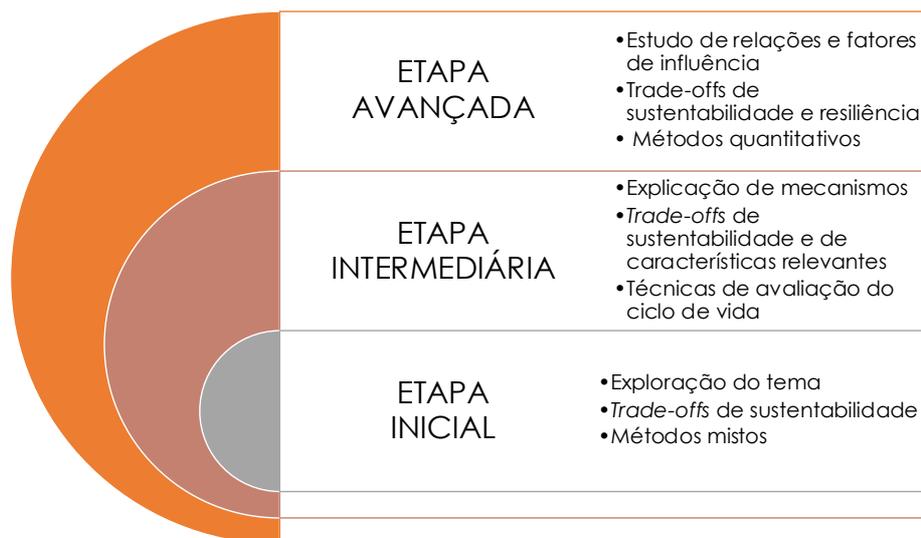
- Propor uma ferramenta de suporte ao gerenciamento de *trade-offs* no processo decisório de projetos complexos focados em sustentabilidade (desenvolvido no Artigo 1)

- Analisar a influência de escolhas organizacionais em fontes energéticas para a sustentabilidade urbana, baseado em técnicas comparativas de *Life Cycle Management* (desenvolvido no Artigo 2);
- Desenvolver um modelo para análise integrada de sustentabilidade e de resiliência urbana em sistemas de fornecimento de energia elétrica (desenvolvido no Artigo 3).

1.3 Procedimentos metodológicos adotados

A fim de ampliar o entendimento sobre a integração de sustentabilidade e de resiliência ao processo decisório, o método de pesquisa se desenvolveu em três principais etapas: (i) inicial, baseada em abordagens mistas; (ii) intermediária, com a aplicação de técnicas de avaliação do ciclo de vida; e (iii) avançada, empregando abordagens integradas quantitativas. O desenvolvimento de cada uma das etapas é apresentado na [Figura 1.1](#) e descrito a seguir.

Figura 1.1 – Etapas do método de pesquisa



Na etapa inicial, o estudo parte da exploração do tema e da problemática relacionada, a qual é identificada como lacuna de conhecimento por outros estudos, abordando os desafios para o gerenciamento de *trade-offs* em projetos com foco sustentável. Para tanto, foi realizado um estudo de teoria, voltado a mecanismos de apoio ao processo decisório projetual, os quais se destinam a orientar o atendimento de múltiplos objetivos sustentáveis, em cenários complexos. Esse estudo de teoria abordou métodos quali e quantitativos, propostos na literatura, investigando suas fraquezas e potencialidades, a partir de duas principais temáticas: (i) sustentabilidade no gerenciamento de projetos; e

(ii) processo de tomada de decisão em cenários complexos. Com a análise das teorias existentes, foi desenvolvida uma ferramenta de suporte ao gerenciamento de *trade-offs*, em projetos de sustentabilidade, a qual é constituída de três etapas: diretrizes para o gerenciamento de *trade-offs*, análise dos *trade-offs* de projeto e operacionalização do gerenciamento de *trade-offs*. As diretrizes e a análise de *trade-offs* foram baseadas em boas práticas expressas na literatura. Para operacionalização do gerenciamento de *trade-offs*, foi empregado, como estudo de caso, o processo decisório de um projeto não residencial, em área urbana, com vistas à obtenção da certificação internacional *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED). Para essa aplicação, foi utilizada análise de conteúdo e o método multicritério *Analytical Hierarchy Process* (AHP), para atribuição de importâncias aos diferentes objetivos sustentáveis de projeto. O estudo de caso possibilitou a análise da replicabilidade da ferramenta proposta, considerando cenários diversos para o gerenciamento de *trade-offs* de sustentabilidade. O caso estudado incluiu ainda fatores como a análise de eficiência energética do projeto, de forma a ampliar a compreensão de estratégias de demanda para a transição energética.

Na etapa intermediária, a pesquisa foi baseada em técnicas de avaliação ambiental e econômica do ciclo de vida, proporcionando uma investigação abrangente dos *trade-offs* existentes em projetos elétricos urbanos. Dessa forma, buscou-se apoiar a formulação de políticas públicas regionais, considerando o papel das diferentes fontes energéticas para a sustentabilidade urbana. Assim, na etapa intermediária, foi realizada a construção de teoria, a qual amplia a compreensão de como os conjuntos de dados analisados podem ser empregados por gestores e por formuladores de políticas, contribuindo com estratégias de transição para economias de baixo carbono. Para tal, foram construídos oito cenários de fornecimento de energia elétrica, os quais refeltem diferentes possibilidades de combinações de fontes no mix energético de uma organização, a partir de sua participação no Mercado Livre de Energia Elétrica (mercado não regulado). Esses cenários foram avaliados pelas técnicas *Life Cycle Assessment* (LCA) e *Life Cycle Costing* (LCC), considerando análises de incertezas dos dados obtidos. As análises de propagação de incertezas, conduzidas por simulações de Monte Carlo, foram realizadas com a finalidade de fornecer subsídios mais robustos à tomada de decisão gerencial, tendo em vista a alta complexidade dessas avaliações em condições de mudanças climáticas. De forma complementar, foram analisados ainda os padrões de

disponibilidade das fontes energéticas empregadas, de acordo com o histórico de geração do sul do Brasil. Os resultados obtidos foram estruturados em um mecanismo visual de análise comparativa, o qual buscou orientar o processo decisório em uma via equilibrada, amparada pelo adequado gerenciamento de *trade-offs*, na seleção de fontes de energia elétrica. Esse equilíbrio fornece subsídios para a tomada de decisão no contexto de cada território, de acordo com as características de sustentabilidade ambiental, econômica e de disponibilidade de geração de suas fontes energéticas.

A etapa avançada da pesquisa foi dedicada ao estudo, de forma aprofundada, das relações entre a minimização de impactos ambientais e econômicos e o fortalecimento da resiliência da infraestrutura elétrica urbana. Essa etapa se desenvolveu a partir de pesquisa quantitativa, para teste de teoria, apoiada nos resultados da etapa intermediária. Para esse propósito, a pesquisa propôs, inicialmente, um modelo diamante para o gerenciamento de *trade-offs* em projetos elétricos urbanos. O modelo orientou a análise integrada de características de sustentabilidade e de resiliência desses projetos, considerando a importância do fomento a diferentes fontes na formulação de políticas públicas energéticas e a seleção dessas fontes por gestores locais, no contexto de transição energética. Para sua aplicação, o estudo empregou cenários combinados, com soluções de geração centralizada e distribuída, explorando suas potencialidades ambientais, econômicas e de geração, a fim de compreender os efeitos de suas combinações para a sustentabilidade e para a resiliência urbana. Adicionalmente, tais efeitos foram investigados com o auxílio de análise de sensibilidade das fontes e das soluções nos mix energéticos dos cenários. As características de sustentabilidade dos cenários foram exploradas por técnicas de avaliação do ciclo de vida, ao passo que as características de resiliência foram compreendidas a partir das relações entre capacidade instalada e eletricidade gerada pelas fontes. Por fim, as análises realizadas foram integradas em *dashboards* comparativos dos cenários, ponderando o gerenciamento de *trade-offs* entre características de sustentabilidade ambiental e econômica, bem como entre essas e as características de resiliência dos cenários. Assim, o estudo buscou otimizar a seleção combinada de soluções, com foco sobre a transição energética, de forma que características regionais diversas pudessem ser consideradas, tanto por formuladores de políticas quanto por gestores locais.

1.4 Delimitações da pesquisa

Este estudo adota delimitações, as quais estão associadas à complexidade dos cenários de análise, bem como às escolhas metodológicas realizadas, possibilitando as aplicações práticas e as discussões relacionadas aos seus resultados. As delimitações gerais do trabalho são características de seu foco sobre elementos de sustentabilidade e de resiliência no ambiente urbano. Por conseguinte, apesar de a transição energética abordar elementos que vão além da infraestrutura elétrica, tais como combustíveis, esses não foram abordados no estudo. A delimitação sobre sistemas elétricos urbanos possibilitou a exploração específica e aprofundada da problemática do fornecimento de energia elétrica, investigando as relações entre o desempenho dessa infraestrutura e os desafios para o seu planejamento, frente às incertezas de mudanças climáticas. Por esse motivo, embora existam diferentes categorias de impacto ambiental que possam ser avaliadas por meio das técnicas empregadas, o estudo buscou, sempre que possível, explorar os efeitos específicos das estratégias analisadas sobre as mudanças nos padrões do clima. Cabe ressaltar ainda que, embora diversos estudos optem por conduzir as avaliações de sustentabilidade com base em fatores ambientais, econômicos e sociais, nessa pesquisa, o pilar social não foi abordado.

O Artigo 1 (Capítulo 2) buscou uma abstração do tema do gerenciamento de *trade-offs* para o processo decisório sustentável. Para tanto, aplicou delimitações quanto ao tipo de exploração realizada. O estudo não se dedicou a uma revisão sistemática da literatura, tendo em vista que o tema explorado ainda carece de avanços relevantes, associados a abordagens específicas para o gerenciamento de *trade-offs* em sustentabilidade. Nesse sentido, para o estudo de caso realizado, a atribuição de importâncias, aos objetivos sustentáveis do projeto, se deu unicamente a partir da aplicação de métodos multicritério, com especialistas. Apesar de serem amplamente utilizados em pesquisas na área de sustentabilidade, esses métodos, muitas vezes, apresentam falhas ao vincular a opinião dos participantes à resposta otimizada. Ainda assim, o estudo delimita a aplicação da ferramenta desenvolvida à utilização de métodos multicritério, a fim de proporcionar uma abordagem prática e de fácil compreensão para gestores de diferentes áreas.

O desenvolvimento do Artigo 2 (Capítulo 3) demandou o estabelecimento de delimitações relacionadas ao caráter abrangente das avaliações realizadas. Dentre essas, pode-se destacar a escolha de determinadas fontes para o mix energéticos dos cenários,

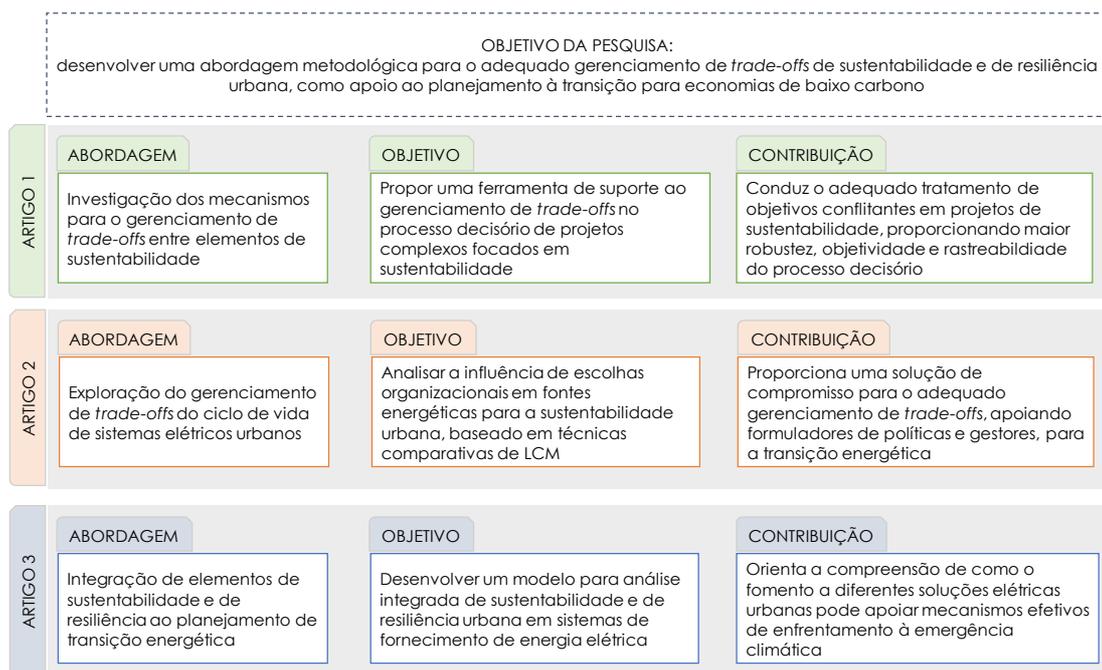
de acordo com as características da região do estudo de caso empregado. Assim, o estudo delimitou as discussões acerca do desempenho dessas fontes, de forma a investigá-lo em profundidade, considerando os efeitos de suas interações. Além disso, não foram consideradas possibilidades de importação ou exportação de energia elétrica, mas sim as potencialidades e as barreiras para emprego das fontes com mecanismos de geração bem desenvolvidos no Brasil. Dessa forma, buscou-se explorar oportunidades de fomento a fontes energéticas disponíveis no país, apoiando a tomada de decisão regional. Nesse contexto, os sistemas elétricos urbanos foram investigados com base no fornecimento por geração centralizada, não sendo consideradas, neste artigo, soluções de geração distribuída.

Por fim, no Artigo 3 (Capítulo 4), foram adotadas delimitações similares às adotadas no Artigo 2, como o emprego das mesmas fontes de geração centralizada, de maneira que os resultados obtidos pudessem ser comparáveis. De forma isonômica, também não foram incluídos processos de importação e de exportação de energia elétrica, considerando, de forma específica, as características regionais de geração. No entanto, o Artigo 3 buscou compreender os efeitos das combinações de soluções de geração centralizada e distribuída. Assim, para as soluções de geração distribuída, delimitou-se seu uso de acordo com os padrões brasileiros, incluindo os custos de instalação no país. Como a principal delimitação do Artigo, destaca-se que o modelo para análise integrada desenvolvido aborda, como expressão de características resilientes das soluções, as relações entre capacidade instalada e eletricidade gerada pelas fontes empregadas. Por conseguinte, não foram incluídos outros fatores na análise, como multifuncionalidade, interconectividade ou ainda o desempenho da infraestrutura frente a eventos extremos.

1.5 Estrutura da Tese

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, em que o primeiro apresenta a introdução do tema explorado, contendo a contextualização e a justificativa por sua escolha; além de seus objetivos, procedimentos metodológicos e delimitações. Nos capítulos dois, três e quatro, são apresentados os artigos desenvolvidos como apoio ao objetivo geral da pesquisa. A [Figura 1.2](#) apresenta as abordagens, objetivos e contribuições mais relevantes dos artigos integrantes da tese.

Figura 1.2 – Estrutura da tese



Fonte: elaborado pela autora

O segundo capítulo, composto pelo Artigo 1, investiga mecanismos de contribuição para o adequado gerenciamento de *trade-offs*, entre elementos de sustentabilidade, no planejamento de projetos. A estrutura da tese inicia por essa investigação, tendo em vista a complexidade do equilíbrio entre objetivos múltiplos de projeto, os quais possam orientar resultados com foco sustentável. Por conseguinte, o Artigo explora abordagens de apoio tanto às decisões gerenciais quanto operacionais de projeto. Por isso, a ferramenta desenvolvida para o gerenciamento de *trade-offs* inclui diretrizes, relacionadas diretamente aos objetivos de sustentabilidade do projeto, bem como uma planilha para operacionalização das decisões. Tendo em vista a necessidade de abstração do tema, este Artigo não teve como foco a transição energética de forma específica, mas sim os desafios para o tratamento de objetivos conflitantes no âmbito de projetos sustentáveis.

No terceiro capítulo da tese, o Artigo 2 se desenvolve a partir da exploração dos *trade-offs* existentes no ciclo de vida de projetos elétricos urbanos, como contribuição a estratégias de transição energética. Esses *trade-offs* foram analisados considerando o desempenho ambiental e econômico das soluções de fornecimento de energia elétrica, a partir dos efeitos das interações entre diferentes fontes energéticas empregadas. A escolha pelo uso dessas fontes é analisada sob a perspectiva da participação de organizações no Mercado Livre de Energia Elétrica (mercado não regulado). Assim, são

discutidas as relações entre as decisões gerenciais institucionais e a formulação de políticas públicas, considerando o papel dos consumidores livres para a promoção de soluções elétricas de baixo carbono em escalas regionais.

As análises realizadas no Artigo 2 evidenciaram a necessidade da ponderação de diferentes elementos, no processo decisório de soluções elétricas urbanas; capazes de relacionar características que contribuíssem para a sustentabilidade, mas que ainda fossem capazes de se mostrar resilientes frente às mudanças climáticas. Por conseguinte, no capítulo quatro, o Artigo 3 aborda a integração, ao planejamento da transição energética, dos conceitos de sustentabilidade e de resiliência desses sistemas. Essa integração decorre da proposição de um modelo, baseado no adequado gerenciamento de *trade-offs*, considerando características sustentáveis e resilientes dos projetos elétricos urbanos. O modelo busca explicitar os *trade-offs* existentes no planejamento desses projetos, os quais influenciam as escolhas das organizações e o fomento a diferentes soluções, pelos formuladores de políticas. Assim, o estudo pretende contribuir para o desenvolvimento de estratégias efetivas para a transição energética, apresentando-se como adaptáveis ao contexto de diferentes territórios.

Por fim, no quinto capítulo, são apresentadas as considerações finais do estudo, destacando suas contribuições teóricas e gerenciais, bem como suas limitações. Dessa forma, são remontados os caminhos para que os objetivos específicos, desenvolvidos em cada artigo, contribuam para o alcance ao objetivo geral da pesquisa. Complementarmente, são analisados os avanços alcançados com a tese, para o campo de estudo, bem como são sugeridas temáticas para exploração em pesquisas futuras.

Referências

- AHERN, J. From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world. **Landscape and Urban Planning**, v. 100, p. 341-343, 2011.
- AHMED, W.; TAN, Q.; SHAIKH, G.M.; WAQAS, H.; KANASRO, N.A.; ALI, S.; SOLANGI, Y.A. Assessing and Prioritizing the Climate Change Policy Objectives for Sustainable Development in Pakistan. **Symmetry**, v. 12, p. 1203, 2020.
- ALBERTI, M. **Cities that think like planets: complexity, resilience, and innovation in hybrid ecosystems**. Seattle: University of Washington Press, 2016.
- ALI-TOUDERT, F.; JI, L. Modeling and measuring urban sustainability in multi-criteria based systems e a challenging issue. **Ecological Indicators**, v. 73, p. 597-611, 2017.
- ANDERSON, D.; WINNE, S. Energy system change and external effects in climate change mitigation. **Environment and Development Economics**, v. 12, p. 359-378, 2007.
- ASHWORTH, P.; SUN, Y.; FERGUSON, M.; WITT, K.; SHE, S. Comparing how the public perceive CCS across Australia and China. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 86, p. 125-133, 2019.
- BAKER, S.H. Anti-Resilience: A Roadmap for Transformational Justice within the Energy System. **Harvard Civil Rights-Civil Liberties Law Review**, v. 54, pp. 1-48, 2019.
- BARRON, R.W.; HILL, M.C. A wedge or a weight? Critically examining nuclear power's viability as a low T carbon energy source from an intergenerational perspective. **Energy Research & Social Science**, v. 50, p. 7-17, 2019.
- BOMPARD, E.; BOTTERUD, A.; CORGNATI, S.; HUANG, T.; JAFARI, M.; LEONE, P.; MAURO, S.; MONTESANO, G.; PAPA, C.; PROFUMO, F. An electricity triangle for energy transition: Application to Italy. **Applied Energy**, v. 277, p. 115525, 2020.
- BRADSHAW, A.; JANNUZZI, G. DE M. Governing energy transitions and regional economic development: Evidence from three Brazilian states. **Energy Policy**, v. 126, p.1-11, 2019.
- CETKOVIC, S; BUZOGANY, A. Varieties of capitalism and clean energy transitions in the European Union: When renewable energy hits different economic logics. **Climate Policy**, v. 16, p. 642-657, 2016.
- DE CARVALHO, A.L.; HENGGELER, A.C.; FREIRE, F.; OLIVEIRA, C.H. A multi-objective interactive approach to assess economic-energy-environment trade-offs in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 1429-1442, 2016.

DE FARIA JR, H.; TRIGOSO, F.B.M.; CAVALCANTI, J.A.M. Review of distributed generation with photovoltaic grid connected systems in Brazil: Challenges and prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 469-475, 2017.

DESGAIN, D.; HASELIP, J. Barriers to the Transfer of Low-carbon Electricity Generation Technologies in Four Latin American Countries. **Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy**, v. 10, p. 348-360, 2015.

DONG, K.; JIANG, Q.; SHAHBAZ, M.; ZHAO, J. Does low-carbon energy transition mitigate energy poverty? The case of natural gas for China. **Energy Economics**, v. 99, p. 105324, 2021.

DONG, L.; WANG, Y.; SCIPIONI, A.; PARK, H. S.; REN, J. Recent progress on innovative urban infrastructures system towards sustainable resource management. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 128, p. 355–359, 2017.

DYRSTAD, J.M.; SKONHOFT, A.; CHRISTENSEN, M.Q.; ØDEGAARD, E.T. Does economic growth eat up environmental improvements? Electricity production and fossil fuel emission in OECD countries 1980–2014. **Energy Policy**, v. 125, p. 103-109, 2019.

EEKHOUT, JPC; DE VENDE, J. Assessing the effectiveness of Sustainable Land Management for large-scale climate change adaptation. **Science of the Total Environment**, v. 654, p. 85-93, 2019.

EPA – Environmental Protection Agency. **Climate Adaptation Action Plan**. Washington, D.C., 2021.

FORTES, P.; SIMOES, S.G.; AMORIM, F.; SIGGINI, G.; SESSA, V.; SAINT-DRENAN, Y.M.; CARVALHO, S.; MUJTABA, B.; DIOGO, P.; ASSOUMOU, E. How sensitive is a carbon-neutral power sector to climate change? The interplay between hydro, solar and wind for Portugal. **Energy**, v. 239, 2022.

FRAGKOS, P.; VAN SOEST, H.L. SCHAEFFER, R.; REEDMAN, L.; KOBERLE, A.C.; MACALUSO, N.; EVANGELOPOULOU, S.; DE VITA, A.; SHA, F.; QIMIN, C.; KEJUN, J.; MATHUR, R.; SHEKHAR, S.; DEWI, R.G.; DIEGO, S.H.; OSHIRO, K.; FUJIMORI, S.; PARK, C.; SAFONOV, G.; IYER, G. Energy system transitions and low-carbon pathways in Australia, Brazil, Canada, China, EU-28, India, Indonesia, Japan, Republic of Korea, Russia and the United States. **Energy**, v. 216, p. 119385, 2021.

GEDDES, A.; SCHMIDT, T.S.; STEFFEN, B. The multiple roles of state investment banks in low-carbon energy finance: An analysis of Australia, the UK and Germany. **Energy Policy**, v. 115, p. 158-170, 2018.

GIBSON, R.B. Sustainability assessment: basic components of a practical approach. **Impact Assessment and Project Appraisal**, v. 24 (3), p. 170-182, 2006.

GONÇALVES, C.; HONRADO, J.P.; CEREJEIRA, J.; SOUSA, R.; FERNANDES, P.M.; VAZ, A.S.; ALVES, M.; ARAÚJO, M. CARVALHO-SANTOS, C.; FONSECA, A.; FRAGA, H.; GONÇALVES, J.F.; LOMBA, A.; PINTO, E.; VICENTE, J.R.;

SANTOS, J.A. On the development of a regional climate change adaptation plan: Integrating model-assisted projections and stakeholders' perceptions. **Science of the Total Environment**, v. 805, p. 150320, 2022.

HAFNER, S.; ANGER-KRAAVI, A.; MONASTEROLO, I.; JONES, A. Emergence of New Economics Energy Transition Models: A Review. **Ecological Economics**, v. 177, p. 106779, 2020.

HAK, M.; MATSUOKA, Y.; GOMI, K. A qualitative and quantitative design of low-carbon development in Cambodia: Energy policy. **Energy Policy**, v. 100, p. 237-251, 2017.

HURLIMANN, A.C.; MOOSAVI, S.; BROWNE, G.R. Climate change transformation: A definition and typology to guide decision making in urban environments. **Sustainable Cities and Society**, v. 70, p. 102890, 2021.

IGOS, E.; RUGANI, B.; REGE, S.; BENETTO, E.; DROUET, L. ZACHARY, D.S. Combination of equilibrium models and hybrid life cycle-input-output analysis to predict the environmental impacts of energy policy scenarios. **Applied Energy**, v. 145, p. 234-245, 2015.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press: In Press, 2021.

JONES, C.; GILBERT, P.; RAUGEI, M.; MANDER, S. LECCISI, E. An approach to prospective consequential life cycle assessment and net energy analysis of distributed electricity generation. **Energy Policy**, v. 100, p. 350-358, 2017.

JUARASZ, J.; CANALES, F.A.; KIES, A.; GUEZGOUZ, M.; BELUCO, A. A review on the complementarity of renewable energy sources: Concept, metrics, application and future research directions. **Solar Energy**, v. 195, p. 703-724, 2020.

LAMMERS, K.; BERTHEAU, P.; BLECHINGER, P. Exploring requirements for sustainable energy supply planning with regard to climate resilience of Southeast Asian islands. **Energy Policy**, v. 146, p. 111770, 2020.

LEITE, C.; AWAD, J.C.M. **Cidades Sustentáveis, Cidades Inteligentes**. Bookman, 2014.

LOISEAU, E.; ROUX, P.; JUNQUA, G.; MAUREL, P.; BELLON-MAUREL, V. Implementation of an adapted LCA framework to environmental assessment of a territory: Important learning points from a French Mediterranean case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 80, p. 17–29, 2014.

MABON, L.; SHACKLEY, S.; VERCELLI, S.; ANDERLUCCI, J.; BOOT, K. Deliberative Decarbonisation? Assessing the Potential of an Ethical Governance Framework for Low-Carbon Energy through the Case of Carbon Dioxide Capture and Storage. **Environment and Planning C: Politics and Space**, v. 33, p. 256-271, 2015.

MARQUES, A.C.; FUINHAS, J.A.; PEREIRA, D.S. The dynamics of the short and long-run effects of public policies supporting renewable energy: A comparative study of installed capacity and electricity generation. **Economic Analysis and Policy**, v. 63, p. 188-206, 2019.

MAZZI, A.; TONIOLO, S.; CATTO, S.; DE LORENZI, V.; SCIPIONI, A. The combination of an Environmental Management System and Life Cycle Assessment at the territorial level. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 63, p. 59–71, 2017.

MCPHERSON, M.; JOHNSON, N.; STRUBEGGER, M. The role of electricity storage and hydrogen technologies in enabling global low-carbon energy transitions. **Applied Energy**, v. 216, p. 649-661, 2018.

MEEROW, S.; NEWELL, J.P.; STULTS, M. Defining urban resilience: A review. **Landscape and Urban Planning**, v. 147, p. 38-49, 2016.

MORRISON-SAUNDERS, A.; POPE, J. Conceptualising and managing trade-offs in sustainability assessment. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 38, p. 54e6, 2013.

NIELSEN, A.N.; JENSEN, R.L.; LSARSEN, T.S.; NISSEN, S.B. Early stage decision support for sustainable building renovation – A review. **Building and Environment**, v. 103, p. 165-181, 2016.

NIK, V.M.; PERERA, A.T.D; CHEN, D. Towards climate resilient urban energy systems: a review. **National Science Review**, v. 8, p. 134, 2021.

NORDENSVÄRD, J. URBAN, F. The stuttering energy transition in Germany: Wind energy policy and feed-in tariff lock-in. **Energy Policy**, v. 82, p. 156-165, 2015.

PABLO-ROMERO, M.P.; SÁNCHEZ-BRAZA, A.; GALYAN, A. Renewable energy use for electricity generation in transition economies: Evolution, targets and promotion policies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 138, p. 110481, 2021.

PANDIT, A.; MINNÉ, E.A.; LI, F.; BROWN, H.; JEONG, H.; JAMES, J.C.; NEWELL, J.P.; WEISSBURG, M.; CHANG, M.E.; XU, M.; YANG, P.; WANG, R.; THOMAS, V. M.; YU, X.; LU, Z.; CRITTENDEN, J. Infrastructure ecology: an evolving paradigm for sustainable urban development. **Journal of Cleaner Production**, v. 163, p. 519-527, 2017.

PERERA, A.T.D; JAVANROODI, K.; NIK, V.M. Climate resilient interconnected infrastructure: Co-optimization of energy systems and urban morphology. **Applied Energy**, v. 285, p. 116430, 2021.

RAMYAR, R.; ACKERMAN, A.; JOHNSTON, D.M. Adapting cities for climate change through urban green infrastructure planning. **Cities**, v. 117, p. 103316, 2021.

- SALIMI, M.; AL-GHAMDI, S.G. Climate change impacts on critical urban infrastructure and urban resiliency strategies for the Middle East. **Sustainable Cities and Society**, v. 54, p. 101948, 2020.
- SÁNCHEZ, M.A. Integrating sustainability issues into project management. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p. 319-330, 2015.
- SERRE, D., HEINZLEF, C. Assessing and mapping urban resilience to floods with respect to cascading effects through critical infrastructure networks. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 30, p. 235-343, 2018.
- SOLECKI, W.; GRIMM, N.; MARCOTULLIO, P.; BOONE, C.; BRUNS, A.; LOBO, J.; LUQUE, A.; ROMERO-LANKAO, P.; YOUNG, A.; ZIMMERMAN, R.; BREITZER, R.; GRIFFITH, C.; AYLETT, A. Extreme events and climate adaptation-mitigation linkages: Understanding low-carbon transitions in the era of global urbanization. **WIREs Climate Change**, v. 10, 2019.
- SONNEMANN, G.; MARGNI, M. **Life Cycle Management**. Springer Open: Rock Hill, 2015.
- TIAN, J.; YU, L.; XUE, R.; ZHUANG, S.; SHAN, Y. Global low-carbon energy transition in the post-COVID-19 era. **Applied Energy**, in press.
- TSANG, M. P.; BATES, M. E.; MADISON, M.; LINKOV, I. Benefits and risks of emerging technologies: Integrating life cycle assessment and decision analysis to assess lumber treatment alternatives. **Environmental Science and Technology**, v. 48, n. 19, p. 11543–11550, 2014.
- UK Government. **Government Response to the Climate Change Committee: Progress in Reducing Emissions – 2021 Report to Parliament**. Crown, 2021.
- ULSRUD, K.; ROHARACHER, H.; MUCHUNKU, C. Spatial transfer of innovations: South-South learning on village-scale solar power supply between India and Kenya. **Energy Policy**, v. 114, p. 89-97, 2018.
- UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change. **End of Coal in Sight at COP26**, 2021. Disponível em: <<https://unfccc.int/news/end-of-coal-in-sight-at-cop26>>.
- UNITED NATIONS DESA/POPULATION DIVISION. **Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development A/RES/70/1**. Kenya, 2015a.
- UNITED NATIONS. **Paris Agreement**. Paris, 2015.
- URLAINIS, A.; ORNAI, D.; LEVY, R.; VILNAY, O.; SHOHET, I.M. Loss and damage assessment in critical infrastructures due to extreme events. **Safety Science**, v. 147, p. 105587, 2022.

VOLKART, K.; MUTEL, C.L. PANOS, E. Integrating life cycle assessment and energy system modelling: Methodology and application to the world energy scenarios. **Sustainable Production and Consumption**, v. 16, p. 121-133, 2018.

WANG, S.; ZHU, J.; HUANG, G.; BAETZ, B.; CHENG, G.; ZENG, X.; WANG, X. Assessment of climate change impacts on energy capacity planning in Ontario, Canada using high-resolution regional climate model. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, p. 123026, 2020.

WANG, S.; ZHU, J.; HUANG, G.; BAETZ, B.; CHENG, G.; ZENG, X.; WANG, X. Assessment of climate change impacts on energy capacity planning in Ontario, Canada using high-resolution regional climate model. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, p. 123026, 2020.

YUAN, X.C.; WEI, Y.M.; WANG, B.; MI, Z. Risk management of extreme events under climate change. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 1169-1174, 2017.

ZANGHELINI, G. M.; CHERUBINI, E.; SOARES, S. R. How Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) is aiding Life Cycle Assessment (LCA) in results interpretation. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 609–622, 2018.

ZHANG, L.; XU, Y.; YEH, C.H.; LIU, Y.; ZHOU, D. City sustainability evaluation using multi-criteria decision making with objective weights of interdependent criteria. **Journal of Cleaner Production**, v. 131, p. 491-499, 2016.

ZHANG, X.; LI, H. Urban resilience and urban sustainability: What we know and what do not know? **Cities**, v. 72, p. 141-148, 2018.

2. ARTIGO 1 – GERENCIANDO *TRADE-OFFS* EM CENÁRIOS COMPLEXOS: UMA FERRAMENTA DE TOMADA DE DECISÃO PARA PROJETOS SUSTENTÁVEIS

Ruane Fernandes de Magalhães (PPGEP/UFRGS) – ruane.magalhaes@ufrgs.br
Ângela de Moura Ferreira Danilevicz (PPGCI/UFRGS) – angelamfd@producao.ufrgs.br
Joseph Palazzo (Bren School/UCSB) – jpalazzo@bren.ucsb.ed

Artigo publicado em 06/12/2018, em sua versão em inglês, na revista *Journal of Cleaner Production* (ISSN 0959-6526), IF 7.246, Q1 nas Categorias ‘*Engineering, Environmental*’ e ‘*Environmental Science*’ (JCR).

Resumo

A inclusão de fatores de sustentabilidade em projetos é considerada um desafio para técnicos, gestores e tomadores de decisão. Projetos sustentáveis lidam com uma ampla gama de critérios de diferentes áreas, tornando o processo decisório mais complexo e incerto. Métodos multicritério podem guiar as escolhas de projeto para alcançar seus objetivos; no entanto, esses não são capazes de gerenciar os aspectos sobrepostos e conflitantes de tais objetivos, chamados de *trade-offs*. Os *trade-offs* são considerados como parte integral de qualquer projeto sustentável, uma vez que esses abordam objetivos conflitantes, considerando aspectos ambientais, sociais e econômicos. Em diversos estudos, os *trade-offs* têm sido abordados sob o ponto de vista de seu processo de formação, ou ainda em como podem ser identificados em projetos. Contudo, há uma lacuna na literatura relacionada a procedimentos estruturados de apoio a tomadores de decisão após a identificação desses *trade-offs*. Assim, este estudo propõe uma ferramenta de suporte ao gerenciamento de *trade-offs* no processo decisório de projetos complexos com foco sustentável. A ferramenta para tomada de decisão em *trade-offs* auxilia a etapa de planejamento dos projetos, desdobrando-se em duas fases sequenciais: diretrizes a serem consideradas pelo gerenciamento de *trade-offs* e operacionalização do gerenciamento de *trade-offs*. As diretrizes foram desenvolvidas com base em boas práticas da literatura, enquanto o gerenciamento de *trade-offs* é originado a partir da operacionalização de cinco análises comparativas realizadas entre os objetivos conflitantes de projeto, por meio de uma planilha estruturada. A ferramenta proposta contribui para o adequado tratamento de objetivos conflitantes em projetos sustentáveis não apenas em áreas gerenciais, mas ainda em áreas operacionais. Por conseguinte, a estrutura para gerenciamento de *trade-offs* proporciona maior robustez, objetividade e rastreabilidade das escolhas realizadas durante o planejamento de projetos sustentáveis.

Palavras-chave: Gerenciamento de *trade-offs*; Projetos sustentáveis; Gestão de projetos complexos; Ferramenta de tomada de decisão.

2.1 Introdução

As crescentes preocupações globais acerca dos impactos da atividade humana sobre o meio ambiente geraram mudanças em projetos e produtos de diferentes setores da indústria. Tais mudanças ocorreram devido à urgência das organizações em integrar suas estratégias aos fatores de desenvolvimento sustentável, refletindo seus valores de responsabilidade social, econômica e ambiental (Garcia et al., 2016). Nesse sentido, o cumprimento das metas de desenvolvimento sustentável é visto como fundamental para a sociedade como um todo; considerando que esse busca atender às necessidades do presente sem comprometer as necessidades das gerações futuras (United Nations, 1987; 2015).

No entanto, nem sempre está claro como a sustentabilidade pode ser abordada na prática de desenvolvimento de projetos e produtos. Isso porque a inclusão de fatores de sustentabilidade em qualquer processo exige um entendimento completo das complexidades do cenário analisado. Esse entendimento varia em termos e definições específicas da área de estudo (Glavič, 2007); por conseguinte, torna-se necessária uma avaliação crítica de como a sustentabilidade pode ser incorporada ao planejamento estratégico das organizações (Sánchez, 2015). Nesse contexto, considerando a natureza multidisciplinar dos projetos de sustentabilidade (Elkington, 1999), alcançar o equilíbrio adequado entre a redução dos impactos sociais e ambientais e a viabilidade econômica desses projetos torna-se um importante desafio para a sua gestão (Pearce, 2008; Marcelino-Sábada et al., 2015; Garcia et al., 2016). De acordo com Marcelino-Sábada et al. (2015), existem ainda incertezas associadas à sustentabilidade nos processos gerenciais, tais como: qual é a definição de um projeto de sustentabilidade; como a gestão de projetos de sustentabilidade deve ser conduzida para atingir os resultados esperados; e como os gestores podem incluir sustentabilidade em seus projetos de maneira eficiente. É importante observar que não há uma resposta única para essas perguntas; visto que o significado de sustentabilidade pode ser diverso, dependendo do contexto de cada projeto. Portanto, os estudos de sustentabilidade em projetos devem ser abrangentes, considerando estratégias geográficas, econômicas, culturais e organizacionais.

Os estudos focados na inclusão de fatores de sustentabilidade na indústria têm enfatizado soluções para o desenvolvimento de produtos por meio do uso de abordagens como Ecodesign (Rossi et al., 2016; Lamé et al., 2017; Rousseaux et al., 2017) e *Life*

Cycle Assessment (LCA) (Arushanyan et al., 2014; Häfliger et al., 2017; Iraldo et al., 2017). No entanto, existem lacunas associadas aos métodos e ferramentas que suportam as etapas da gestão integrada de projetos, considerando as particularidades de cenários complexos de sustentabilidade (Brones et al., 2014; Sánchez, 2015; Marcelino-Sábada et al., 2015). A ausência de abordagens adequadas para apoiar a tomada de decisão pode levar a decisões de gestão e política ineficientes e, conseqüentemente, a resultados não confiáveis, devido a escolhas baseadas em critérios subjetivos (Plevin et al., 2013; Zhang et al., 2016). Isso ocorre porque os projetos de sustentabilidade envolvem, necessariamente, a consideração de um grande número de requisitos. Esses requisitos possuem naturezas distintas, os quais podem ser sobrepostos, contraditórios e apresentar forte interação entre si (Alberti, 1996; Zhang et al., 2016). Portanto, estudos que apoiem a tomada de decisão em projetos de sustentabilidade devem ser baseados em métodos estruturados (Chow et al., 2014; Cinelli et al., 2014; Medineckiene et al., 2015), capazes de considerar múltiplos requisitos e objetivos (Munda, 2005; Kang et al., 2016). Nesse sentido, segundo Egilmez et al. (2015), os métodos multicritério podem ser considerados adequados, tendo em vista que envolvem a classificação e a seleção de alternativas, proporcionando maior flexibilidade para analisar diferentes cenários. No entanto, Ali-Toudert e Ji (2017) destacam que esses métodos, embora operacionais, carecem de maior refinamento e maturidade para dar suporte a projetos de alta complexidade intrínseca, como os de sustentabilidade. Diante disso, os métodos multicritério, em projetos de sustentabilidade, tendem a se concentrar na identificação de uma solução ótima para um problema específico (Ren e Dong, 2018; Vishnupriyan e Manoharan, 2018). Por conseguinte, a tomada de decisão baseada unicamente em métodos multicritério pode negligenciar as discussões necessárias acerca de sobreposições e contradições dos objetivos do projeto, devido à sua estrutura hierárquica (Lombardi et al., 2016).

Segundo Morrison-Saunders e Pope (2013), os métodos e as ferramentas adotados nesse contexto devem conduzir a um equilíbrio adequado no atendimento aos diferentes e conflitantes requisitos do projeto (Garcia et al., 2016). Dessa forma, a gestão de conflitos, conhecidos como *trade-offs* (Da Silveira e Slack, 2001; Byggeth e Hochschorner, 2006), desempenha um papel relevante no alcance dos objetivos enunciados (Nielsen et al., 2016), principalmente quando o escopo da gestão de projetos aborda as três dimensões da sustentabilidade - econômica, social e ambiental. Assim,

este trabalho propõe uma ferramenta de apoio ao gerenciamento de *trade-offs* no processo de tomada de decisão de projetos complexos com foco na sustentabilidade. A ferramenta busca preencher uma lacuna essencial na gestão desses projetos, como um complemento à aplicação de métodos multicritério; conferindo maior objetividade e rastreabilidade ao processo de tomada de decisão. Na literatura, existem diversas ferramentas que pretendem caracterizar os *trade-offs* de projetos. No entanto, até onde sabemos, nenhuma das ferramentas anteriores fornece orientação aos tomadores de decisão após a identificação desses conflitos; ao passo que a ferramenta desenvolvida nesta pesquisa pretende proporcionar tal mecanismo.

Este artigo está dividido em cinco seções. A segunda seção apresenta a contextualização do tema e o embasamento teórico da pesquisa. A seção três apresenta a ferramenta proposta, enquanto a seção quatro contém discussões sobre seu potencial de uso e sua relação com outras pesquisas. Finalmente, a seção cinco traz conclusões e sugestões para estudos futuros.

2.2 Background teórico

2.2.1 Sustentabilidade na gestão de projetos

Os projetos são caracterizados como esforços despendidos em um período temporário para criar um determinado produto, serviço ou resultado; assim, seu encerramento ocorre quando os objetivos estabelecidos são alcançados ([Project Management Institute, 2008](#)). No entanto, de acordo com o Guia do Conhecimento em Gerenciamento de Projetos (Guia PMBOK), esses esforços temporários não visam necessariamente obter resultados temporários. Em contraponto, de acordo com o PMI, os objetivos do projeto devem estar voltados para resultados duradouros. Para que esses objetivos sejam alcançados, diversos desafios são enfrentados pelos gestores, enfatizando a importância do acompanhamento das etapas ao longo do desenvolvimento dos projetos. Esse monitoramento geralmente inclui fatores primários, como prazos e custos ([Callistus e Clinton, 2016](#)); no entanto, as principais dificuldades tendem a surgir quando se considera que a gestão de projetos é dinâmica, havendo a necessidade de redefinir as prioridades dos objetivos e monitorar as decisões tomadas ([Sánchez, 2015](#)).

Uma vez que os projetos estejam focados em sustentabilidade, sua gestão se torna ainda mais complexa, tendo em vista que os objetivos de sustentabilidade devem ser suficientemente claros e explícitos em cada etapa ([Marcelino-Sábada et al., 2015](#),

Sánchez, 2015). No entanto, Marcelino-Sábada et al. (2015) consideram que a gestão de projetos pode ser uma forma viável de incluir a sustentabilidade nas organizações, levando em consideração os aspectos da sustentabilidade em todas as etapas e níveis do negócio. Isso ocorre porque os fatores de sustentabilidade podem ser incluídos em áreas como planejamento estratégico (Maletič et al., 2014), inovação (Morioka e De Carvalho, 2016), aprendizagem, processos, bem como gestão de *stakeholders* internos e externos (Dyllick; Hockerts, 2002; Agudo-Valiente et al., 2015; Garcia et al., 2016). Assim, a literatura enfatiza que, uma vez que a inserção dos fatores de sustentabilidade ocorra inicialmente no nível estratégico, a disseminação dos objetivos de sustentabilidade para os demais níveis da organização é otimizada. Portanto, as estratégias da empresa desempenham um papel crucial no processo de sustentabilidade, desde a adaptação da cultura organizacional (Engert et al., 2016; Morioka e De Carvalho, 2016) até o incentivo à inovação (Calik; Bardudeen, 2016; Przychodzen e Przychodzen, 2017).

Labuschagne e Brent (2005) argumentam que, para os métodos de gerenciamento de projetos abordarem com eficácia as questões de sustentabilidade, deve haver uma compreensão clara de como os ciclos de vida do projeto e suas interações influenciam os impactos futuros dos resultados gerados (Morioka e De Carvalho, 2016). Assim, segundo os autores, a gestão desses projetos deve ser pautada por abordagens de *Life Cycle Management* (LCM), desde a definição do escopo até a fase de revisão dos projetos. Para tanto, diversas ferramentas podem ser utilizadas, como *Balanced Scorecard* - BSC - (De Villiers et al., 2016; Varmazyar et al., 2016; Modak et al., 2017); Análise de *Stakeholders* (Sánchez, 2015; Garcia et al., 2016); e LCA, sendo a última a mais difundida atualmente (Marcelino-Sábada et al., 2015; Sánchez, 2015). A LCA tem sido utilizada em diversos setores da indústria, pois é capaz de avaliar os impactos ambientais de produtos ou serviços, desde a extração da matéria-prima até a fabricação, uso e descarte em seu fim da vida (International Organization for Standardization, 1997).

É importante ressaltar que, em alguns tipos de projetos, há sobreposições entre o ciclo de vida do projeto e do produto, como no caso da indústria da construção (Marcelino-Sábada et al., 2015; Khoshnava et al., 2016). Quando esses projetos incorporam a sustentabilidade como foco de desenvolvimento, um alto nível de complexidade também é incluído, principalmente quando aplicado ao ambiente urbano (Ali-Toudert e

Ji, 2017). Isso se deve ao alto número de fatores considerados em projetos de sustentabilidade urbana, de diferentes origens, que podem ser interdependentes e, muitas vezes, conflitantes (Zhang et al., 2016; Ali-Toudert e Ji, 2017). Assim, a gestão desses projetos requer a consideração das múltiplas dimensões envolvidas, bem como análises simultâneas de multicritério e multiobjetivos (Marcelino-Sábada et al., 2015; Engert et al., 2016). Por esse motivo, a tomada de decisões em projetos de sustentabilidade tem sido abordada a partir de sistemas complexos.

2.2.2 Tomada de decisão em cenários complexos

O estabelecimento de critérios é uma das etapas essenciais na tomada de decisão de projetos, uma vez que orienta seu desenvolvimento, desde as fases iniciais. Os critérios podem ser definidos como padrões mensuráveis (Ali-Toudert; Ji, 2017) ou como objetivos a serem cumpridos, de acordo com um ranqueamento (Hallstedt, 2017). Assim, para o cumprimento de critérios de sustentabilidade, os *stakeholders* devem, antes, compreender quais são os objetivos estabelecidos, como esses podem ser alcançados e, principalmente, como a sustentabilidade deve ser medida (Arena et al., 2009).

Por conseguinte, a definição e a incorporação de critérios de sustentabilidade no processo de tomada de decisão constituem desafios relevantes para a gestão de projetos (Garcia et al., 2016), principalmente quando considerados os riscos e as incertezas associados aos resultados desejados (Williams, 1999; Kerzner, 2014). Tradicionalmente, o gerenciamento de projetos é baseado em objetivos de tempo, custo e qualidade (Crawford; Pollack, 2004); no entanto, esse ponto de vista foi modificado com a crescente importância de adicionar objetivos de sustentabilidade ao escopo de projetos (Bragança et al., 2010; Kamali; Hewage, 2017; Silviu et al., 2017). Segundo Hallstedt (2017), um dos principais obstáculos para a inclusão desses objetivos em projetos e produtos é a complexidade das análises necessárias ao processo decisório. Essa complexidade pode surgir das diferentes origens e interações mútuas dos critérios (Snowden; Boone, 2007), além de suas possíveis interdependências e sobreposições (Byggeth; Hochschorner, 2006; Zhang et al, 2016; Ali-Toudert e Ji, 2017).

Nesse contexto, os sistemas complexos são caracterizados por serem de difícil compreensão (Kiridena; Sense, 2016), altamente imprevisíveis, bem como muitas vezes incontroláveis; em que diferentes atores e mecanismos individuais podem gerar consequências coletivas (Alberti, 2016). Assim, Snowden e Boone (2007) apontam que

o processo de tomada de decisão nesses sistemas é devidamente complexo, principalmente considerando que tanto mudanças pequenas quanto significativas podem introduzir imprevisibilidade e incerteza nas análises. Portanto, a gestão de sistemas sustentáveis tem sido abordada sob novos paradigmas, como pela lente teórica da resiliência (Olazabal; Pascual, 2016; Meerow et al., 2016; Dhar; Khirfan, 2017).

A resiliência de um sistema está relacionada à sua capacidade de se adaptar e se transformar, frente a mudanças inesperadas, mantendo suas funções, de forma ‘segura para falhar’, mas não necessariamente ‘à prova de falhas’ (Snowden; Boone, 2007; Ahern, 2011; Meerow et al., 2016). Para Alberti (2016), a resiliência está associada à amplitude da estabilidade do sistema, à capacidade desse absorver mudanças e à adaptabilidade a vários estados, parâmetros e fatores (Holling, 1973). Diante dessas necessidades, entende-se que a tomada de decisão em projetos complexos deve ser capaz de lidar com questões de multidisciplinaridade, dinâmica, especificidade e restrições (Wideman, 1991). Por esse motivo, as escolhas realizadas devem ser pautadas por forte integração técnica e gerencial (Williams, 1999), considerando aspectos multidimensionais de planejamento, gestão e estratégia (Ahern, 2011; Medineckiene et al., 2015).

Nesse sentido, os métodos multicritério têm sido utilizados para proporcionar o tratamento simultâneo de um número relevante de critérios na tomada de decisão de projetos, levando em consideração riscos e incertezas (Khalili; Duecker, 2013; Garcia et al., 2016). Esses métodos são considerados adequados para uso em avaliações de sustentabilidade (Santos et al., 2017), uma vez que, para cada cenário, uma resposta única é gerada; enquanto os resultados são obtidos com a participação de diferentes tomadores de decisão (Munda, 2006; Khoshnava et al., 2016). Além disso, as análises multicritério dão consistência à estruturação do problema, reduzindo a subjetividade da seleção entre alternativas, por meio da explicitação e da quantificação dos critérios (Egilmez et al., 2015; Fantinatti et al., 2015; Medineckiene et al., 2015). Diversos estudos recentes na área da sustentabilidade têm se baseado na aplicação da Análise Multicritério de Decisão (MCDA) e suas variações para o desenvolvimento de estruturas de apoio à tomada de decisão; principalmente com a aplicação dos métodos *Analytical Hierarchy Process* (AHP) e *Multi-Attribute Utility Theory* (MAUT). No setor da construção, Akadiri et al. (2013) utilizaram uma variação do AHP para selecionar materiais com menor impacto ambiental. Koshnava et al. (2018) desenvolveu

um estudo semelhante, aplicado a *Green Building Materials* (GBM). [Indiviata et al. \(2018\)](#) empregaram AHP para a priorização de estratégias de projeto em edifícios sustentáveis, enquanto [Kamali et al. \(2018\)](#) utilizaram o mesmo método para propor um modelo de avaliação de sustentabilidade para edifícios. Os estudos energéticos também têm aplicado métodos de MCDA, como para a seleção de sistemas individuais de aquecimento de água ([Casanovas-Rubio; Armengou, 2018](#)); para o planejamento da integração de energia renovável na rede existente ([Vishnpriyan; Manoharan, 2018](#)); e para a comparação do desempenho de sustentabilidade de projetos de energia solar centralizada ([Simsek et al., 2018](#)). A maioria desses estudos aborda a identificação do objetivo principal, que possui critérios e subcritérios. Esses, por sua vez, fornecem a definição de uma gama de alternativas a serem priorizadas e selecionadas hierarquicamente ([Lombardi et al., 2016](#), [Indiviata et al., 2018](#); [Ren; Dong, 2018](#)).

A aplicação de métodos multicritério, diversas vezes, está relacionada à avaliação das três dimensões da sustentabilidade (social, econômica e ambiental) simultaneamente, buscando uma comparação entre pares de soluções pré-estabelecidas. Essa comparação par a par, no entanto, pode não considerar conflitos entre critérios, dificultando a determinação do equilíbrio adequado entre diferentes objetivos. Consequentemente, a consideração das inter-relações entre os critérios e subcritérios pode afetar a seleção entre alternativas que foram avaliadas individualmente em cada dimensão da sustentabilidade ([Koshnava et al., 2018](#)). Por outro lado, os critérios de projeto conflitantes podem inibir a aplicação de alguns métodos multicritério, os quais estão relacionados a índices de consistência para validação de resultados. Isso porque conflitos inerentes a projetos de sustentabilidade, quando avaliados separadamente, podem gerar decisões inconsistentes e levar a resultados pouco confiáveis.

Uma vez que as decisões dependem das preferências no MCDA, [Pohekar e Ramachandran \(2004\)](#) enfatizam a necessidade de consenso sobre um compromisso com a sustentabilidade, orientado pela gestão adequada dos *trade-offs* de projeto ([Morrison-Saunders; Pope, 2013](#)). Os *trade-offs* são caracterizados como conflitos entre os objetivos a serem alcançados; em que os ganhos/benefícios em alguns aspectos são obtidos a partir de perdas/prejuízos no atendimento de outros ([Byggeth; Hochschorner, 2006](#); [Morrison-Saunders; Pope, 2013](#)). Por conseguinte, de acordo com [Nielsen et al. \(2016\)](#), os *trade-offs* são inevitáveis nas avaliações de sustentabilidade, sendo parte integrante do processo de tomada de decisão ([Da Silveira; Slack, 2001](#)). [Morrison-](#)

Saunders e Pope (2013) enfatizam que a importância relativa e as restrições dos objetivos conflitantes devem ser explicitadas, classificadas e priorizadas; tornando a seleção de alternativas mais objetiva para os tomadores de decisão (Byggeth; Hochschorner, 2006; Karatas; El-Rayes, 2015; Umer et al., 2017).

No entanto, apesar da existência de uma rede complexa de avaliações a serem realizadas em projetos de sustentabilidade, alguns métodos buscam obter uma solução ótima para cada contexto de análise (Casanovas-Rubio; Armengou, 2018; Koshnava et al., 2018; Vishnupriyan; Monoharan, 2018). As soluções ótimas, embora de natureza prática, podem ignorar conflitos essenciais; bem como excluir alternativas geradas a partir da gestão adequada dos *trade-offs* do conjunto de soluções. Portanto, a integração de métodos multicritério à análise de cenários tem se destacado como relevante na pesquisa em sustentabilidade. Em seu estudo, Rohrbach et al. (2018) comparou o planejamento do uso da terra com o uso da MCDA e o mapeamento participativo; enfatizando que o primeiro apresentou maior resolução espacial e apresentou resultados que podem ser mais bem comparados; enquanto o último foi capaz de sugerir alternativas mais aplicáveis, com informações mais bem contextualizadas.

Assim, considerando a alta complexidade intrínseca dos projetos de sustentabilidade, Ali-Toudert e Ji (2017) acreditam que os métodos multicritério devem estar aliados a outras ferramentas de gestão. Tais ferramentas são capazes de agregar maior maturidade de julgamento aos métodos multicritério, ao proporcionar um melhor entendimento dos diferentes fatores envolvidos no processo de tomada de decisão. Assim, as ferramentas de gestão podem apoiar métodos multicritério e reforçar as escolhas de análises complementares, especialmente quando considerados os *trade-offs* associados a cada projeto.

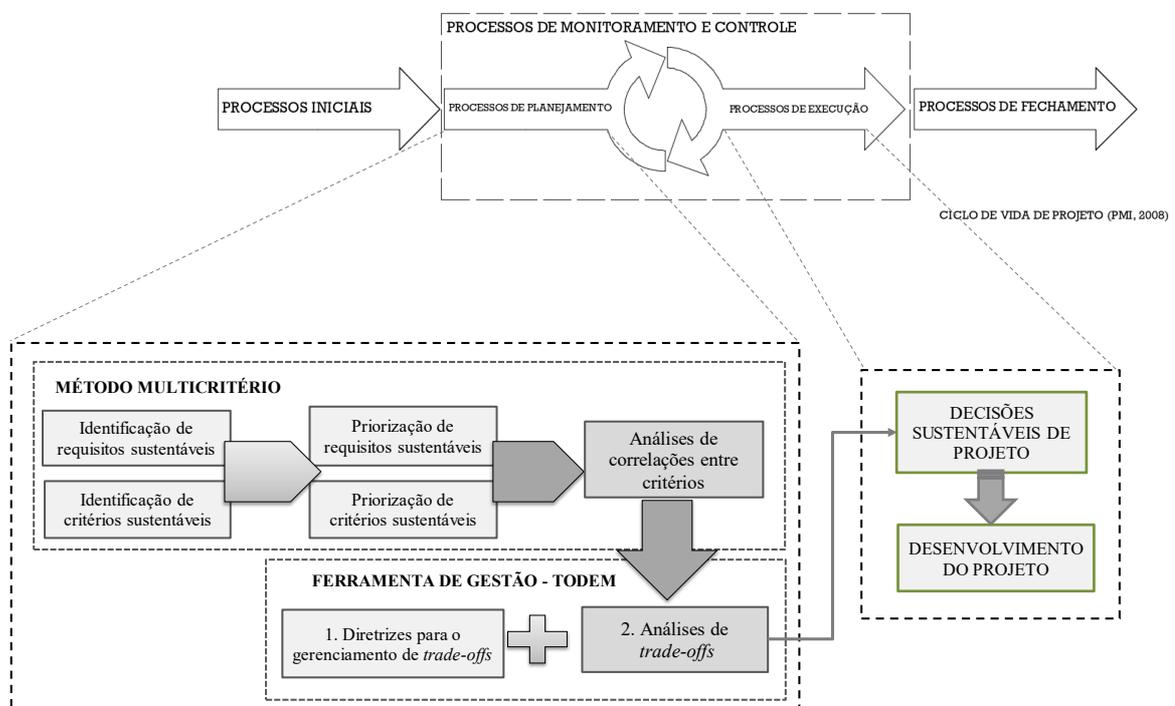
2.3 Ferramenta para o processo decisório de *trade-offs* em projetos de sustentabilidade

Esta seção apresenta a ferramenta desenvolvida para o gerenciamento de *trade-offs* no processo de tomada de decisão de projetos com foco na sustentabilidade – *Trade-off Decision-Making* (TODeM). A utilização dessa ferramenta pressupõe a utilização, em uma fase inicial, de um método multicritério para a análise e tratamento dos requisitos e critérios de projeto. A partir da aplicação do método multicritério, são identificados possíveis *trade-offs*, os quais são gerenciados pela ferramenta proposta. Assim, há uma premissa fundamental para a utilização da TODeM: embora seja possível integrar a

ferramenta com diferentes métodos multicritério, é obrigatório que o método empregado seja capaz de identificar e priorizar tanto os requisitos quanto os critérios de projeto, assim como indicar as correlações entre esses critérios. Portanto, as saídas do método multicritério compõem as entradas da ferramenta para o gerenciamento de *trade-offs*.

A ferramenta TODeM foi desenvolvida para auxiliar a etapa de planejamento do projeto, desdobrando-se em duas fases sequenciais: (i) diretrizes a serem consideradas para o gerenciamento dos *trade-offs*; e (ii) análises dos *trade-offs* de projeto. As diretrizes foram originadas a partir de boas práticas da literatura, relacionadas ao gerenciamento de *trade-offs* para o desenvolvimento de projetos e produtos mais sustentáveis. Por sua vez, as análises de *trade-off* são baseadas em cinco comparações sequenciais, que devem ser realizadas para cada par de objetivos conflitantes de projeto. Dessa forma, os objetivos mais relevantes são explicitados para os tomadores de decisão, subsidiando a análise dos fatores de sustentabilidade do projeto. A [Figura 2.1](#) apresenta o contexto de uso da ferramenta de gestão proposta e sua relação com métodos multicritério. As duas fases da ferramenta TODeM são detalhadas a seguir.

Figura 2.1 – Ferramenta para tomada de decisão em *trade-offs* de projetos sustentáveis - TODeM



2.3.1 Diretrizes para o gerenciamento de *trade-offs*

A primeira fase da ferramenta propõe uma lista de 13 diretrizes divididas em três grupos: decisões iniciais; aspectos aceitáveis e negociáveis; e suporte para a tomada de decisão. Os grupos foram definidos a partir de uma recomendação recorrente na literatura para a gestão de *trade-offs* em projetos de sustentabilidade. Essa recomendação destaca a necessidade de considerar três princípios para lidar com conflitos nesse perfil de projeto: (i) estabelecimento de requisitos claros a serem atendidos; (ii) priorização de requisitos por métodos específicos (métodos multicritério, sistemas matriciais, entre outros); e (iii) monitoramento de seu desempenho por meio de indicadores ou critérios (Gibson, 2006; Morrison-Saunders; Pope, 2013; Nielsen et al., 2016). As diretrizes definidas com base nesses princípios são apresentadas na Tabela 2.1 e detalhadas nos subitens a seguir.

2.3.1.1 Grupo 1 – Decisões Iniciais

As diretrizes que compõem o primeiro grupo são fundamentais para a aplicação do TODeM. Essas diretrizes foram selecionadas para destacar as principais premissas que devem orientar o processo de tomada de decisão de *trade-offs* no projeto de estudo. Consequentemente, as definições desse grupo serão refletidas tanto nos grupos 2 e 3 de diretrizes quanto na segunda fase da ferramenta; uma vez que contêm a essência do projeto. Assim, todas as decisões específicas do projeto, após a aplicação da ferramenta TODeM, refletem os principais pressupostos definidos inicialmente (Morrison-Saunders; Pope, 2013).

2.3.1.2 Grupo 2 – Aspectos aceitáveis e negociáveis

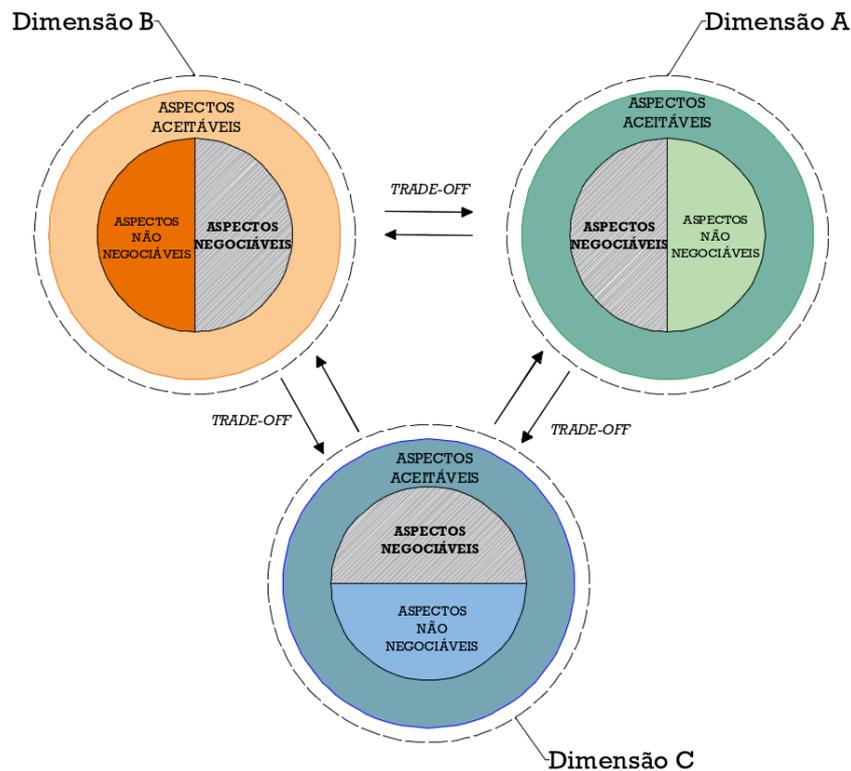
O segundo grupo de diretrizes aborda uma recomendação defendida por Morrison-Saunders e Pope (2013) para a análise de sistemas de sustentabilidade, em relação ao delineamento de aspectos que serão considerados ‘aceitáveis’ nas decisões de projeto. Esses aspectos podem estar presentes em diferentes dimensões, como econômica, social, ambiental, política, tecnológica, entre outras. Assim, uma vez que não seja possível atender aos aspectos considerados aceitáveis, inicia-se um processo de negociação. O processo de negociação constitui o gerenciamento de *trade-offs*, conforme apresenta a Figura 2.2. É importante enfatizar que os *trade-offs* podem ocorrer, não apenas entre diferentes dimensões, mas também dentro da mesma

dimensão. Nesse caso, os aspectos aceitáveis e negociáveis devem ser reavaliados e redefinidos quando necessário.

Tabela 2.1 – Diretrizes para o gerenciamento de *trade-offs*

GRUPO	DIRETRIZ	REFERÊNCIA
1. Decisões Iniciais	1.1 Em decisões iniciais, o objetivo fundamental do projeto de sustentabilidade deve ser privilegiado	Morrison-Saunders e Pope, 2013
	1.2 Antes da proposição de qualquer intervenção, o potencial sustentável do projeto no cenário deve ser avaliado para minimizar a ocorrência de <i>trade-offs</i> complexos	Bartke e Schwarze, 2015
	1.3 O gerenciamento sustentável de <i>trade-offs</i> de projeto deve ocorrer sistematicamente e não apenas de forma individual	Morrison-Saunders e Pope, 2013
	1.4 Entre dois objetivos conflitantes, aquele que não transfere potenciais impactos negativos para o futuro deve ser priorizado	Gibson, 2006
	1.5 As decisões iniciais devem considerar o ponto de vista de diferentes atores envolvidos no processo	Gibson, 2006
2. Aspectos aceitáveis e negociáveis	2.1 Inicialmente, aspectos inaceitáveis do projeto sustentável devem ser definidos, e o grau de flexibilidade a mudanças para esses aspectos deve ser estabelecidos	Morrison-Saunders e Pope, 2013
	2.2 Devem ser definidos os <i>offsets</i> - aspectos de projeto que são considerados negociáveis, entre os aspectos inaceitáveis	Morrison-Saunders e Pope, 2013
	2.3 A seleção de alternativas para o projeto deve ser realizada dentro dos limites estabelecidos para aspectos aceitáveis e negociáveis de sustentabilidade	Morrison-Saunders e Pope, 2013
3. Suporte ao processo decisório	3.1 É mandatório o atendimento de todos os requisitos e normas presentes na legislação	Byggeth e Hochschorner, 2006; Morrison-Saunders e Pope, 2013
	3.2 Todas as decisões devem estar alinhadas aos objetivos estratégicos da organização	Byggeth e Hochschorner, 2006
	3.3 Decisões para os <i>trade-offs</i> devem ser guiadas pelos resultados esperados, definidos em fases de pré-desenvolvimento de projeto	Morrison-Saunders e Pope, 2013
	3.4 Decisões devem ser baseadas na minimização ou acomodação de variabilidade do processo, a qual dificilmente pode ser eliminada	Gibson, 2006
	3.5 O desempenho adequado do produto ou serviço sustentável deve ser priorizada, ainda que em detrimento da adoção de soluções com baixo impacto ambiental	Morrison-Saunders e Pope, 2013

Figura 2.2 – Aspectos aceitáveis e negociáveis no gerenciamento de *trade-offs*



Fonte: adaptado de Morrison-Saunders; Pope (2013)

Para cada dimensão da tomada de decisão, os aspectos considerados aceitáveis são definidos e divididos em o que pode ou não ser negociado. Para tanto, a seleção dos aspectos que participam do gerenciamento de *trade-offs* é expressamente restrita àqueles estabelecidos como aceitáveis e negociáveis, excluindo-se as opções associadas aos aspectos considerados ‘não aceitáveis’ e ‘não negociáveis’.

2.3.1.3 Grupo 3 – Suporte ao processo decisório

No grupo três, são abordados os temas de apoio ao processo de tomada de decisão em diferentes etapas, considerando abordagens técnicas e gerenciais. As diretrizes enfatizam a importância de as escolhas estarem alinhadas às estratégias da organização, levando em consideração as expectativas sobre o seu desempenho. Nesse sentido, uma vez que fatores de sustentabilidade sejam introduzidos nos projetos, o apoio dos líderes é fundamental para o alcance dos objetivos traçados. Isso porque a inclusão desses fatores pode desencadear mudanças na visão organizacional; nas tarefas rotineiras do processo de projeto; na análise de custos (mudando o foco dos custos iniciais para os custos do ciclo de vida); no processo de aprendizagem da equipe do projeto; e na cultura organizacional.

Da mesma forma, o grupo de diretrizes enfatiza que, embora as decisões de projeto possam ser orientadas por fatores de sustentabilidade, essas não podem interferir negativamente no cumprimento dos requisitos de desempenho do produto. Nesse sentido, destaca-se que o projeto somente atingirá seus objetivos se for capaz de combinar os fatores de sustentabilidade, em suas diferentes dimensões, com o desempenho mínimo esperado e exigido do produto ou serviço.

2.3.2 Análises dos *trade-offs* de projeto

Com base nas diretrizes propostas, a segunda fase da TODeM trata da operacionalização do gerenciamento de *trade-offs*, a partir de cinco análises comparativas. Essas análises devem considerar os três princípios de gerenciamento de *trade-offs* apresentados na seção 3.1: estabelecimento de requisitos claros, priorização de requisitos por métodos multicritério e monitoramento de desempenho, com base nos critérios estabelecidos. Esses critérios têm origem nos requisitos de sustentabilidade que, por sua vez, se alinham aos objetivos do projeto. Por conseguinte, o método multicritério deve permitir a identificação das correlações positivas e negativas e do número e intensidade das relações entre requisitos e critérios. Tendo em vista que essas relações também refletem as conexões entre os critérios e objetivos do projeto, as análises comparativas realizadas buscam explicar o quanto a priorização de um determinado critério pode expressar o cumprimento dos objetivos de sustentabilidade do projeto como um todo.

As análises propostas pela ferramenta realizam sequencialmente a comparação entre características relacionadas aos objetivos conflitantes de cada par de critérios de sustentabilidade que compõem o *trade-off*. As análises comparativas, que são a essência dos *trade-offs* gerenciados pela ferramenta TODeM, são detalhadas nos subitens a seguir.

2.3.2.1 Análise #1 – Etapas de projeto relacionadas aos critérios de sustentabilidade

A primeira análise visa mapear as etapas do projeto às quais cada objetivo conflitante se relaciona. Dessa forma, é identificada a área de influência do objetivo nas etapas de desenvolvimento do projeto. Para o estabelecimento da área de influência do objetivo, deve-se analisar a relação entre as atividades pertencentes a cada etapa do projeto e os critérios a serem atendidos por essas atividades (de Magalhães et al., 2017).

2.3.2.2 Análise #2 – Etapas de ocorrência dos *trade-offs*

De forma sequencial, a segunda análise comparativa prossegue com a verificação da sobreposição entre as áreas de influência dos objetivos conflitantes, que foram identificadas na Análise # 1. Assim, o planejamento do desenvolvimento do projeto pode ser executado antecipando as ações que mitiguem os efeitos dos *trade-offs* identificados.

A frequência de ocorrência de *trade-offs* pode ser múltipla: localizada dentro da mesma etapa do projeto, na transição entre duas etapas ou mesmo em mais de uma etapa. Essa última, quando se manifesta, requer a replicação do par de objetivos conflitantes para cada etapa em que esses aparecem, bem como a realização de novas análises dos *trade-offs* que surgem em cada etapa individualmente. As análises replicadas podem levar a diversas definições de projetos no processo de decisão, resultando no atendimento a diferentes objetivos, dependendo do cenário em que cada *trade-off* se apresenta.

2.3.2.3 Análise #3 – Importância relativa dos critérios sustentáveis

A partir da terceira análise, a integração da ferramenta com o método multicritério torna-se mais evidente e necessária. Isso porque a Análise # 3 compara a importância relativa dos critérios aos objetivos conflitantes, destacando aqueles que possuem o maior valor associado a uma determinada característica.

A importância relativa dos critérios de sustentabilidade, independentemente do método adotado, é resultado da quantidade e da intensidade das relações estabelecidas entre esses critérios e os requisitos de projeto. Portanto, a comparação de importância relativa busca destacar o critério que mais impacta no atendimento dos objetivos do projeto, dentro do *trade-off* identificado.

2.3.2.4 Análise #4 – Relações fortes entre requisitos sustentáveis e critérios sustentáveis

Semelhante à Análise #3, a Análise #4 é baseada nos dados obtidos a partir da aplicação do método multicritério, realizando avaliações qualitativas e quantitativas das relações estabelecidas entre os requisitos e os critérios de sustentabilidade. De acordo com o método adotado, essas relações podem ser mais ou menos explícitas; no entanto, é fundamental que sua intensidade seja bem definida.

A quarta análise identifica, dentre todas as relações estabelecidas entre requisitos e critérios, aquelas que se destacam por estarem fortemente vinculadas. Com base nessa

identificação, os critérios-chave para a sustentabilidade do projeto são destacados. Os critérios-chave são capazes não apenas de influenciar, mas também de determinar, o cumprimento de requisitos específicos de projeto.

2.3.2.5 Análise #5 – Relações entre critérios sustentáveis e requisitos estratégicos

Na Análise #5, é avaliado o número de relacionamentos entre os critérios de sustentabilidade e os requisitos considerados estratégicos para o projeto. A definição de quais requisitos receberão essa classificação é determinada pela organização, de acordo com os objetivos estratégicos do negócio. Para a definição dos requisitos estratégicos, as seguintes alternativas podem ser utilizadas, levando-se em consideração a contribuição desses requisitos para o cumprimento do escopo do projeto:

- Melhoria do desempenho do produto ou serviço;
- Potencial do projeto para aumento dos níveis de inovação;
- Aumento da flexibilidade do processo de projeto;
- Redução dos custos do ciclo de vida do produto, quando aplicável;
- Aumento da qualidade ambiental do projeto;
- Fornecimento de soluções alternativas redundantes para a mesma finalidade (Ahern, 2011); e
- Ação em resposta aos riscos previamente identificados para o projeto.

2.3.3 Operacionalização do gerenciamento de *trade-offs*

Por fim, como forma de tornar as análises mais visuais e compreensíveis, sugere-se a utilização de uma planilha para operacionalização do gerenciamento de *trade-offs*, realizando comparações pareadas entre os objetivos conflitantes. Para os objetivos que envolvem *trade-offs* que ocorrem em mais de uma etapa de projeto, as análises devem ser realizadas com a frequência com que as sobreposições são identificadas. Após as análises, para cada um dos *trade-offs*, deve-se selecionar o objetivo a ser atendido e especificar a justificativa dessa escolha.

A fim de fornecer um melhor entendimento da operacionalização do gerenciamento de *trade-offs*, utilizamos um exemplo ilustrativo da aplicação da ferramenta em um projeto de sustentabilidade. O exemplo incluiu o desenvolvimento, por uma equipe multidisciplinar, de um projeto de edifício não residencial, que visa a certificação ambiental internacional pelo sistema *Leadership in Energy and Environmental Design*

(LEED). O projeto considerou a minimização de impactos relacionados à sustentabilidade econômica além da dimensão ambiental.

2.3.3.1 Escopo e objetivos de projeto

O projeto exemplo de edificação inclui seus projetos arquitetônicos, paisagísticos e de infraestrutura (pavimentação de áreas externas, drenagem, sistemas de água e esgoto), plano de gerenciamento de resíduos de construção, avaliação do custo do ciclo de vida do edifício (incluindo estratégias de eficiência energética), bem como a gestão ambiental da área (vegetação nativa existente). Devido às múltiplas disciplinas e dimensões envolvidas, esse foi projetado utilizando a ferramenta *Building Information Modeling* (BIM).

Além do cumprimento ao programa de requisitos, foram considerados como objetivos de sustentabilidade para o desenvolvimento do projeto: (a) melhoria da permeabilidade do solo; (b) a redução dos custos do ciclo de vida do edifício; (c) minimização de materiais tóxicos; (d) eficiência energética; (e) minimização de resíduos sólidos; (f) intervenção mínima na vegetação nativa existente; (g) redução do consumo de água. Esses objetivos foram relacionados aos critérios específicos do sistema LEED para novas construções (*Building design and construction*), de acordo com cada categoria de crédito.

2.3.3.2 Identificação de *Trade-offs*

Inicialmente, para a identificação dos *trade-offs*, os objetivos (relacionados à sustentabilidade ou não) foram associados às etapas de projeto em que deveriam ser definidos. Por exemplo, o objetivo de preservação da vegetação existente foi associado às etapas de estudos de viabilidade e de projeto básico; enquanto o objetivo de minimização de resíduos foi relacionado às etapas de projeto executivo e de execução. A partir dessas relações, foram identificados os objetivos que poderiam resultar em decisões conflitantes, mesmo quando relacionados a diferentes etapas do projeto. Essas decisões conflitantes constituem os *trade-offs* de projeto. Assim, a ferramenta TODeM pode fornecer uma visão abrangente das estratégias do projeto, a partir das primeiras decisões, considerando sua complexa rede de avaliações e mantendo o foco nos objetivos de sustentabilidade.

De acordo com os princípios para o emprego do TODeM, o método Fuzzy-AHP foi utilizado inicialmente para priorizar os objetivos do projeto nas dimensões de

sustentabilidade ambiental e econômica. Além da importância relativa fornecida pelo AHP, a lógica *Fuzzy* foi utilizada para identificar as relações entre os objetivos e os requisitos do projeto, os quais foram aplicados com auxílio do software MS Excel®. Os dados de priorização e as relações entre requisitos e objetivos foram inseridos nas colunas apropriadas na planilha para gerenciamento de *trade-offs*. Após a identificação dos *trade-offs*, as informações de maior relevância, associadas a cada objetivo de sustentabilidade conflitante, foram explicitadas, permitindo, assim, avaliações simultâneas pelos tomadores de decisão.

2.3.3.3 Planilha para operacionalização do gerenciamento de *trade-offs*

As comparações pareadas foram realizadas com o método AHP, considerando a escala de priorização de 1-3-5-7-9 (Saaty, 1977). Para tanto, os objetivos foram empregados para a montagem de duas matrizes, em que uma considera a probabilidade da inclusão do objetivo no escopo do projeto, e a outra considera o impacto de sua execução para atingir o objetivo fundamental do projeto (obtenção da certificação LEED). A Tabela 2.2 apresenta a definição da pontuação na escala de priorização utilizada para as matrizes de probabilidade e impacto.

Tabela 2.2 – Escala para priorização dos objetivos de projeto

PONTUAÇÃO	DESCRIÇÃO	
	MATRIZ DE PROBABILIDADE	MATRIZ DE IMPACTO
1 Igual importância	Igual probabilidade de os objetivos serem incluídos no escopo do projeto	Igual impacto relativo no cumprimento do objetivo fundamental do projeto
3 Pouco mais importante	Um dos objetivos é um pouco mais provável de ser incorporado ao projeto do que o outro	Um dos objetivos tem um impacto ligeiramente maior do que o outro no atendimento ao objetivo fundamental do projeto
5 Muito mais importante	Um dos objetivos tem uma probabilidade significativamente maior de ser incorporado ao projeto do que o outro	Um dos objetivos tem um impacto mais forte do que o outro no atendimento do objetivo fundamental do projeto
7 Importância demonstrada	Um dos objetivos tem uma probabilidade predominantemente maior de ser incorporado ao projeto do que o outro	Um dos objetivos tem um impacto predominantemente mais alto do que o outro no atendimento ao objetivo fundamental do projeto
9 Importância absoluta	Não há dúvida de que um dos objetivos tem muito mais probabilidade de ser incorporado ao projeto do que o outro	Não há dúvida de que um dos objetivos tem um impacto muito maior no atendimento do objetivo fundamental do projeto do que o outro

Nas linhas e nas colunas das matrizes, as letras a, b, c, d, e, f e g identificam os objetivos de sustentabilidade discutidos na seção 2.3.3.1. Cada célula da matriz indica a prioridade relativa da linha em relação à coluna. Por exemplo, a linha ‘a’, coluna ‘c’ na matriz de probabilidade indica que a probabilidade de incluir o objetivo a, em relação ao objetivo c é 3,00 na escala. Assim, a linha ‘c’, coluna ‘a’ tem o valor de 1/3. As matrizes normalizadas de probabilidade e de impacto foram obtidas dividindo cada componente da matriz original pela soma de sua coluna. Em seguida, os vetores de importância relativa foram compostos a partir das médias das linhas das matrizes normalizadas. As Figuras 2.3 e 2.4 apresentam as matrizes de probabilidade e de impacto, respectivamente, as quais foram compostas a partir da atribuição de escores de importância aos objetivos. Para ambas as matrizes, o índice de consistência (IC) de Saaty foi de 10%.

Figura 2.3 – Matrizes de Probabilidade

	a	b	c	d	e	f	g	
a	1,00	1/7	3,00	1/5	1/5	5,00	1/7	
b	7,00	1,00	7,00	3,00	5,00	9,00	3,00	
c	1/3	1/7	1,00	1/5	1/3	3,00	1/7	
d	5,00	1/3	5,00	1,00	3,00	7,00	1/3	
e	5,00	1/5	3,00	1/3	1,00	7,00	1/5	
f	1/5	1/9	1/3	1/7	1/7	1,00	1/9	
g	7,00	1/3	7,00	3,00	5,00	9,00	1,00	
	25,53	2,26	26,33	7,88	14,68	41,00	4,93	

	a	b	c	d	e	f	g	Vetor
a	0,04	0,06	0,11	0,03	0,01	0,12	0,03	0,06
b	0,27	0,44	0,27	0,38	0,34	0,22	0,61	0,36
c	0,01	0,06	0,04	0,03	0,02	0,07	0,03	0,04
d	0,20	0,15	0,19	0,13	0,20	0,17	0,07	0,16
e	0,20	0,09	0,11	0,04	0,07	0,17	0,04	0,10
f	0,01	0,05	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02
g	0,27	0,15	0,27	0,38	0,34	0,22	0,20	0,26

Figura 2.4 – Matrizes de Impacto

	a	b	c	d	e	f	g	
a	1,00	1/7	1/3	1/9	1/5	1/7	3,00	
b	7,00	1,00	7,00	1/3	5,00	3,00	9,00	
c	3,00	1/7	1,00	1/7	1/3	1/7	5,00	
d	9,00	3,00	7,00	1,00	7,00	5,00	9,00	
e	5,00	1/5	3,00	1/7	1,00	1/3	7,00	
f	7,00	1/3	5,00	1/5	3,00	1,00	7,00	
g	1/3	1/9	1/5	1/9	1/7	1/7	1,00	
	32,33	4,93	23,53	2,04	16,68	9,76	41,00	

	a	b	c	d	e	f	g	Vetor
a	0,03	0,03	0,01	0,05	0,01	0,01	0,07	0,03
b	0,22	0,20	0,30	0,16	0,30	0,31	0,22	0,24
c	0,09	0,03	0,04	0,07	0,02	0,01	0,12	0,06
d	0,28	0,61	0,30	0,49	0,42	0,51	0,22	0,40
e	0,15	0,04	0,13	0,07	0,06	0,03	0,17	0,09
f	0,22	0,07	0,21	0,10	0,18	0,10	0,17	0,15
g	0,01	0,02	0,01	0,05	0,01	0,01	0,02	0,02

Os vetores de importância relativa das matrizes de probabilidade e de impacto foram então multiplicados entre si, resultando na classificação final de importância relativa para os objetivos de sustentabilidade do projeto, conforme apresentado na Tabela 2.3.

Considerando que a importância relativa foi composta por dois fatores (probabilidade de inclusão no projeto e impacto no cumprimento do objetivo fundamental), em diversos *trade-offs*, o equilíbrio entre esses fatores em um dos objetivos foi altamente relevante para a sua seleção. No caso do objetivo ‘(b) redução dos custos do ciclo de vida da

edificação’, que ocupou o primeiro lugar na priorização, o valor obtido para a probabilidade foi superior ao objetivo ‘(d) eficiência energética’. Porém, para impacto, a pontuação do segundo objetivo foi maior do que a do primeiro. Como o objetivo ‘b’ possui características mais abrangentes para o escopo do projeto, sua probabilidade de inclusão foi considerada maior pelos respondentes.

Tabela 2.3 – Priorização dos objetivos e critérios de sustentabilidade

OBJETIVO	CRITÉRIO	IMPORTÂNCIA RELATIVA
b. Redução dos custos do ciclo de vida da edificação	Custos totais/custos de construção	0,0882
d. Eficiência energética	Consumo real de energia/previsão do consumo de energia	0,0636
e. Minimização de resíduos sólidos	Volume de resíduos de construção civil	0,0097
g. Redução do consumo de água	Consumo real de água/previsão do consumo de água	0,0054
f. Minimização de intervenção na vegetação existente	Número de espécies nativas suprimidas	0,0031
c. Minimização de materiais tóxicos	Concentração de COVs nos materiais de construção	0,0021
a. Aumento da permeabilidade do solo	Área permeável/Área construída	0,0019

Para os objetivos ‘(c) minimização de materiais tóxicos’ e ‘(a) aumento da permeabilidade do solo’, há uma relação inversa. O objetivo ‘c’ é menos provável de ser incluído no escopo do projeto, o que pode estar relacionado a questões de legislação (ocupação da terra), expressas no objetivo ‘a’. No entanto, o impacto do primeiro objetivo na sustentabilidade do projeto foi maior, levando à sua priorização. Por conseguinte, o cumprimento dos objetivos de sustentabilidade, mesmo que não exigidos pela legislação ambiental, pode ser relevante para o objetivo fundamental do projeto.

No entanto, é importante destacar que as pontuações de importância somente podem ser comparadas de forma relativa entre si, uma vez que não representam valores ordinais comparáveis em magnitude. Logo, não é possível afirmar que o objetivo ‘a’ é 1,4 vezes mais importante do que o objetivo ‘b’; mas sim que o primeiro objetivo é mais importante do que o segundo, principalmente, devido à sua maior probabilidade de inclusão no escopo do projeto.

Considerando o escopo dos objetivos de projeto, bem como aqueles relacionados à certificação LEED, a lógica *fuzzy* identificou a ocorrência de seis *trade-offs* de

sustentabilidade. A [Tabela 2.4](#) apresenta a planilha de operacionalização para o gerenciamento desses conflitos. Para as relações entre critérios e requisitos de sustentabilidade, o projeto considerou 52 requisitos de projeto, dos quais 20 eram estratégicos. Os requisitos estratégicos, neste exemplo, foram aqueles diretamente relacionados à pontuação mais alta dos critérios de certificação LEED almejada para o projeto. Após a identificação dos *trade-offs*, a primeira coluna a ser preenchida na planilha de operacionalização, bem como os primeiros dados a serem analisados no processo de seleção são as importâncias relativas dos critérios, calculadas na [Tabela 2.3](#).

Tabela 2.4 – Planilha para operacionalização do gerenciamento de *trade-offs*

Objetivos conflitantes	Descrição dos <i>trade-offs</i>	Etapas de projeto relacionadas aos critérios sustentáveis				Etapa de ocorrência do <i>trade-off</i>	Importância relativa dos critérios de sustentabilidade	Nº de relações fortes entre requisitos e critérios de sustentabilidade (52 requisitos)	Nº de relações entre critérios de sustentabilidade e requisitos estratégicos (20 requisitos)	Seleção (marque com um 'x')	Justificativa
		Estudos de viabilidade	Projeto básico	Projeto executivo	Execução						
1	Mínima intervenção na vegetação nativa	✓	✓			Estudos de viabilidade e Projeto básico	0,0031	6	3		Os benefícios ambientais da eficiência energética podem se refletir em longo prazo, considerando a fase de uso do edifício e sua infraestrutura.
	Eficiência energética	✓	✓				0,0636	35	20	X	
2	Redução dos custos do ciclo de vida			✓		Projeto executivo	0,0882	35	20		A contaminação por materiais tóxicos pode causar graves danos ambientais ao ecossistema, bem como à saúde dos trabalhadores. Além disso, os tratamentos de fim de vida desses materiais geralmente têm um custo mais elevado.
	Minimização do uso de materiais tóxicos			✓			0,0021	12	4	X	
3	Redução dos custos do ciclo de vida			✓	✓	Projeto executivo e Execução	0,0882	35	20		Devido às incertezas associadas aos custos do ciclo de vida das edificações, os benefícios do aumento da eficiência energética podem resultar na redução dos impactos ambientais e econômicos.
	Eficiência energética			✓	✓		0,0636	35	20	X	
4	Mínima intervenção na vegetação nativa		✓			Projeto Básico	0,0031	6	3		Medidas que incluem plantio e transplante podem compensar o manejo da vegetação. No entanto, os impactos da geração de resíduos têm mitigação ambiental complexa e de longo prazo.
	Minimização de resíduos sólidos		✓				0,0097	23	12	X	
5	Redução do consumo de água	✓	✓	✓	✓	Estudos de viabilidade, Projeto básico, Projeto executivo e Execução	0,0054	30	18	X	De acordo com as análises de alternativas de projeto, a redução do consumo de água pode impactar positivamente na melhoria da eficiência energética.
	Eficiência energética	✓	✓	✓	✓		0,0636	35	20		
6	Aumento da permeabilidade do solo					Transição: Projeto básico e Projeto Executivo	0,0019	7	10	X	Para este <i>trade-off</i> , aplicamos soluções de drenagem natural, associadas a um sistema de drenagem convencional, para melhorar a permeabilidade do solo e os custos de manutenção.
	Redução dos custos do ciclo de vida						0,0882	35	20	X	

LEGENDA

	Etapa a que o critério está relacionado		Etapa de ocorrência do <i>trade-off</i>		Ocorrência do <i>trade-off</i> na transição entre duas etapas		Valor selecionado
---	---	---	---	---	---	--	-------------------

2.3.3.4 Seleção e justificativa

Conforme apresentado na [Tabela 2.4](#), em diversos *trade-offs*, a seleção e a justificativa do objetivo a ser atendido estiveram diretamente relacionadas ao contexto do conflito. Por conseguinte, a TODeM apoia o processo de tomada de decisão a partir da avaliação complementar de cada resultado da MCDA, de forma estruturada, mas flexível. Quando o objetivo de eficiência energética esteve presente, por exemplo, a escolha dos tomadores de decisão foi, na maioria das vezes, de priorizá-lo (exceto no *trade-off* n°5). Esse objetivo não figurou como prioritário, entre todos os objetivos considerados. Porém, foi o que obteve o maior impacto relativo, o que demonstra sua importância para o alcance dos resultados do projeto. Complementarmente, a utilização da ferramenta proposta tornou possível a verificação das várias relações fortes entre eficiência energética e os requisitos de projeto (62%), os quais foram identificados pelo método Fuzzy. Isso porque o atendimento desse objetivo contribuiu de forma relevante para a obtenção da certificação ambiental exigida. A eficiência energética também esteve relacionada com todos os requisitos estratégicos (20 relações com os 20 requisitos estratégicos). Portanto, em diferentes *trade-offs*, esse foi o objetivo escolhido para atendimento, pelos tomadores de decisão, mesmo que obtendo menor importância relativa, quando comparado ao outro objetivo conflitante.

No *trade-off* n°1, a seleção do objetivo a ser atendido considerou as diretrizes do Grupo 2 da TODeM, relacionando que, embora a preservação da vegetação nativa se apresentasse como um objetivo essencial, a equipe do projeto poderia negociar o cumprimento desse objetivo em favor de outros benefícios ambientais (aspecto negociável). A justificativa dessa seleção também contribuiu com evidências para obtenção da pontuação desejada no sistema LEED e das devidas licenças ambientais. Como o *trade-off* ocorreu a partir dos Estudos de viabilidade, a seleção de alternativas de projeto poderia ser gerenciada desde as primeiras decisões, minimizando a necessidade de mudanças estruturais nas fases finais. No segundo *trade-off*, a diretriz n° 3.5 apoiou os tomadores de decisão ao destacar que, para obter o mesmo desempenho de projeto, o uso de materiais com menos substâncias tóxicas é preferível, ainda que com custos de aquisição mais altos. Assim, embora todos os valores associados às análises de um dos objetivos fossem superiores às dos demais objetivos, em uma visão sistêmica, priorizou-se o atendimento do segundo. Ainda em relação à importância da

visão sistêmica para as estratégias de projeto, o *trade-off* nº 3 foi composto por dois objetivos conflitantes com valores de análise semelhantes (ou iguais). Nesse sentido, as altas incertezas associadas aos dados do primeiro objetivo incentivam o atendimento do segundo objetivo pelos tomadores de decisão, de forma a mitigar os riscos da escolha.

A tomada de decisão no quarto *trade-off* foi associada à diretriz nº 1.4, que diz respeito à minimização da transferência de potenciais impactos negativos para o futuro. É importante ressaltar que, nesse *trade-off*, todos os valores de análise da planilha de operacionalização também apontaram para o atendimento ao objetivo de minimização de resíduos sólidos. Por outro lado, no *trade-off* nº 5, embora todos os valores orientassem o cumprimento do objetivo de eficiência energética, os tomadores de decisão optaram por priorizar o objetivo de redução do consumo de água. Isso porque ambos os objetivos estavam relacionados a todas as etapas do projeto, o que demonstra a existência de interdependências e sobreposições entre os critérios considerados; exigindo a adoção de soluções diversas em diferentes níveis do projeto. Por fim, no *trade-off* nº 6, a TODeM busca orientar um equilíbrio no atendimento de ambos os objetivos, em contraponto à falta de flexibilidade observada na adoção de uma solução ótima única. Esse *trade-off* ocorreu na transição entre duas etapas do projeto, indicando que as escolhas estavam associadas a diferentes níveis hierárquicos. Portanto, o processo de tomada de decisão considerou a composição de duas soluções, de forma que o melhor desempenho fosse obtido para o sistema, com os menores potenciais impactos ambientais e econômicos associados.

2.4 Discussões

2.4.1 Modelos existentes de *trade-offs* para o processo decisório

Diversos modelos para tratamento de *trade-offs* têm sido propostos na literatura, como mecanismos de apoio ao processo de tomada de decisão em contextos técnicos, econômicos, ambientais e sociais. Esses modelos são baseados em abordagens de maior ou menor complexidade em comparação com TODeM; com foco principal sobre a modelagem de cenários ou análise aprofundada de *trade-offs* específicos, relevantes para cada área do conhecimento.

Em estudos de desenvolvimento econômico, os modelos relacionados buscam uma solução ótima entre as opções de investimento de capital, considerando resultados de

modelagem *upstream* e aplicações de estruturas analíticas (Whang; Khan, 2017; Wang; Zang, 2018). Nos campos da química (Wang; Lin, 2018) e energia (Frew; Jacobson, 2016; Rosburg et al., 2016; Jin et al., 2018), o gerenciamento de *trade-offs* é abordado a partir de simulações computacionais de *trade-offs* específicos, a fim de encontrar soluções técnicas mais eficientes. Esses modelos são ainda aplicados à pesquisa agrícola (Valdivia et al., 2012; Coleman et al., 2017; Tian et al. 2018) e à pesquisa de saneamento básico (Jiang et al., 2018). Alguns modelos baseados em simulação também abordam a possível influência das preferências dos tomadores de decisão em cada processo (Franke et al., 2018; Ciccozzi, 2018; Turkelboom et al., 2018). Esses modelos podem ser considerados mais flexíveis do que aqueles baseados puramente em modelagem e simulação, uma vez que permitem adaptações a diferentes *trade-offs*.

Nesse contexto, Vahidi (2013) conclui que os modelos de gerenciamento de *trade-offs* existentes são de aplicabilidade prática limitada, uma vez que são formados por estruturas muito ou complexas ou muito simples (Clough et al., 2000), as quais podem restringir as informações fornecidas aos tomadores de decisão. Assim, métodos baseados em modelagem e análise de sensibilidade de parâmetros podem ser limitados em sua capacidade de lidar com questões sociais, políticas, ambientais e técnicas não normativas.

A ferramenta proposta neste estudo visa abordar as restrições de modelos existentes acima mencionadas. Por isso, as análises da TODeM são baseadas nas preferências dos tomadores de decisão, por consenso, associando essas preferências aos objetivos fundamentais de sustentabilidade dos projetos. Os objetivos de sustentabilidade, muitas vezes, com características conflitantes, podem introduzir *trade-offs* complexos para o projeto, as quais não podem ser tratadas a partir de soluções excessivamente simplistas ou utilizando modelos computacionais altamente automatizados. Por conseguinte, a TODeM fornece uma solução que se enquadra em uma solução intermediária, de forma a auxiliar no gerenciamento adequado de *trade-offs* para projetos de sustentabilidade.

2.4.2 O tratamento de *trade-offs* de sustentabilidade

As pesquisas que buscam traçar um caminho para o desenvolvimento sustentável, a partir da contribuição de projetos voltados para esse fim, têm sido centrados na influência dos resultados desses projetos para sociedade em diferentes contextos. Considerando que o estudo da sustentabilidade sob qualquer ponto de vista é altamente

complexo, e fortemente dependente do contexto, não há consenso na literatura sobre o que define um projeto como sustentável. O trabalho de [Marcelino-Sábada et al. \(2014\)](#), entretanto, apresenta uma consideração relevante de que nenhum projeto é capaz de produzir resultados sustentáveis se não estiver contido em um processo no qual as características de sustentabilidade estejam explícitas. Por isso, existem diversas lacunas a serem preenchidas no campo dos projetos de sustentabilidade, ainda que o tema seja amplamente discutido. Diferentes pesquisas têm se dedicado a propor *frameworks* para avaliação de projetos sustentáveis, apoiados em seu processo de gestão, principalmente a partir da determinação de indicadores de desempenho ([Sánchez, 2015](#)). De forma mais ampla, destaca-se ainda o desenvolvimento de *frameworks* que apoiam a integração dos fatores de sustentabilidade em projetos, a nível organizacional, considerando o contexto interno e externo das relações estabelecidas entre os *stakeholders* ([Morioka; De Carvalho, 2016](#)). Alguns autores abordam a sustentabilidade de projetos a partir da definição de critérios para o desenvolvimento de produtos, conforme proposto por [Hallstedt \(2017\)](#). Embora estudos dessa natureza considerem outras abordagens, não consideradas neste estudo, seus resultados possuem alta relevância para a pesquisa em gestão de projetos de sustentabilidade. Isso porque as análises do desenvolvimento de produtos sustentáveis agregam condições importantes na orientação do processo de projeto. Essas condições contribuem para o processo como um todo, visto que o produto não terá um desempenho de sustentabilidade adequado se não tiver se originado em um projeto desenvolvido e gerenciado com base em tal objetivo ([Prendeville et al., 2017](#)).

Assim sendo, devido à complexidade e à interdependência de fatores determinantes, as avaliações de projetos de sustentabilidade frequentemente possuem limites amplos e pouco definidos; resultando em um processo de tomada de decisão altamente subjetivo ([Zhang et al., 2016](#)). Logo, o gerenciamento de *trade-offs* apoia a definição dos limites do sistema, principalmente devido à consideração das relações-chave entre os fatores que influenciam a sustentabilidade do projeto. Nesse sentido, busca-se estabelecer a origem e as possíveis consequências relacionadas aos conflitos identificados. Apesar da importância do tratamento de *trade-offs* de sustentabilidade, poucos estudos focam nesse aspecto do processo de tomada de decisão. Dentre eles, pode-se destacar o *framework* proposto por [Morrison-Saunders e Pope \(2013\)](#), o qual relaciona o gerenciamento de *trade-offs* a avaliações de sustentabilidade.

Nos projetos-alvo desta pesquisa, diferentes tipos de *trade-offs* podem surgir, devido aos requisitos de cada cenário. No entanto, o conflito entre a necessidade de redução de custos e a busca pela minimização dos impactos ambientais é recorrente na literatura (Karatas; El-Rayes, 2015; Umer et al., 2017). Os *trade-offs* que ocorrem entre a melhoria do desempenho técnico do produto ou serviço e a redução dos danos ambientais e sociais relacionados também são frequentes (Byggeth; Hochschorner, 2006). Assim, sempre que o processo de tomada de decisão incluir *trade-offs* com as características acima mencionadas, deverá ser dada especial atenção a esses, de forma a que seja efetuada a seleção adequada dos objetivos a serem atendidos (Tabela 2.4).

Ao aplicar a TODeM, outras implicações relevantes para o gerenciamento de *trade-offs* em projetos de sustentabilidade são consideradas. As análises sequenciais realizadas com TODeM buscam reduzir a sobreposição da área de influência dos objetivos do projeto, sem prejudicar o desempenho final pretendido. Dessa forma, quanto mais evidentes forem os objetivos fundamentais, mais estruturadas serão as análises e mais fundamentadas as decisões. Outro aspecto importante da aplicação da ferramenta é a observação de quantas etapas de projeto estão associadas a um mesmo objetivo, independentemente da comparação desse com outros objetivos. Embora essa análise não seja explícita na fase de operacionalização, sua observação pode justificar a escolha pelo atendimento de um objetivo específico que compõe o *trade-off*. Isso está relacionado ao fato de que se o objetivo estiver presente em mais de uma etapa, pode ter uma influência relevante em diversas atividades de projeto e, conseqüentemente, em um número extenso de decisões. Também é importante verificar que, quando os *trade-offs* ocorrem em mais de uma etapa do projeto (conforme exemplificado no *trade-off* nº 5 da Tabela 2.4), maior complexidade é agregada à decisão. Para esses casos, a operacionalização sugere que os *trade-offs* em cada nível sejam analisados individualmente, de forma que objetivos distintos possam ser privilegiados, dependendo do contexto de análise de cada etapa do projeto. Assim, diferentes objetivos conflitantes podem ser selecionados para cada um dos estágios sobrepostos (conforme exemplificado no *trade-off* nº 6 da Tabela 2.4). Por fim, é importante destacar que a operacionalização proposta pela TODeM pretende contribuir tão somente para a estruturação e a orientação do processo decisório no gerenciamento de *trade-offs*; e não fornecer uma solução pronta para tais conflitos. Portanto, ainda que todos os dados

analisados apontem para o atendimento de determinado objetivo, outro pode ser privilegiado, dependendo das características do projeto, do perfil de risco dos tomadores de decisão e do posicionamento técnico e estratégico da organização. A escolha ocorre dessa forma, visto que a justificativa para tal pode estar associada tanto à seleção quanto à exclusão do atendimento aos objetivos. Por esse motivo, a coluna 'justificativa' foi proposta na planilha de operacionalização, permitindo a documentação adequada e o acompanhamento dos motivos que levaram à seleção ou exclusão dos objetivos pelos tomadores de decisão.

2.4.3 Contribuições da TODeM

Os modelos de *trade-offs* existentes na literatura são baseados em duas abordagens principais: (i) mapeamento do processo de formação e identificação de *trade-offs* em diferentes contextos; e (ii) desenvolvimento de modelagens e de simulações para encontrar soluções ótimas na ocorrência de *trade-offs* específicos. Esses modelos podem ser considerados limitados, quando aplicados em contextos de sustentabilidade, devido aos altos níveis de complexidade e subjetividade dos conflitos existentes entre os objetivos de tais projetos. Por esse motivo, em projetos de sustentabilidade, as abordagens propostas são mais frequentemente baseadas nas melhores práticas para os tomadores de decisão, após a identificação dos *trade-offs*, e não em modelos restritos, projetados para encontrar uma solução ótima. Assim, a ferramenta TODeM pretende se apresentar como uma estrutura de orientação, aplicada à gestão de projetos de sustentabilidade, em termos operacionais. Isso aumenta a consistência dos resultados de tais projetos com as preferências dos tomadores de decisão, fornecendo soluções que conduzem ao atendimento dos objetivos previamente estabelecidos. Nesse sentido, a ferramenta também pode apoiar a operacionalização de outros métodos como a *Life Cycle Sustainability Assessment* (LCSA), a qual, segundo [Petit-Boix et al. \(2017\)](#), encontra dificuldades para aplicação prática, devido à alta complexidade do processo de tomada de decisão, envolvendo as três dimensões da sustentabilidade.

Por outro lado, o presente trabalho contribui, por meio da ferramenta proposta, para a maior robustez da tomada de decisão nesses projetos, ao conferir maior objetividade e rastreabilidade às escolhas. A consideração das diretrizes apresentadas na primeira fase da ferramenta tem implicações práticas para os gerentes de projeto. Isso porque as diretrizes buscam aumentar a compreensão da influência das escolhas no desempenho

técnico, ambiental, social e econômico do empreendimento. Uma maior compreensão da influência das decisões reduz as incertezas no processo de tomada de decisão, contribuindo para a seleção mais precisa de soluções voltadas para os objetivos do projeto.

Por fim, a operacionalização, materializada na segunda fase da TODeM, direciona as decisões para o que é considerado, efetivamente, como mais importante no contexto de análise, com base na visão de valor dos *stakeholders*. Conseqüentemente, com a integração das duas fases propostas - diretrizes e operacionalização - a ferramenta TODeM apresenta-se como uma estrutura objetiva para apoiar análises de múltiplos fatores, necessárias para o gerenciamento de *trade-offs* em projetos de sustentabilidade.

2.5 Considerações finais

A pesquisa desenvolvida neste estudo propôs uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão em projetos complexos de sustentabilidade, com foco no gerenciamento de *trade-offs*, atuando na etapa de planejamento da gestão de projetos. O emprego da ferramenta pressupõe a aplicação prévia de um método multicritério, que definirá os requisitos e critérios a serem atendidos. Assim, a TODeM se estrutura em duas fases, em que a primeira considera diretrizes, previamente definidas, para o gerenciamento de *trade-offs*; enquanto a segunda fase se desenvolve em uma sequência de análises comparativas entre os objetivos conflitantes identificados.

Apesar de seu potencial de aplicabilidade, a ferramenta proposta pode ser refinada e complementada por outros estudos. Como continuação desta pesquisa, são sugeridas as seguintes oportunidades para estudos futuros: (i) desenvolvimento de métodos para monitorar os impactos associados às decisões implementadas, com base no uso da TODeM; (ii) aplicação da TODeM em projetos diversos de sustentabilidade; (iii) melhoria na estrutura da ferramenta a fim de fornecer refinamento para seu uso em diferentes tipos de projetos com foco na sustentabilidade; e (iv) adaptação da ferramenta para estudos aprofundados de avaliação de impacto ambiental de produtos e serviços, como aqueles que utilizam a abordagem de LCA.

Os *trade-offs* são considerados inerentes a qualquer projeto de sustentabilidade, principalmente em cenários complexos, em que os caminhos para atingir o objetivo dependem de múltiplos fatores. Por conseguinte, o gerenciamento inadequado de *trade-*

offs em projetos com esse perfil pode resultar em desempenho inferior ao esperado ou no fracasso do projeto. No entanto, o tratamento dos *trade-offs* associados à sustentabilidade ainda é pouco explorado na literatura; e quando abordado, geralmente, não considera um mecanismo de apoio ao processo de tomada de decisão, mesmo que tenha potencial relevante para tal. Em contraste, os *trade-offs* são frequentemente analisados a partir de uma perspectiva de risco para serem mitigados, em vez de uma oportunidade para otimização das soluções de projeto.

Portanto, as ferramentas propostas para o gerenciamento *de trade-offs* devem ser capazes de considerar todo o contexto de sustentabilidade no qual os *trade-offs* estão inseridos. Isso permite um processo de tomada de decisão estruturado e menos restrito. Dessa forma, o equilíbrio entre o cumprimento de diferentes objetivos, sem prejudicar o desempenho, alcançado por meio do gerenciamento adequado de *trade-offs*, pode ser um aspecto fundamental para projetos de sustentabilidade efetivos.

Referências

- AGUDO-VALIENTE, J.M., GARCÉS-AYERBE, C., SALVADOR-FIGUERAS, M. Corporate Social Performance and Stakeholder Dialogue Management. **Corporate Social Responsibility Environmental Management**, v. 22, p. 13–31, 2015.
- AHERN, J. From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world. **Landscape and Urban Planning**, v. 100, p. 341-343, 2011.
- ALBERTI, M. Measuring urban sustainability. **Environmental Impact Assessment Reviews**, v. 16, p. 381-424, 1996.
- ALBERTI, M. **Cities that think like planets: complexity, resilience, and innovation in hybrid ecosystems**. Seattle: University of Washington Press, 2016.
- ALI-TOUDERT, F.; JI, L. Modeling and measuring urban sustainability in multi-criteria based systems e a challenging issue. **Ecological Indicators**, v. 73, p. 597-611, 2017.
- ARENA, M., CICERI, N.D., TERZI, S., BENGIO, I., AZZONE, G., GARETTI, M. A state-of-the-art of industrial sustainability: definitions, tools and metrics. **International Journal of Product Lifecycle Management**, v. 4, p. 207–251, 2009.
- ARUSHANYAN, Y., EKENER-PETERSEN, E., FINNVEDEN, G. Lessons learned - Review of LCAs for ICT products and services. **Computers in Industry**, v. 65, p. 211–234, 2014.
- BARTKE, S., SCHWARZE, R. No perfect tools: Trade-offs of sustainability principles and user requirements in designing support tools for land-use decisions between greenfields and brownfields. **Journal of Environmental Management**, v. 153, p. 11–24, 2015.

BRAGANÇA, L., MATEUS, R., KOUKKARI, H. Building sustainability assessment. **Sustainability**, v. 2, p. 2010–2023, 2010.

BRONES, F., DE CARVALHO, M.M., DE SENZI ZANCUL, E. Ecodesign in project management: A missing link for the integration of sustainability in product development? **Journal of Cleaner Production**, v. 80, p. 106–118, 2014.

BYGGETH, S., HOCHSCHORNER, E. Handling trade-offs in Ecodesign tools for sustainable product development and procurement. **Journal of Cleaner Production**, v. 14, p. 1420–1430, 2006.

CALIK, E., BARDUDEEN, F. A Measurement Scale to Evaluate Sustainable Innovation Performance in Manufacturing Organizations. **Procedia CIRP**, v. 40, p. 449–454, 2016.

CALLISTUS, T., CLINTON, A. Evaluating barriers to effective implementation of project monitoring and evaluation in the Ghanaian construction industry. **Procedia Engineering**, v. 164, p. 389–394, 2016.

CHOW, J.F., SAVIĆ, D., FORTUNE, D., KAPELAN, Z., MEBRATE, N. Using a systematic, multi-criteria decision support framework to evaluate sustainable drainage designs. **Procedia Engineering**, v. 70, p. 343–352, 2014.

CINELLI, M., COLES, S.R., KIRWAN, K. Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. **Ecological Indicators**, v. 46, p. 138–148, 2014.

CLOUGH, R.H.; SEARS, G.A.; SEARS, S.K. **Construction Project Management**, John Wiley & Sons Inc., Canada, 2000.

COLEMAN, K., MUHAMMED, S.E., MILNE, A.E., TODMAN, L.C., DAILEY, A.G., GLENDINING, M.J., WHITMORE, A.P. The landscape model: A model for exploring trade-offs between agricultural production and the environment. **Science of the Total Environment**, v. 609, p. 1483–1499, 2017.

CRAWFORD, L., POLLACK, J. Hard and soft projects: A framework for analysis. **International Journal of Project Management**, v. 22, p. 645–653, 2004.

DA SILVEIRA, G., SLACK, N. Exploring the trade-off concept. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 21, p. 949–961, 2001.

DE MAGALHÃES, R.F., DANILEVICZ, A.M.F., SAURIN, T.A. Reducing construction waste: A study of urban infrastructure projects. **Waste Management**, v. 67, p. 265–277, 2017.

DE VILLIERS, C., ROUSE, P., KERR, J. A new conceptual model of influences driving sustainability based on case evidence of the integration of corporate sustainability management control and reporting. **Journal of Cleaner Production**, v. 136, p. 78–85, 2016.

DHAR, T.K., KHIRFAN, L. A multi-scale and multi-dimensional framework for enhancing the resilience of urban form to climate change. **Urban Climate**, v. 19, p. 72–91, 2017.

DYLLICK T.; HOCKERTS, K. Beyond the business case for corporate sustainability. **Business Strategies Environmental**, v. 11, p. 130-141, 2002.

EGILMEZ, G., GUMUS, S., KUCUKVAR, M. Environmental sustainability benchmarking of the U.S. and Canada metropolises: An expert judgment-based multi-criteria decision making approach. **Cities**, v. 42, p. 31–41, 2015.

ELKINGTON, J. Triple bottom line revolution; reporting for the third millennium. **Australian CPA**, v. 69, p. 75-76, 1999.

ENGERT, S., RAUTER, R., BAUMGARTNER, R.J. Exploring the integration of corporate sustainability into strategic management: A literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2833–2850, 2016.

FANTINATTI, P.A.P., FERRÃO, A.M.A., ZUFFO, A.C. **Indicadores de sustentabilidade em engenharia**: como desenvolver. Elsevier, Rio de Janeiro, 2015.

FRANKE, U., CICCOCCHI, F. Characterization of trade-off preferences between non-functional properties. **Information Systems**, v. 74, p. 86–102, 2018.

FREW, B.A., JACOBSON, M.Z. Temporal and spatial tradeoffs in power system modeling with assumptions about storage: An application of the POWER model. **Energy**, v. 117, p. 198–213, 2016.

GARCIA, S., CINTRA, Y., TORRES, R. DE C.S.R., LIMA, F.G. Corporate sustainability management: a proposed multi-criteria model to support balanced decision-making. **Journal of Cleaner Production**, v. 136, p. 181–196, 2016.

GIBSON, R.B. Sustainability assessment: basic components of a practical approach. **Impact Assessment and Project Appraisal**, v. 24 (3), p. 170-182, 2006.

GLAVIČ, P., LUKMAN, R. Review of sustainability terms and their definitions. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, p. 1875–1885, 2007.

HÄFLIGER, I.-F., JOHN, V., PASSER, A., LASVAUX, S., HOXHA, E., SAADE, M.R.M., HABERT, G. Buildings environmental impacts' sensitivity related to LCA modelling choices of construction materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 156, p. 805–816, 2017.

HALLSTEDT, S.I. Sustainability criteria and sustainability compliance index for decision support in product development. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 251–266, 2017.

HOLLING, C.S. Resilience and Stability of Ecological Systems. **Annual Review of Ecological and Systematics**, v. 4, p. 1–23, 1973.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Environmental Management. Life Cycle Assessment**. Principles and Framework. International Standard ISO 14040, Geneva, 1997.

IRALDO, F., FACHERIS, C., NUCCI, B. Is product durability better for environment and for economic efficiency? A comparative assessment applying LCA and LCC to two energy-intensive products. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 1353–1364, 2017.

JIANG, Y., DINAR, A., HELLEGERS, P. Economics of social trade-off: Balancing wastewater treatment cost and ecosystem damage. **Journal of Environmental Management**, v. 211, p. 42–52, 2018.

JIN, S.W., LI, Y.P., XU, L.P. Development of an integrated model for energy systems planning and carbon dioxide mitigation under uncertainty – Tradeoffs between two-level decision makers. *Environmental Research*, v. 164, p. 367–378, 2018.

KAMALI, M., HEWAGE, K. Development of performance criteria for sustainability evaluation of modular versus conventional construction methods. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 3592–3606, 2017.

KANG, H., LEE, Y., KIM, S. Sustainable building assessment tool for project decision makers and its development process. *Environmental Impact Assessment Reviews*, v. 58, p. 34–47, 2016

KARATAS, A., EL-RAYES, K. Optimizing tradeoffs among housing sustainability objectives. *Automation Construction*, v. 53, p. 83–94, 2015

KERZNER, H. **Project Management – Best Practices: achieving global excellence**, third ed. Wiley, Hoboken, New Jersey, 2014.

KHALILI, N.R., DUECKER, S. Application of multi-criteria decision analysis in design of sustainable environmental management system framework. **Journal of Cleaner Production**, v. 47, 188–198, 2013.

KHOSHNAVA, S.M., ROSTAMI, R., VALIPOUR, A., ISMAIL, M., RAHMAT, A.R. Rank of green building material criteria based on the three pillars of sustainability using the hybrid multi criteria decision making method. **Journal of Cleaner Production**, p. 1–18, 2016.

KIRIDENA, S.; SENSE, A. Profiling Project Complexity: Insights from Complexity Science and Project Management Literature. **Project Management Journal**, v. 47(6), p. 56-74, 2016

LABUSCHAGNE, C., BRENT, A.C. Sustainable Project Life Cycle Management: The need to integrate life cycles in the manufacturing sector. **International Journal of Project Management**, v. 23, p. 159–168, 2005.

LAMÉ, G., LEROY, Y., YANNOU, B. Ecodesign tools in the construction sector: Analyzing usage inadequacies with designers' needs. **Journal of Cleaner Production**, v. 148, 60–72, p. 2017.

MALETIČ, M., MALETIČ, D., DAHLGAARD, J.J., DAHLGAARD-PARK, S.M., GOMIŠČEK, B. Sustainability exploration and sustainability exploitation : from a literature review towards a conceptual framework. **Journal of Cleaner Production**, v. 79, p. 182–194, 2014.

- MARCELINO-SÁDABA, S., GONZÁLEZ-JAEN, L.F., PÉREZ-EZCURDIA, A. Using project management as a way to sustainability. from a comprehensive review to a framework definition. **Journal of Cleaner Production**, v. 99, p. 1–16, 2015.
- MEDINECKIENE, M., ZAVADSKAS, E.K., BJÖRK, F., TURSKIS, Z. Multi-criteria decision-making system for sustainable building assessment/certification. **Archives of Civil and Mechanic Engineering**, v. 15, p. 11–18, 2015.
- MEEROW, S.; NEWELL, J.P.; STULTS, M. Defining urban resilience: A review. **Landscape and Urban Planning**, v. 147, p. .38-49, 2016.
- MODAK, M., PATHAK, K., GHOSH, K.K. Performance evaluation of outsourcing decision using a BSC and Fuzzy AHP approach: A case of the Indian coal mining organization. **Resources Policy**, v. 52, p. 181–191, 2017.
- MORIOKA, S.N., DE CARVALHO, M.M. A systematic literature review towards a conceptual framework for integrating sustainability performance into business. **Journal of Cleaner Production**, v. 136, p. 134–146, 2016.
- MORRISON-SAUNDERS, A.; POPE, J. Conceptualising and managing trade-offs in sustainability assessment. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 38, p. 54e6, 2013.
- MUNDA, G. Measuring sustainability: A multi-criterion framework. **Environment, Development, and Sustainability**, v. 7, p. 117–134, 2005.
- MUNDA, G. Social multi-criteria evaluation for urban sustainability policies. **Land use policy**, v. 23, p. 86–94, 2006.
- NIELSEN, A.N.; JENSEN, R.L.; LSARSEN, T.S.; NISSEN, S.B. Early stage decision support for sustainable building renovation – A review. **Building and Environment**, v. 103, p. 165-181, 2016.
- OLAZABAL, M., PASCUAL, U. Use of fuzzy cognitive maps to study urban resilience and transformation. **Environmental Innovation and Social Transitions**, v. 18, p. 18–40, 2016.
- PEARCE, A. R. Sustainable capital projects: leapfrogging the first cost barrier. **Civil Engineering and Environmental Systems**, v. 25, p. 291-300, 2008.
- PETIT-BOIX, A., LLORACH-MASSANA, P., SANJUAN-DELMÁS, D., SIERRA-PÉREZ, J., VINYES, E., GABARRELL, X., RIERADEVALL, J., SANYÉ-MENGUAL, E. Application of life cycle thinking towards sustainable cities: A review. **Journal of Cleaner Production**, v.166, p. 939–951, 2017.
- PLEVIN, R.J., DELUCCHI, M. A., CREUTZIG, F. Using Attributional Life Cycle Assessment to Estimate Climate-Change Mitigation Benefits Misleads Policy Makers. **Journal of Industrial Ecology**, v. 18(1), p. 73–83, 2013.
- POHEKAR, S.D., RAMACHANDRAN, M. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning - A review. **Renewable and Sustainable Energy Review**, v. 8, p. 365–381, 2004.

PRENDEVILLE, S.M., O'CONNOR, F., BOCKEN, N.M.P., BAKKER, C. Uncovering ecodesign dilemmas: A path to business model innovation. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 1327–1339, 2017.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. **A Guide to the Project Management Body of Knowledge** (PMBOK Guide), forth ed. PMI Publications, Newtown Square, 2008.

PRZYCHODZEN, W., PRZYCHODZEN, J. Sustainable innovations in the corporate sector – The empirical evidence from IBEX 35 firms. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 3557-3566, 2017.

ROSBURG, A., MIRANOWSKI, J., JACOBS, K. Modeling biomass procurement tradeoffs within a cellulosic biofuel cost model. **Energy Economics**, v. 58, p. 77–83, 2016.

ROSSI, M., GERMANI, M., ZAMAGNI, A. Review of ecodesign methods and tools. Barriers and strategies for an effective implementation in industrial companies. **Journal of Cleaner Production**, v. 129, p. 361–373, 2016.

ROUSSEAU, P., GREMY-GROS, C., BONNIN, M., HENRIEL-RICORDEL, C., BERNARD, P., FLOURY, L., STAIGRE, G., VINCENT, P. “Eco-tool-seeker”: A new and unique business guide for choosing ecodesign tools. **Journal of Cleaner Production**, v. 151, p. 546–577, 2017.

SAATY, T.L. A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 15, p. 234-281, 1977.

SÁNCHEZ, M.A. Integrating sustainability issues into project management. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p. 319–330, 2015.

SANTOS, M.K., DANILEVICZ, A.M.F., TUBINO, R.M.C. Environmental service providers assessment: A multi-criteria model applied to industrial waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 159, p. 374–387, 2017.

SILVIUS, A.J.G., KAMPINGA, M., PANIAGUA, S., MOOI, H. Considering sustainability in project management decision making; An investigation using Q-methodology. **International Journal of Project Management**, v. 35, p. 1133–1150, 2017.

SNOWDEN, D.J., BOONE, M.E. A Leader's Framework for Decision Making. **Harvard Business Review**, v. 85, p. 68–76, 2007.

TIAN, Z., NIU, Y., FAN, D., SUN, L., FICSHER, G., ZHONG, H., DENG, J., TUBIELLO, F.N. Maintaining rice production while mitigating methane and nitrous oxide emissions from paddy fields in China: Evaluating tradeoffs by using coupled agricultural systems models. **Agricultural Systems**, v. 159, p. 175–186, 2018.

TURKELBOOM, F., LEONE, M., JACOBS, S., KELEMEN, E., GARCÍA-LLORENTE, M., BARÓ, F., TERMANSEN, M., BARTON, D.N., BERRY, P., STANGE, E., THOONEN, M., KALÓCZKAI, Á., VADINEANU, A., CASTRO, A.J., CZÚCZ, B., RÖCKMANN, C., WURBS, D., ODEE, D., PREDA, E., GÓMEZ-

BAGGETHUN, E., RUSCH, G.M., MARTÍNEZ, G., PALOMO, I., DICK, J., CASAER, J., DIJK, J. VAN, PRIESS, J.A., LANGEMEYER, J., MUSTAJOKI, J., KOPPEROINEN, L., BAPTIST, M.J., LUIS, P., MUKHOPADHYAY, R., ASZALÓS, R., ROY, S.B., LUQUE, S., RUSCH, V. When we cannot have it all: Ecosystem services trade-offs in the context of spatial planning. **Ecosystem Services**, v. 29, p. 566–578, 2018.

UMER, A., HEWAGE, K., HAIDER, H., SADIQ, R. Sustainability evaluation framework for pavement technologies: An integrated life cycle economic and environmental trade-off analysis. **Transportation Research Part D – Transport and Environment**, v. 53, p. 88–101, 2017.

UNITED NATIONS. **Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future**, 1987.

UNITED NATIONS. **Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development**. <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>, 2015.

VAHIDI, R. Do Tradeoff Models Have What it Takes to Make a Real Tradeoff? **Procedia – Social and Behavioral Science**, v. 74, p. 71–80, 2013.

VALDIVIA, R.O., ANTLE, J.M., STOOORVOGEL, J.J. Coupling the Tradeoff Analysis Model with a market equilibrium model to analyze economic and environmental outcomes of agricultural production systems. **Agricultural Systems**, v. 110, p. 17–29, 2012.

VARMAZYAR, M., DEHGHANBAGHI, M., AFKHAMI, M. A novel hybrid MCDM model for performance evaluation of research and technology organizations based on BSC approach. **Evaluation and Program Planning**, v. 58, p. 125–140, 2016.

ZHANG, L.; XU, Y.; YEH, C.H.; LIU, Y.; ZHOU, D. City sustainability evaluation using multi-criteria decision making with objective weights of interdependent criteria. **Journal of Cleaner Production**, v. 131, p. 491-499, 2016.

WANG, L., LIN, S. Intrinsic tradeoff between kinetic and energetic efficiencies in membrane capacitive deionization. **Water Research**, v. 129, p. 394–401, 2018.

WANG, X.; ZHANG, J. Beyond the Quantity-Quality tradeoff: Population control policy and human capital investment. **Journal of Development Economics**, v. 135, p. 222-234, 2018.

WANG, Z., KHAN, M.M. Market states and the risk-return tradeoff. **The Quarterly Review of Economics and Finance**, v. 65, p. 314–327, 2017.

WIDEMAN, R.M. **A framework for Project and Program Management Integration**, PMI, Upper Darby, 1991.

WILLIAMS, T.M. The need for new paradigms for complex projects. *International Journal of Project Management*, v. 17(5), p. 269–273, 1999.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os efeitos das mudanças climáticas sobre o ambiente urbano têm demandado mudanças profundas no planejamento das cidades, conectando necessidades econômicas e sociais às consequências da atividade humana sobre as alterações no clima. Por essa razão, há a premência para que o planejamento urbano considere fatores múltiplos, que impactam diretamente a ação climática global, tais como o uso de recursos energéticos. Assim, este estudo teve como objetivo geral desenvolver uma abordagem metodológica para o adequado gerenciamento de *trade-offs* de sustentabilidade e de resiliência urbana, como apoio ao planejamento à transição para economias de baixo carbono. Esse objetivo foi explorado a partir de três artigos, os quais escalonaram as temáticas que permeiam o tema principal da pesquisa. Dessa forma, os artigos que compõem a tese se dedicaram a compreender, de forma gradualmente mais aprofundada, os mecanismos relacionados ao gerenciamento de *trade-offs* no processo decisório para o planejamento de economias urbanas de baixo carbono.

Devido à complexidade dos *trade-offs* em sustentabilidade, esses foram estudados a partir de duas abordagens metodológicas distintas, nos dois primeiros artigos: análises por métodos multicritério e avaliações do ciclo de vida. No terceiro artigo, essa investigação foi integrada à análise de *trade-offs* entre características sustentáveis e resilientes dos sistemas elétricos urbanos, conforme apresentado a seguir.

O Artigo 1 (Capítulo 2) iniciou com a compreensão da temática que orienta a tese, por isso, o estudo foi baseado em métodos mistos. O artigo teve como objetivo a proposição de uma ferramenta de suporte ao gerenciamento de *trade-offs* no processo decisório de projetos complexos, focados em sustentabilidade. Para tanto, explorou a literatura de base a essa temática, compreendendo os principais desafios e oportunidades para obtenção de um equilíbrio entre objetivos sustentáveis de projeto. Para esse entendimento, foi aplicado um estudo de caso hipotético, o qual contribuiu para análise das potencialidades da ferramenta desenvolvida, na prática do processo decisório gerencial. Além disso, os resultados do artigo evidenciaram a complexidade do gerenciamento de *trade-offs* em projetos de sustentabilidade, explicitando a necessidade de que essa temática fosse estudada a partir de técnicas robustas comparativas. No Artigo 1, foi empregado método multicritério para a análise inicial, o qual, apesar de

suas limitações, prestou-se ao objetivo de investigação ampla do tratamento de *trade-offs* nesse contexto.

Por conseguinte, no Artigo 2 (Capítulo 3), os estudos de *trade-offs* de sustentabilidade foram aprofundados para compreensão dos conflitos existentes no ciclo de vida de projetos elétricos urbanos, enquanto agentes motores da transição energética nas cidades. O Artigo 2 objetivou analisar a influência de escolhas organizacionais em fontes energéticas, para a sustentabilidade urbana, baseado em técnicas comparativas de *Life Cycle Management* (LCM). Dessa forma, o artigo procurou apoiar a compreensão do papel de consumidores livres para impulsionar políticas energéticas regionais e nacionais de fomento a fontes renováveis. No estudo, as fontes energéticas apresentaram comportamentos variados em relação ao seu desempenho ambiental e econômico do ciclo de vida, tornando complexo o processo decisório para sua seleção. O estudo analisou, ainda, os padrões de disponibilidade das fontes empregadas, fornecendo subsídios, de naturezas distintas, a serem ponderados pelos gestores e tomadores de decisão. Os resultados do trabalho foram analisados a partir de um mecanismo de gestão visual, o qual pode ser adaptado a diferentes contextos, ampliando o potencial de replicabilidade do método para análise dos *trade-offs* característicos do contexto de estudo.

Por fim, o Artigo 3 (Capítulo 4) se apoiou em achados do Artigo 2 para ampliar a exploração do tema, incluindo *trade-offs* resilientes ao processo decisório de sistemas elétricos urbanos sustentáveis. Assim, o Artigo 3 teve como objetivo desenvolver um modelo para análise integrada de sustentabilidade e de resiliência urbana em sistemas de fornecimento de energia elétrica. Os resultados do Artigo 2 forneceram a base para que as possibilidades de soluções elétricas fossem expandidas, sendo incluídas opções de geração distribuída no estudo, as quais desempenham papel fundamental no planejamento da transição energética do Brasil. O Artigo 3 investigou, então, os efeitos das combinações de soluções distribuídas e centralizadas, para os impactos ambientais, econômicos e de resiliência no ambiente urbano. Da mesma forma, analisou-se como o fornecimento de subsídios econômicos pode modificar o desempenho dos cenários analisados, inclusive em relação ao seu comportamento resiliente. Como evolução das sistemáticas empregadas no Artigo 1, o Artigo 3 abordou o gerenciamento de *trade-offs* a partir de técnicas quantitativas, em substituição ao emprego de métodos multicritério. Por um lado, essa escolha é capaz de fornecer dados mais robustos ao processo

decisório; no entanto, também torna esse processo mais engessado, de acordo com o nível gerencial a que se aplica. Por esse motivo, não é correto afirmar que a técnica quantitativa deve se sobrepor aos métodos mistos; antes, esses métodos podem se complementar, orientando o processo decisório de forma adaptável e equilibrada, ao considerar diferentes abordagens.

Os achados deste estudo conduzem ao entendimento de que essa é justamente a principal premissa a ser adotada para o gerenciamento de *trade-offs* em contextos complexos, como o de transição energética: não há um único caminho ou uma resposta ótima a ser empregada em todos os contextos. Por isso, os três artigos buscam se complementar, em que os achados de um possam apoiar o atendimento mais aprofundado dos outros, unindo-se para o alcance do objetivo geral da tese. A inclusão de características de resiliência ao estudo denota a necessidade dessa complementaridade, tendo em vista que essa é uma temática dinâmica, em que estratégias inovadoras mostram-se necessárias, em um fluxo contínuo, para o planejamento da ação climática.

3.1 Contribuições teóricas e gerenciais

Integrando as abordagens adotadas nos três artigos, é possível verificar que a tese contribui para a teoria do processo decisório sustentável, principalmente, ao incorporar elementos adicionais ao gerenciamento de *trade-offs*. Assim, quanto às **contribuições teóricas** do estudo, destacam-se as investigações acerca das relações entre conceitos diversos, e seus efeitos sobre o processo decisório. Na literatura, diversos estudos se dedicam a identificar *trade-offs* em contextos complexos, porém, costumam não avançar no entendimento do significado desses *trade-offs* para o campo de pesquisa. Por esse motivo, compreende-se que todas as ferramentas desenvolvidas nesta tese podem ser aplicadas, de forma gradual, no planejamento sustentável e resiliente urbano. Assim, as contribuições do Artigo 1 colaboram com a compreensão dos objetivos sustentabilidade da organização, cujos efeitos de escolhas podem ser investigados com o uso dos instrumentos do Artigo 2. Por fim, em uma análise decisória avançada, o planejamento para transição de baixo carbono pode ser aprofundado com a aplicação do modelo diamante, proposto no Artigo 3.

Da mesma forma, há uma ampla gama de trabalhos que abordam sustentabilidade e resiliência, no entanto, a relação entre esses conceitos, geralmente, é tratada de forma

superficial, com a premissa de que expressam teorias similares. No entanto, os achados deste estudo demonstram justamente o contrário, dado que soluções com alto desempenho sustentável podem não se apresentar como resilientes. Por conseguinte, os resultados dos Artigos 2 e 3 destacam a importância da compreensão dessas diferenças, e de como tal compreensão pode contribuir para estratégias efetivas de adaptação às mudanças climáticas. Ademais, o tema de transição energética, embora esteja diretamente relacionado à resiliência, tem sido associado, mais frequentemente, a seu potencial sustentável. Essa pode se constituir de uma falha relevante no planejamento de economias de baixo carbono, reduzindo as potencialidades das políticas energéticas adotadas.

Adicionalmente, são encontrados, na literatura, diferentes estudos que avaliam os impactos de mix energéticos diversos nos territórios, voltados à oferta e à demanda de energia elétrica nacional. Contudo, a exploração dos efeitos das escolhas realizadas pelas organizações não é refletida na literatura. Este estudo buscou ampliar esse entendimento, dado que as organizações podem se apresentar como impulsionadoras de mudanças relevantes em políticas energéticas, a partir de suas escolhas para o fornecimento de energia elétrica.

Como **contribuições gerenciais**, atualmente, no Brasil, está sendo discutido o marco regulatório do setor elétrico, o qual busca abrir caminhos para a expansão do Mercado Livre. Esse pode representar uma oportunidade relevante de revisão dos modelos em uso de fornecimento de energia elétrica, ampliando o emprego de energias renováveis no país. O fomento a essas fontes, no entanto, deve ser embasado em análises robustas, fornecidas por modelos bem estruturados, os quais possam considerar as características regionais de geração e de uso da energia elétrica. No Artigo 3, foram sistematizados dados de geração relevantes para o planejamento do Mercado Livre de Energia no Brasil, relacionando características que não estão claras para esse mercado, contribuindo, assim, para a otimização dos mecanismos de regulação a serem implementados. Com isso, este estudo buscou, ainda, fornecer mecanismos práticos a gestores e formuladores de políticas, de forma que o planejamento da transição energética no Brasil se mostre efetivo para as metas firmadas no Acordo de Paris. Nesse sentido, a consideração de características resilientes, nos planos de transição energética, podem torná-los mais abrangentes, contribuindo para o desenvolvimento de políticas públicas energéticas concernentes às características de geração nacional.

3.2 Limitações e sugestões para trabalhos futuros

Devido ao caráter abrangente de suas análises, este estudo apresenta limitações, as quais se refletem em seus achados. Dentre essas, pode-se destacar a consideração apenas de fontes bem estabelecidas no Brasil para composição do mix energético dos cenários de fornecimento de energia elétrica. Essa escolha metodológica pode limitar as análises dos efeitos de combinações entre fontes energéticas, de forma a não serem consideradas soluções que possam ter desempenhos sustentáveis e resilientes satisfatórios em outros contextos. Da mesma forma, outros impactos ambientais podem ser considerados relevantes para as mudanças climáticas, mas que não foram abordados neste estudo, em função de seu escopo. Assim, como sugestões a pesquisas futuras, destacam-se:

- O desenvolvimento de um método para monitoramento dos efeitos das decisões tomadas, a partir do emprego das ferramentas e dos modelos propostos no estudo;
- Aplicações dos mecanismos propostos em infraestruturas urbanas diversas, como de mobilidade urbana;
- Identificação de outros elementos relevantes para o gerenciamento de *trade-offs* no planejamento de transição energética;
- Aprofundamento do modelo proposto para o gerenciamento de *trade-offs*, considerando outras características relevantes de resiliência, além das relações de capacidade instalada e eletricidade gerada pelas fontes energéticas; e
- Proposição de um sistema de indicadores para monitoramento dos efeitos de políticas energéticas de transição.

