

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL
URBANA – PPGSAU**

BRUNO SABINO SCOLARI

**INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
CONECTADOS À REDE ELÉTRICA**

TESE

**CURITIBA
2025**

BRUNO SABINO SCOLARI

**INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
CONECTADOS À REDE ELÉTRICA**

**SUSTAINABILITY INDICATORS FOR GRID CONNECTED PHOTOVOLTAIC
SYSTEMS**

Tese apresentada como requisito para a obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais pelo Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade Ambiental Urbana – PPGSAU, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Área de Concentração: Sustentabilidade Ambiental Urbana. Linha de Pesquisa: Instrumentos de Gestão para Sustentabilidade. Projeto Estruturante: Sistemas Informacionais para Sustentabilidade Urbana.

Orientadora: Profa. Dra. Faimara do Rocio Strauhs

**CURITIBA
2025**



https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pt_BR

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es).
Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



BRUNO SABINO SCOLARI

INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como requisito para obtenção do título de Doutor Em Ciências Ambientais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Sustentabilidade Ambiental Urbana.

Data de aprovação: 10 de Dezembro de 2024

Dra. Faimara Do Rocio Strauhs, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Alain Hernandez Santoyo, Doutorado - Universidade Federal de Pelotas (Ufpel)

Dr. Cezar Augusto Romano, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Hans Michael Van Bellen, Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina (Ufsc)

Dr. Jair Urbanetz Junior, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 12/12/2024.

RESUMO

SCOLARI, Bruno S. **Indicadores de Sustentabilidade para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. Orientadora: Profa. Dra. Faimara do Rocio Strauhs. 2024. 266 f. Tese (Doutorado em Sustentabilidade Ambiental Urbana), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2025.

No contexto de busca pela sustentabilidade no setor energético, a geração de eletricidade a partir de fontes renováveis se apresenta como uma solução para enfrentar as dificuldades do paradigma do desenvolvimento sustentável no setor, para o qual é necessário aliar a continuidade do fornecimento de energia elétrica com a continuidade no curto e longo prazo das necessidades ecossocioambientais da sociedade. Um dos desafios encontrados é, contudo, o de criar instrumentos de mensuração para o desenvolvimento sustentável em suas diversas dimensões, tais como indicadores de sustentabilidade, por intermédio dos quais é possível quantificar as ações antrópicas e avaliar os esforços empregados aspirando à preservação ambiental ou a mitigação de sua degradação. A geração fotovoltaica, que representa uma promissora maneira de se aprimorar a sustentabilidade no setor energético, defronta-se à já citada falta de indicadores de sustentabilidade. As diferentes tecnologias fotovoltaicas variam significativamente em termos de efeitos ambientais e em seus níveis de sustentabilidade. Logo, dispor de tais indicadores de avaliação torna-se uma condição para o desenvolvimento sustentável dessa tecnologia. Neste contexto, o objetivo geral deste estudo é o de propor um conjunto de indicadores para avaliação da sustentabilidade de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, selecionados considerando-se as variáveis da dimensão da sustentabilidade ambiental urbana. Para alcançar este objetivo os dados sobre indicadores de sustentabilidade aplicáveis a sistemas fotovoltaicos foram levantados por meio de uma pesquisa de natureza transversal, interdisciplinar, apoiada em pesquisa bibliográfica de fontes secundárias. Mais especificamente, essa pesquisa bibliográfica foi efetuada por meio de Revisão Sistemática da Literatura. Assim, elaborou-se um quadro referencial propondo um conjunto de indicadores de sustentabilidade para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, categorizado nas diversas dimensões da sustentabilidade. Em seguida os Indicadores de Sustentabilidade propostos foram validados por meio de consulta a um painel de especialistas nacionais, via Método Delphi, com questionário *online*. Pretende-se que o conjunto de indicadores resultante desta Tese se torne ferramenta que propicie um diagnóstico sobre o tema, subsidiando o processo de tomada de decisão da comunidade científica, mas também de formuladores de políticas.

Palavras-chave: Indicadores de Sustentabilidade. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica. Energia Solar Fotovoltaica. Sustentabilidade Ambiental Urbana. Desenvolvimento Sustentável.

ABSTRACT

SCOLARI, Bruno S. **Sustainability Indicators for Grid Connected Photovoltaic Systems**. Thesis Adviser: Prof. Faimara do Rocio Strauhs, Dr. Eng. 2024. 266 p. Tese (Doutorado em Sustentabilidade Ambiental Urbana), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2025.

In the context of the search for sustainability in the energy sector, electricity generation from renewable sources presents itself as a solution to face the difficulties of the sustainable development paradigm in the sector, for which it is necessary to combine the continuity of the supply of electricity with the continuity of society's eco-socio-environmental needs in the short and long term. One of the challenges encountered, however, is to create measurement instruments for sustainable development in its various dimensions, such as sustainability indicators, through which it is possible to quantify human actions and evaluate the efforts made to aim at environmental preservation or mitigation of its degradation. Photovoltaic generation, which represents a promising way to improve sustainability in the energy sector, faces the aforementioned lack of sustainability indicators. The different photovoltaic technologies vary significantly in terms of environmental effects and their levels of sustainability. Therefore, having such evaluation indicators becomes a condition for the sustainable development of this technology. In this context, the aim of this study is to propose a set of indicators for assessing the sustainability of grid-connected photovoltaic systems, selected considering the variables of the urban environmental sustainability dimension. To achieve this aim, data on sustainability indicators applicable to photovoltaic systems were collected through a cross-sectional, interdisciplinary study, supported by bibliographic research of secondary sources. More specifically, this bibliographic research was carried out through a Systematic Literature Review. Thus, a reference framework was developed proposing a set of sustainability indicators for grid-connected photovoltaic systems, categorized into the various dimensions of sustainability. The proposed Sustainability Indicators were then validated by consulting a panel of national experts, via the Delphi Method, with an online questionnaire. The aim is for the set of indicators resulting from this Thesis to become a tool that provides a diagnosis on the subject, supporting the decision-making process of the scientific community, but also of policy makers.

Keywords: Sustainability Indicators. Grid Connected Photovoltaic System. Photovoltaic Solar Energy. Urban Environmental Sustainability. Sustainable Development.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Etapas de Pesquisa.....	36
Figura 2 – Porcentagem da Energia Elétrica Gerada por Fonte no Mundo no Ano de 2023.....	75
Figura 3 – Geração Mundial de Energia Elétrica por Fonte e Participação de Renováveis, entre os anos de 2014 e 2023.	76
Figura 4 – Participação nas Adições Anuais de Capacidade de Geração de Energia Elétrica no Mundo, entre os anos de 2011 e 2021.	76
Figura 5 – Porcentagem da Energia Elétrica Gerada por Fonte no Brasil no Ano de 2023.....	77
Figura 6 – Geração Brasileira de Energia Elétrica por Fonte e Participação de Renováveis, entre os anos de 2014 e 2023.	78
Figura 7 – Configuração de um SFV tradicional.	82
Figura 8 – Classificação de Sistemas Fotovoltaicos.	83
Figura 9 – Capacidade mundial da energia fotovoltaica e adições anuais, 2014-2023.	84
Figura 10 – Capacidade brasileira da energia fotovoltaica e adições anuais, 2015-2024.....	85
Figura 11 – Capacidade brasileira da energia fotovoltaica centralizada e distribuída, 2015-2024.	85
Figura 12 – Capacidade brasileira de micro e minigeração distribuída fotovoltaica, 2015-2024.	86
Figura 13 – Proposta Conceitual da Pesquisa.....	103
Figura 14 – Matriz de Consistência.....	106
Figura 15 – Etapas da Pesquisa.....	108
Figura 16 – Estratégia PICO.	110
Figura 17 – Protocolo da Revisão Sistemática da Literatura.....	112
Figura 18 – Diagrama representativo da combinação dos temas de interesse da RSL.....	119
Figura 19 – Fluxograma de Triagem da Revisão Sistemática da Literatura.	123
Figura 20 – Etapas da Análise Sistemática.	125
Figura 21 – Resultado da Análise Heurística Simples.....	128
Figura 22 – Etapas de Aplicação do Método Delphi.....	140
Figura 23 – Fluxo de Aplicação do Método Delphi.	141

Figura 24 – Sintaxe de Busca pelos Especialistas.	143
Figura 25 – Distribuição de Frequência das Respostas	158
Figura 26 – Quantidade de Indicadores e porcentagem de respostas indicando relevância.	160
Figura 27 – Pontos de Corte para a Classificação dos Indicadores.....	163
Figura 28 – Quantidade de Indicadores por Dimensão.	175
Figura 29 – Termo de Consentimento Livre e Esclarecido – TCLE.	237
Figura 30 – Questionário Enviado para o Painel de Especialistas.....	241

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Lacunas de Pesquisa Identificadas no Referencial Teórico.....	28
Quadro 2 – As Oito Dimensões da Sustentabilidade de Sachs	54
Quadro 3 – Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.....	58
Quadro 4 – Características Desejáveis de Bons Indicadores	62
Quadro 5 – Princípios de Bellagio – BellagioSTAMP	67
Quadro 6 – Tipos de Sistemas Fotovoltaicos Instalados no Ambiente Urbano.	95
Quadro 7 – Protocolo de Pesquisa	109
Quadro 8 – Resumo das Palavras-Chave e de seus Respetivos Descritores	116
Quadro 9 – Exemplo da Ficha de Análise Sistemática.....	126
Quadro 10 – Avaliação dos Indicadores por meio dos Princípios de Bellagio.	134
Quadro 11 – Exemplo de Síntese dos Indicadores Identificados.....	151
Quadro 12 – Verificação das Características Desejáveis de Bons Indicadores	152
Quadro 13 – Quadro Referencial dos Indicadores Seleccionados	156
Quadro 14 – Quadro Referencial de Indicadores de Sustentabilidade para Sistemas Fotovoltaicos	171
Quadro 15 – Ficha de Análise Sistemática.....	224
Quadro 16 – Síntese dos Indicadores Seleccionados.....	229

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados Obtidos na Pesquisa em cada Base de Dados.....	30
Tabela 2 – Capacidade de Geração de Energia Elétrica Renovável no Brasil e no Mundo.....	79
Tabela 3 – Capacidade de Geração de Energia Elétrica Renovável Centralizada e Distribuída no Brasil	89
Tabela 4 – Teste de Aderência dos Descritores.....	115
Tabela 5 – Pesquisa Individual pelos Descritores.	117
Tabela 6 – Resultados Obtidos na Pesquisa Simples e Combinada em cada Base de Dados	121
Tabela 7 – Vinculação Profissional e Região de Atuação dos Participantes Convidados.....	144
Tabela 8 – Vinculação Profissional e Região de Atuação dos Especialistas Respondentes	147
Tabela 9 – Percentual de Atendimento aos Princípios de Bellagio.....	155
Tabela 10 – Recorte da Frequência Absoluta Acumulada	161
Tabela 11 – Recorte da Frequência Relativa Acumulada	162
Tabela 12 – Recorte da Frequências Relativas Acumuladas pela Inversa da Curva Normal.....	163
Tabela 13 – Relevância dos Indicadores Conforme Consenso dos Especialistas ..	164
Tabela 14 – Análise do Consenso e da Relevância dos Indicadores	167
Tabela 15 – Distribuição de Frequência Absoluta dos Resultados do Questionário	251
Tabela 16 – Distribuição de Frequência Relativa dos Resultados do Questionário	253
Tabela 17 – Frequência Acumulada Absoluta	255
Tabela 18 – Frequência Acumulada Relativa	256
Tabela 19 – Frequências Relativas Acumuladas pela Inversa da Curva Normal	257
Tabela 20 – Cálculo do Coeficiente de Kendall	258

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CDS-ONU	Comissão de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FV	Fotovoltaico
ODM	Objetivos de Desenvolvimento do Milênio
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDS	Indicadores de Desenvolvimento Sustentável / Indicadores de Sustentabilidade
IGS	Instrumentos de Gestão para Sustentabilidade
LABENS	Laboratório de Energia Solar da UTFPR
MMGD	Micro e Minigeração Distribuída
PNE	Plano Nacional de Energia
PPGSAU	Programa de Pós Graduação em Sustentabilidade Ambiental Urbana
REN	Resolução Normativa
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
SFV	Sistema Fotovoltaico
SFVCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
CMMAD	Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	TEMA DE PESQUISA.....	13
1.2	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	19
1.3	PROBLEMÁTICA, QUESTÃO DE PESQUISA, PRESSUPOSTOS E TESE...	20
1.4	OBJETIVOS DA PESQUISA.....	23
1.4.1	Objetivo Geral	24
1.4.2	Objetivos Específicos.....	24
1.5	JUSTIFICATIVAS TEÓRICO-PRÁTICAS E MOTIVAÇÃO PESSOAL.....	24
1.5.1	Justificativa Teórica.....	24
1.5.2	Justificativa Prática e Motivação Pessoal	31
1.6	ABORDAGEM METODOLÓGICA DA PESQUISA.....	33
1.7	EMBASAMENTO TEÓRICO	36
1.8	ESTRUTURA DO RELATO DE TESE	38
2	SUSTENTABILIDADE: das suas origens ao uso de indicadores.....	40
2.1	CIÊNCIAS AMBIENTAIS E INTERDISCIPLINARIDADE	40
2.2	HISTÓRICO DA TEMÁTICA DA SUSTENTABILIDADE	42
2.3	SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL URBANA.....	49
2.4	DIMENSÕES DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.....	51
2.5	OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL – ODS.....	56
2.6	INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE	59
2.7	PRECEITOS GERAIS PARA SELEÇÃO DE INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE	64
3	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	70
3.1	NOVOS PARADIGMAS NO SETOR ENERGÉTICO	70
3.2	FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA ELÉTRICA.....	73
3.3	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	80
3.4	CENÁRIO FOTOVOLTAICO.....	84

3.5	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA ELÉTRICA	87
3.6	GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NO AMBIENTE URBANO	92
4	ALINHAMENTO CONCEITUAL	97
4.1	INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE	97
4.2	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS NO AMBIENTE URBANO	101
5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS DA PESQUISA.....	105
5.1	CLASSIFICAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	105
5.2	ETAPAS E PROTOCOLO DA PESQUISA	107
5.3	REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	111
5.3.1.	Parâmetros de Pesquisa	113
5.3.2.	Definição das Palavras-chave e dos Descritores	114
5.3.3.	Busca Simples e Busca Combinada	119
5.3.4.	Triagem e Definição do <i>Corpus</i> Inicial de Pesquisa	122
5.4.	ANÁLISE SISTEMÁTICA	124
5.4.1.	Etapas Iniciais	124
5.4.2.	Análise de Conteúdo - Direcionamentos	126
5.5.	SELEÇÃO DOS INDICADORES	129
5.5.1.	Seleção pelas Características Desejáveis de um Bom Indicador.	130
5.5.2.	Seleção pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS.	131
5.5.3.	Seleção pelos Princípios de Bellagio	133
5.6	VALIDAÇÃO – CONSULTA A PAINEL DE ESPECIALISTAS	137
5.6.1.	Método Delphi	137
5.6.2.	Fase 1 – Mapeamento e Seleção dos Especialistas	142
5.6.3.	Fase 2 – Aplicação do Questionário	145
5.6.4.	Fase 3 – Tratamento dos Dados Coletados	147
6	DADOS AUFERIDOS E RESULTADOS DA PESQUISA.....	150

6.1.	RESULTADO DA ANÁLISE SISTEMÁTICA DA LITERATURA.....	150
6.2.	RESULTADO DA SELEÇÃO DOS INDICADORES.....	151
6.3.	RESULTADO DA CONSULTA A PAINEL DE ESPECIALISTAS.....	157
6.4.	QUADRO REFERENCIAL DE INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	170
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	177
7.1.	ATENDIMENTO AOS OBJETIVOS E À PERGUNTA DE PESQUISA	177
7.2.	LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	179
7.3.	INFERÊNCIAS E PESQUISAS FUTURAS.....	180
	REFERÊNCIAS.....	184
	APÊNDICE A	224
	APÊNDICE B	229
	APÊNDICE C	237
	APÊNDICE D	241
	APÊNDICE E.....	251
	APÊNDICE F.....	255
	ÍNDICE ONOMÁSTICO	259

1 INTRODUÇÃO

Neste Capítulo introdutório é apresentado primeiramente o tema, que envolve indicadores de sustentabilidade aplicados a sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, e a delimitação da pesquisa, que abrange os sistemas fotovoltaicos instalados em ambiente urbano. Este estudo situa-se no âmbito das Ciências Ambientais, com caráter transversal e interdisciplinar, buscando avançar para além das fronteiras disciplinares.

Ainda no Capítulo introdutório, são abordados, igualmente, a problemática, a questão de pesquisa, os pressupostos e a tese levantada. Os objetivos e a justificativa teórica e prática são apresentados na sequência. Finalmente, é apresentada a abordagem metodológica, o embasamento teórico e a estrutura prévia do trabalho.

1.1 TEMA DE PESQUISA

O discurso do desenvolvimento sustentável tem se tornado altamente influente nas estruturas de governança globais (Jong; Vijge, 2021) e amplamente debatido nos diversos setores da sociedade, sendo considerado por Fernandes e Vieira (2014) uma agenda em ascensão. Jong e Vijge (2021, p. 1), no entanto, acrescentam que entender o significado desse “discurso”, que passa sobretudo por efetivamente operacionalizá-lo, depende de um contexto específico. De outra parte, tanto o discurso sobre o desenvolvimento sustentável quanto a sua operacionalização evoluiu ao longo do tempo, na opinião de Jong e Vijge (2021) e no entendimento adotado nesta pesquisa.

Nesse cenário, as crescentes reflexões e o interesse pelo desenvolvimento sustentável tornaram evidente a necessidade da revisão de paradigmas vigentes, especialmente o de que os recursos naturais são infinitos, estimulando “países e a comunidade internacional” a desenvolver ações conjuntas na perspectiva de conciliar “a necessidade de produzir bens necessários à qualidade de vida das sociedades e ao mesmo tempo preservar os elementos naturais igualmente

responsáveis por esta mesma qualidade de vida”. (Fernandes; Vieira, 2014, p. 556; Philippi Jr. *et al.*, 2013, p. 511).

Hueting e Reijnders (2004), Borges e Tachibana (2005), Andrade, Tachizawa e Carvalho (2000, p. 2) e Schenini (2005) citam os grandes marcos dessa quebra de paradigmas que propiciaram o “despertar de uma consciência ecológica mundial”:

- a publicação em 1972 do relatório *Os limites do Crescimento* (Meadows *et al.*, 1972) pelo Clube de Roma, destacando questões fundamentais como poluição, saneamento, ambiente, energia e crescimento populacional, alertando que o modelo econômico praticado até então culminaria em um “limite para seu crescimento” (Magrini, 2001; Pott; Estrela, 2017, p. 273);
- a realização em 1972 da Primeira Conferência das Nações Unidas Para o Meio Ambiente Humano realizada em Estocolmo (Organização das Nações Unidas, 1972), tendo por objetivo conscientizar os países sobre a importância da conservação ambiental como fator fundamental para a manutenção da espécie humana (Borges; Tachibana, 2005);
- e a publicação em 1987 do *Relatório Brundtland*, publicado sobre o título *Nosso Futuro Comum*, pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento – CMMAD (1987), lançando a expressão “Desenvolvimento Sustentável” no debate público (Acsehrad, 1999; Borges; Tachibana, 2005; Comissão Mundial Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, 1987, p. 41; Robinson, 2004), categorizando a sustentabilidade em três dimensões (ambiental, social e econômica) e estabelecendo a necessidade uma nova forma de relação com o meio ambiente (Pott; Estrela, 2017, p. 275).

Desde então muito se têm discutido em termos de abordagens conceituais e de aplicações práticas da sustentabilidade, de modo que atualmente “diversas matrizes discursivas têm sido associadas à noção de sustentabilidade”, conforme descreveu Acsehrad (1999, p. 79, 2009), destacando a matriz “da eficiência, da escala, da equidade, da autossuficiência e da ética” (Narloch; Machado; Scheiner, 2019, p. 995), acrescentando ainda que a incerteza do conceito de sustentabilidade sugere que não há no momento hegemonia instituída entre os diferentes discursos. Segundo Robinson (2004), o conceito de sustentabilidade está constantemente sendo ampliado e atualizado. Hopwood, Mellor e O’Brien (2005) complementam

afirmando que mais de uma centena de conceituações já foram dadas ao termo. Ainda nessa linha, Berardi (2013) pontua que não existe um conceito único e bem definido de desenvolvimento sustentável, e Jong e Vijge (2021) corroboram destacando que a evolução conceitual e prática do discurso da sustentabilidade tem sido foco de estudos na literatura acadêmica.

Contudo, o já citado *Relatório Brundtland* apresenta a definição mais famosa e que se tornou mundialmente conhecida de desenvolvimento sustentável, afirmando que o “desenvolvimento sustentável é aquele que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades” (Berardi, 2013; Borges; Tachibana, 2005; Comissão Mundial Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, 1987, p. 41), definição esta que será adotada no decorrer deste Relato de Tese.

Neste contexto de evolução dos conceitos e das aplicações da sustentabilidade, destaca-se: a *Agenda 21 Global* (Organização das Nações Unidas, 1992), que estabeleceu um processo de planejamento visando à implementação do desenvolvimento sustentável de forma local e descentralizada; e a *Agenda 2030* (Organização das Nações Unidas, 2015), que reafirmou a *Agenda 21 Global* e estabeleceu os 17 Objetivos do Desenvolvimento sustentável – ODS (Gugelmin *et al.*, 2003; Mello, 2003; Mello; Hogan, 2007; Pott; Estrela, 2017). Ambos os documentos, a *Agenda 21* (Organização das Nações Unidas, 1992) e a *Agenda 2030* (Organização das Nações Unidas, 2015), são discutidos na Seção 2.2.

Avançando, a divisão fragmentada das diversas dimensões da sustentabilidade vem sendo criticada na literatura, levando-a muitas vezes a ser considerada e avaliada exclusivamente de acordo com a sua perspectiva ambiental, ignorando assim vários outros aspectos da sustentabilidade (Berardi, 2013; Hueting; Reijnders, 2004; Hugé *et al.*, 2013, Lajara *et al.*, 2023; Martens, 2006; Roe, 1998; Romulo *et al.*, 2024; Williams; Millington, 2004). Já se reconhece que o desenvolvimento sustentável possui uma natureza multidimensional, requerendo integração equilibrada de suas diversas dimensões ou pilares, necessitando assim, segundo Lajara *et al.* (2023), de uma abordagem interdisciplinar em sua análise (Albino; Berardi, 2012; Berardi, 2013; Hajer, 1995; Martens, 2006; Organização das Nações Unidas, 2007; Romulo *et al.*, 2024; Singh, 2024; Zeijl-Rozema *et al.*, 2008).

A categorização das dimensões da sustentabilidade que, segundo Ciulla (2014, p. 257), é um processo cognitivo pelo qual “decidimos e formulamos as

categorias para as quais apontam nossas designações”, possui semelhanças entre suas diversas abordagens, baseando-se de modo unânime, no entanto, nas dimensões ambiental, social e econômica, com crescente pressão para o reconhecimento dos aspectos culturais e políticos de maneira mais explícita (Biedermann *et al.*, 2024; Hopwood; Mellor; O’Brien, 2005; Mohd, Latiff, Azhar, 2024; Organização das Nações Unidas, 2001; Vallance; Perkins, Dixon, 2011).

Desse entendimento, Sachs (2002) já apresentava “uma das abordagens mais importantes sobre as dimensões da sustentabilidade”, com a perspectiva de oito aspectos de análise: (i) social, (ii) cultural, (iii) ecológica, (iv) ambiental, (v) territorial, (vi) econômica, (vii) política (nacional) e (viii) política (internacional) (Maia; Pires, 2011, p. 189).

Um dos desafios do desenvolvimento sustentável é, então, o de criar indicadores, ou instrumentos de mensuração para as diversas dimensões (Moreira *et al.*, 2024; Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2015; Organização das Nações Unidas, 1992).

Indicadores “são ferramentas constituídas por uma ou mais variáveis que, associadas de diversas formas, revelam significados mais amplos sobre os fenômenos a que se referem” (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2015, p. 11). Segundo Kligerman *et al.* (2007, p. 201), indicadores de desenvolvimento sustentável precisam ser desenvolvidos para fornecer “uma base sólida para a tomada de decisões em todos os níveis”. Malheiros, Phlipi Jr. e Coutinho (2008) e Moreira *et al.* (2024) corroboram com esta visão, afirmando que os indicadores propiciam diagnósticos de temas de interesse, subsidiando o processo de tomada de decisão. Para Meadows (1998), os indicadores são um meio de avaliar o desenvolvimento sustentável em suas diversas dimensões.

Assim, intimamente ligados ao contexto da sustentabilidade, os indicadores de sustentabilidade, que correspondem a um dos temas principais deste trabalho, representam importante componente de avaliação ambiental, conforme Mattar Neto, Krüger e Dziedzic (2009, p. 205) e Olabi *et al.* (2023), sendo utilizados para “ilustrar as principais características de uma determinada região” ou temática. Via indicadores de sustentabilidade é possível quantificar as ações antrópicas e avaliar os esforços desenvolvidos visando à melhoria do meio ambiente ou a mitigação de sua degradação (Mattar Neto; Krüger; Dziedzic, 2009, p. 205; Silva *et al.*, 2016).

De outra parte, salienta-se que além de todo o movimento em nível institucional em torno de políticas ambientais, e a definição consequente de indicadores de mensuração, observa-se, segundo Prates *et al.* (2020), socialmente, uma mudança filosófica na forma de pensar sobre a questão da sustentabilidade. Essa mudança no nível social se faz mais nítida quando se traz o contexto da sustentabilidade para o ambiente urbano, de modo que a população se vê fazendo parte da implementação de uma sociedade sustentável. Neste sentido a sustentabilidade se desvincula de aspectos puramente institucionais, e passa integrar o cotidiano da sociedade, fazendo parte do rol das escolhas individuais e da agenda individual de apoios do cidadão (Prates *et al.*, 2020).

Na busca pela sustentabilidade, a questão energética assume um dos focos principais de discussão de acordo com o Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT (2010), sendo mencionada diretamente no sétimo Objetivo do Desenvolvimento Sustentável – ODS (Organização das Nações Unidas, 2015), e se depara, contudo, com as dificuldades para o alcance da sustentabilidade energética, em que é necessário conciliar a manutenção do fornecimento de insumos energéticos com a manutenção no curto e longo prazo das necessidades ambientais, sociais, éticas, culturais, econômicas, espaciais e políticas da sociedade (Scolari, 2019).

Segundo Gomes (2013), a agenda da política energética global tem sido orientada por três pilares principais: (i) segurança econômica – geração elétrica a custo competitivo, (ii) segurança energética – confiabilidade no fornecimento de energia e (iii) segurança ambiental – restrição aos impactos ambientais resultantes da geração elétrica; sendo componentes da chamada segurança não tradicional¹ (Sing, Sing; 2022).

Segundo Wang *et al.* (2024) a segurança energética garante o suprimento de energia de um país, e tem se concentrado nos últimos anos a lidar com ameaças ao suprimento de petróleo. No entanto, continuam Wang *et al.* (2024), os padrões internacionais de segurança energética estão em mudança devido à transição energética e às mudanças climáticas, levando a definição de segurança energética a incluir múltiplas dimensões como: meio ambiente, economia, sociedade, política, características regionais, cultura, tecnologia e fatores internacionais.

¹ A segurança não tradicional vai além da segurança militar e se concentra principalmente na segurança socioeconômica, compreendendo também componentes como: segurança energética, segurança alimentar, segurança ambiental, segurança cibernética e segurança sanitária (Singh, Singh; 2022).

Neste contexto, por reforçarem os três pilares citados por Gomes (2013), as fontes renováveis de geração de energia elétrica surgem como “uma solução de promover o desenvolvimento sustentável no setor de geração de energia elétrica” (Scolari, 2019, p. 26). Uma vez que as fontes renováveis apresentem viabilidade técnica e econômica, é consenso que estas fontes substituam os combustíveis fósseis para este fim, culminando em uma transformação no setor, que já pode ser observada (Connolly; Lund; Mathiesen, 2016; Empresa de Pesquisa Energética, 2024a; Kuang *et al.*, 2016; REN21, 2024).

Dentre estas fontes, a energia solar fotovoltaica (FV) vem se destacando tanto no cenário mundial quanto no nacional, devido ao baixo impacto ambiental de sua implantação e de sua geração (Empresa de Pesquisa Energética, 2024a; Olabi *et al.*, 2023; REN21, 2024).

No ano de 2023, a potência instalada de geração FV (centralizada e distribuída) no Brasil aumentou 54,8% em relação ao ano de 2022, passando de 24.453 MW para 37.843MW de potência instalada, representando 16,7% de toda a capacidade instalada de geração elétrica nacional, e sendo responsável por 7,2% de toda a energia elétrica gerada no Brasil no ano de 2023, segundo estimativas da Empresa de Pesquisa Energética (2024b). Em janeiro de 2025, segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2025a, 2025b), atingiu-se no Brasil uma potência instalada de geração FV centralizada de 17.478 MW e distribuída de 35.008 MW, totalizando 52.519 MW de potência FV instalada.

Diante desse cenário, à medida que a tecnologia se expande surge a necessidade de elaboração de indicadores específicos que a avaliem, na questão sustentabilidade, como esta promissora tecnologia se expande e se consolida no território brasileiro.

Assim, o escopo desta pesquisa dar-se-á no campo dos Indicadores de Sustentabilidade (IDS) no contexto da sustentabilidade ambiental urbana – neste Relato de Tese entendida como o equilíbrio entre o desenvolvimento econômico, a proteção ao meio ambiente e um ambiente socialmente harmônico para os habitantes de determinado espaço urbano (Bibri; Krogstie, 2017; Hiremath *et al.*, 2013; Izquierdo, 2022).

A pesquisa contará com abordagem de aplicação para a área da Engenharia Elétrica e de indicadores de sustentabilidade, estes no contexto da Energia Solar Fotovoltaica (FV). Tais elementos serão aprofundados sequencialmente.

1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Diante de um tema amplo como o de Indicadores de Sustentabilidade – IDS, esta pesquisa limitou-se aos IDS aplicados a Sistemas Fotovoltaicos.

Uma vez que Energia Solar Fotovoltaica é um conceito físico, não passível de análise em termos de IDS, este estudo procurou abordar a energia solar fotovoltaica materializada em torno de sua aplicação prática usual que se dá em forma de Sistemas Fotovoltaicos – SFV, compostos por seus diversos componentes.

Em relação às dimensões do desenvolvimento sustentável consideradas neste estudo para categorizar os indicadores de sustentabilidade, utilizaram-se as mesmas aplicadas por Ghenai, Albawab e Bettayeb (2020), Mei e Chen (2021), Nagarkatti e Kolar (2021) e Zhan e Li (2024), que empregam as dimensões: (i) Ambiental, (ii) Econômica, (iii) Social, (iv) Recursos e (v) Tecnológica, em especial por esses autores já as terem aplicados em estudos envolvendo indicadores de sustentabilidade para fontes geradoras de energia; o que vai ao encontro do proposto nesta pesquisa.

Em cada uma das dimensões da sustentabilidade consideradas, as proposições de IDS nesta pesquisa foram orientadas com base nos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável – ODS, a coleção de 17 objetivos e de 169 metas globais contidas na *Agenda 2030* (Organização das Nações Unidas, 2015), discutida pelos líderes de governos na Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável de setembro de 2015 (Centro de Informações das Nações Unidas no Brasil, 2021; Movimento Nacional ODS, 2020; Organização das Nações Unidas, 2016; RIO+20, 2012).

As ciências ambientais, a problemática ambiental, e, mais especificamente o contexto do desenvolvimento sustentável, foi tratado a partir de uma perspectiva interdisciplinar do conhecimento, reconhecendo a relação de interdependência entre sociedade e natureza, conforme visão exposta por Philippi Jr. *et al.* (2000, 2013), Fernandes e Rauen (2016), Sobral *et al.* (2015) e compartilhada por Berkes (2005), Dansereau (1999), Lajara *et al.* (2023), Leff (2000), Morin (2010), Sachs (1986), Serres (1990) e Vieira (1992).

A contextualização do desenvolvimento sustentável na conjuntura ambiental urbana – Sustentabilidade Ambiental Urbana – é compreendida, conforme já

abordado brevemente, como o equilíbrio entre o desenvolvimento econômico, ambiental e social do espaço urbano, proporcionando um ambiente harmônico para os habitantes deste; sendo considerado também que o aprofundamento de seu estudo é uma premissa importante para a sua obtenção, conforme abordado por Bibri e Krogstie (2017), Fu e Zhang (2017), Hiremath *et al.* (2013), Izquierdo (2022), Sobral *et al.* (2019), Sotto *et al.* (2019) e Zhou *et al.* (2024).

Os Indicadores de Sustentabilidade propostos seguem as características desejáveis de indicadores de sustentabilidade apresentadas por Berliner e Brimson (1988), Caldeira (2018), Callado e Fensterseifer (2010), Meadows (1998), Neely *et al.* (1997), Seyisi, Mantlana e Ndhleve (2023), Tironi *et al.* (1991) e Zhou *et al.* (2024), e estão alinhados com as teorias sobre o tema, incluindo os estudos de Gallopín (1996), Holling (1978), Malheiros, Philippi Jr. e Coutinho (2008), Meadows (1998), Philippi Jr. e Malheiros (2012), Tunstall (1992) e Van Bellen (2002).

Dentro do universo de SFV existentes, este estudo se restringiu a considerar os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica – SFVCR – sem *backup* de energia, instalados dentro do ambiente urbano, no território brasileiro e a partir do ano de 2012, e até dezembro de 2024, conforme a Resolução Normativa N° 1.059, de 7 de fevereiro de 2023 pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2023) e enquadrados como micro e minigeração distribuída – MMDG – de acordo com a resolução supracitada. Em relação à etapa do ciclo de vida dos SFV considerada neste estudo, compreende-se aquela de utilização pelo usuário final, ou seja, a fase em que o SFV encontra-se instalado e apto a gerar energia elétrica.

1.3 PROBLEMÁTICA, QUESTÃO DE PESQUISA, PRESSUPOSTOS E TESE

Somente nos últimos anos é que a geração Fotovoltaica – FV – vem aparecendo com maior ênfase nos estudos de planejamento energético nacional. (Empresa de Pesquisa Energética, 2024a). Os estudos do Plano Nacional de Energia – PNE – 2050, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE, preveem para o ano de 2050, considerando um cenário de crescimento econômico favorável, uma potência instalada de micro e minigeração distribuída fotovoltaica de 43GW, o equivalente a 4,8% da carga total em 2050 (Empresa de Pesquisa

Energética, 2020). Este mesmo estudo estima que 18% dos domicílios em 2050 contarão com geração FV, o que suprirá 13% do consumo residencial nacional (Ministério de Minas e Energia, 2016, 2017).

Indo ao encontro das previsões para o ano de 2050 citadas anteriormente, entre o final do ano de 2022 e o final do ano de 2023, a potência instalada de micro e minigeração distribuída fotovoltaica no Brasil aumentou 54,5%, passando de 17.66MW para 26.366MW de potência instalada, representando 11,7% de toda a capacidade instalada de geração elétrica nacional, e sendo responsável por 4,2% da eletricidade gerada no Brasil no ano de 2023, segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (2024b).

Segundo Ghenai, Albawab e Bettayeb (2020), Olabi *et al.* (2023) e Zhan e Li (2024), a confiança mundial pretendida com a geração de energia renovável, juntamente com o aumento contínuo da demanda energética e o inevitável desuso de combustíveis fósseis, impõe a necessidade de os pesquisadores e os desenvolvedores se concentrarem nos aspectos de sustentabilidade destas fontes geradoras, e não somente no incremento percentual destas fontes no montante global.

As diferentes tecnologias de produção de energia renovável variam significativamente em termos de eficiência energética, de parâmetros de operação, de efeitos ambientais, de espaço físico utilizado, de custos financeiros, de vida útil, de impactos de fabricação e de materiais utilizados (Ghenai; Albawab; Bettayeb, 2020; Olabi *et al.*, 2023). Em outras palavras, elas diferem em seus níveis de sustentabilidade.

Todo o movimento institucional e mercadológico a favor do avanço da geração fotovoltaica se embasa no pressuposto de que esta tecnologia é sustentável fundamentalmente por representar uma fonte de energia renovável, sendo possível inferir que o caráter sustentável da geração fotovoltaica é, juntamente com o apelo financeiro, o principal foco da publicidade deste mercado. Esse pressuposto não sustentado em fatos científicos concretos, no entanto, faz com que a prática comum de mercado seja a avaliação de um SFV exclusivamente do ponto de vista de sua viabilidade técnica e financeira, abstendo-se da análise da sustentabilidade deste SFV como um conceito mais amplo, composto por diversas dimensões a serem analisadas e consideradas quando se avalia a instalação ou não de um SFV.

Diante deste cenário, diversos autores abordam de forma pontual o caráter sustentável ou não da geração fotovoltaica, geralmente em uma dimensão específica (Altun; Kilic, 2020; Carvalho; Magalhães; Domingues, 2019; Dantas; Pompermayer, 2018; Garraín *et al.*, 2020; Maani *et al.*, 2020; Mahmoudi; Huda; Behnia, 2020; Marini; Rossi, 2005; Mayer; Szilágyi; Gróf, 2020; Olabi *et al.*, 2023; Ruiz; Pradas; Ruiz, 2017; Yu; Halog, 2015), porém, faltam nestes estudos indicadores sistematizados e padronizados que mensurem quantitativamente em que circunstâncias e em quais dimensões da sustentabilidade essa tecnologia é realmente sustentável, ou não. A falta desse entendimento pode levar a avaliações superficiais do assunto, comprometendo eficácia de políticas públicas e de normatizações específicas.

Apoiada na análise crítica do contexto apresentado e formulada de acordo com a estratégia PICO² (Santos; Pimenta; Nobre, 2007) tem-se como indagação norteadora para esta pesquisa:

Quais indicadores podem ser usados para avaliação da sustentabilidade de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, considerando-se as dimensões da sustentabilidade?

Partindo-se do pressuposto de que os indicadores são um meio de avaliar o desenvolvimento sustentável em suas diversas dimensões (Meadows, 1998), e de que estes indicadores podem ser aplicados à Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica, deduz-se a tese proposta por este trabalho:

Indicadores de sustentabilidade, quando corretamente propostos, podem avaliar a sustentabilidade de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica nas diversas dimensões da sustentabilidade.

² A estratégia PICO representa um acrônimo para **P**roblema, **I**ntervenção, **C**omparação e **O**utcomes (desfecho, resultado), de modo que esses quatro componentes são os elementos fundamentais da questão de pesquisa e da construção da pergunta para a busca bibliográfica (SANTOS, PIMENTA, NOBRE, 2007). A decomposição da Questão de Pesquisa deste trabalho nos quatro componentes PICO se dá da seguinte forma:

- P – problema – Quais indicadores...
- I – intervenção – ...podem ser usados para avaliação...
- C – comparação – ...sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica...
- O – *outcome* (resultado) - ... da sustentabilidade de ... considerando-se as várias dimensões da sustentabilidade.

Desta forma, no presente estudo pesquisou-se indicadores de sustentabilidade aplicados a sistemas fotovoltaicos no intuito de determinar quais indicadores podem ser usados para avaliação da sustentabilidade de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, considerando-se as várias dimensões da sustentabilidade, para determinar em quais destas dimensões a geração fotovoltaica é sustentável ou não.

Espera-se assim, aprimorar o entendimento sobre o assunto, principalmente da comunidade especializada da área, contribuindo de modo a direcionar o curso do avanço da tecnologia e as tomadas de decisão no setor no sentido de tornar os sistemas fotovoltaicos e, conseqüentemente a geração fotovoltaica como um todo, cada vez mais sustentável em suas diversas dimensões.

Destaca-se ainda que a consequência negativa da falta deste conhecimento pode ser o crescimento da geração fotovoltaica em uma direção contrária ao que se pretende com essa tecnologia: que é a busca pela sustentabilidade, em todas as suas dimensões, no setor elétrico; busca essa, que vai ao encontro dos objetivos deste Relato de Tese apresentados na Seção seguinte.

1.4 OBJETIVOS DA PESQUISA

Diante dos desafios anteriormente registrados, nesta Seção apresentam-se os objetivos geral e específicos que contemplam esta Tese.

Utilizando-se da taxonomia dos objetivos educacionais proposta por Bloom *et al.* (1956), classifica-se o presente trabalho no domínio Cognitivo, o qual é relacionado ao aprender, ao pensar sobre um problema ou fato, a dominar um conhecimento, envolvendo o “reconhecimento de fatos específicos, procedimentos padrões e conceitos que estimulam o desenvolvimento intelectual constantemente” (Ferraz; Belhot, 2010, p. 422). Em relação ao nível de profundidade de aprendizado, este trabalho se insere na categoria de Síntese, a qual inclui a habilidade de agregar e unir as partes com a finalidade de criar um novo todo diferenciado (Bloom *et al.*, 1956; Ferraz; Belhot, 2010).

1.4.1 Objetivo Geral

Propor um conjunto de indicadores para avaliação da sustentabilidade de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

1.4.2 Objetivos Específicos

- OE1 – Selecionar indicadores para a elaboração de um quadro referencial de Indicadores de Sustentabilidade para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, considerando-se as variáveis da dimensão da sustentabilidade ambiental urbana.
- OE2 – Validar os Indicadores de Sustentabilidade por meio de consulta a painel de especialistas.
- OE3 – Elaborar o Quadro Referencial de Indicadores a partir da validação efetuada.

1.5 JUSTIFICATIVAS TEÓRICO-PRÁTICAS E MOTIVAÇÃO PESSOAL

Nesta Seção são apresentadas as justificativas teórica, prática e a motivação pessoal para o desenvolvimento do presente trabalho.

1.5.1 Justificativa Teórica

O planejamento do setor energético é fundamental no que diz respeito a assegurar a continuidade do fornecimento de energia elétrica à sociedade, ao menor custo, com o menor risco contra o desabastecimento, e com os menores impactos socioeconômicos e ambientais, além de ser ferramenta essencial na formulação de

políticas públicas específicas para a área energética (Empresa de Pesquisa Energética, 2020; 2024c; Tiepolo, 2015).

Nesse sentido, o Plano Nacional de Energia – PNE – 2050 cita como um dos desafios a serem alcançados no Brasil no horizonte 2020-2024 a realização de estudos socioambientais relativos à fonte solar, que visem embasar a identificação dos impactos ambientais, ponderando a relação de benefícios e de ônus dos empreendimentos (Empresa de Pesquisa Energética, 2020). Contribuindo assim, para a definição consistente dos planos, dos programas e das medidas socioambientais para monitoramento, mitigação ou compensação dos impactos da geração solar (Empresa de Pesquisa Energética, 2020).

A complexidade da cadeia de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica torna necessário, portanto, o acurado planejamento energético no setor, observando-se tanto o lado da oferta quanto do lado da demanda (Empresa de Pesquisa Energética, 2015). Os formuladores de política e as agências reguladoras são atores com grande poder institucional, influenciando todo o setor elétrico nacional por meio de suas decisões. Essas decisões, na maioria das vezes, são tomadas perante um ambiente de incertezas e necessitam de processos sistemáticos de apoio à decisão e de indicadores adequados (Empresa de Pesquisa Energética, 2015). Moreira *et al.* (2024) corroboram, afirmando que a tomada de decisões conscientes depende da obtenção de informações estratégicas baseadas em avaliações robustas e dados precisos.

Uma tomada de decisão embasada e uma gestão eficiente no setor se tornam essencialmente relevantes, quando se considera a energia elétrica como uma infraestrutura estratégica fundamental para os assuntos internos de um país (Bridge, Ozkaynak, Turhan, 2018; Ofgem, 2022; Song, Shahzad, Paramati, 2023). O progresso econômico, a estabilidade política e a prosperidade social são fatores basilares para garantir a autossuficiência, a competitividade e a sustentabilidade de países no cenário global (Bridge, Ozkaynak, Turhan, 2018; Ofgem, 2022; Song, Shahzad, Paramati, 2023).

Para Meadows (1998, p. 2 - tradução nossa) os indicadores são ferramentas de mudança, aprendizado e propaganda, sendo que sua presença, ausência ou destaque afetam o comportamento em relação ao fato avaliado, uma vez que “tentamos medir o que valorizamos” e “passamos a valorizar o que medimos”, tornando assim, a escolha de indicadores um processo epistemológico em relação

ao objeto de estudo. Meadows (1998) aprofundou essa discussão afirmando que o processo de busca pelo desenvolvimento sustentável é uma construção social extremamente complexa, e que os modelos utilizados para entender essa dinâmica são incompletos, pois os indicadores envolvidos são imperfeitos, fazendo com que as decisões sejam tomadas sob incerteza, ao mesmo tempo em que, continua a autora, é tarefa dos agentes envolvidos reduzir essa incerteza. Por estarem no centro do processo de tomada de decisão, quando os indicadores são mal escolhidos, imprecisos, tendenciosos ou mal avaliados, eles podem causar erros de interpretação do fenômeno em análise, as decisões baseadas nestes indicadores podem não ser eficazes, levando a condutas equivocadas e super ou sub-reações ao fenômeno.

Assim, a determinação de indicadores que avaliem a sustentabilidade de SFV é fundamental para que a sua conjuntura atual e futura seja considerada nos estudos de planejamento energético do país, pois, por ser uma tecnologia ainda em fase de consolidação e expansão, este tipo de entendimento pode ser fundamental para a sua viabilidade, sua continuidade e para a consolidação da sua maturidade tecnológica (Empresa de Pesquisa Energética, 2020; Scolari, 2019; Shaker *et al.*, 2024).

Reforça-se que a questão energética assume tal importância, no contexto da sustentabilidade, que ela é mencionada diretamente no sétimo ODS, no qual se lê: “Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos” (Organização das Nações Unidas, 2015, p. 26). Além desta menção direta no sétimo ODS, a questão energética aparece de forma secundária em vários outros ODS, como por exemplo, no décimo primeiro ODS no qual é destacada a necessidade de tornar as cidades mais sustentáveis, e no décimo terceiro ODS no qual é reforçada a necessidade de combater a mudança climática (Organização das Nações Unidas, 2015), todos estes aspectos relacionados, mesmo que de forma indireta à questão energética.

De outra parte, na conjuntura do entendimento do papel das fontes renováveis de energia na consecução dos ODS, Olabi *et al.* (2023) afirmam que a literatura científica na área é escassa em relação aos acordos sobre as abordagens metodológicas e às rotas para alcançá-los, sendo necessário melhor entendimento ambiental, social e econômico destas fontes geradoras.

Nesse sentido, para Butturi *et al.* (2018), uma maior implantação de fontes distribuídas de energia renovável é considerada essencial para a transição para um sistema elétrico mais sustentável. No entanto, Butturi *et al.* (2018) afirmam que a discussão sobre a introdução de fontes distribuídas renováveis no sistema elétrico há muito se concentra em questões técnicas, econômicas e políticas, porém, a transição para um sistema elétrico sustentável exige mudança de perspectiva, considerando uma visão de sustentabilidade multissetorial, bem como, a necessidade de ação multissetorial, visão essa adotada por este estudo, e abordada nas Seções 2.3 e 2.4.

Butturi *et al.* (2018) concluem afirmando que a transição para um sistema elétrico de baixa emissão e com alta participação de fontes de energia renováveis pode ser acelerada pela integração de fontes renováveis por meio da micro e minigeração distribuída no ambiente urbano, foco do presente estudo.

Adentrando no contexto da sustentabilidade ambiental urbana, Zhou *et al.* (2024) destacam a relevância do estudo da sustentabilidade sob esse viés, ressaltando a importância desse entendimento na tomada de decisões. Esses autores citam ainda os principais tópicos de pesquisa na área que incluem: sustentabilidade hídrica, sustentabilidade energética, sustentabilidade da qualidade do ar, sustentabilidade da terra, entre outros; evidenciando novamente a importância do aprofundamento de estudos de sustentabilidade energética no contexto ambiental urbano.

A síntese das principais lacunas mencionadas é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 – Lacunas de Pesquisa Identificadas no Referencial Teórico

Autores	Lacunas Identificadas
Empresa de Pesquisa Energética (2020; 2024c) e Tiepolo (2015)	Destacam a importância do planejamento do setor energético como forma de assegurar a continuidade do fornecimento de energia elétrica à sociedade e citam a necessidade de realização de estudos socioambientais relativos à fonte solar.
Empresa de Pesquisa Energética (2015) e Moreira <i>et al.</i> (2024)	Ressaltam que as decisões no setor energético, na maioria das vezes, são tomadas perante um ambiente de incertezas e necessitam de processos sistemáticos de apoio à decisão, baseadas em avaliações robustas e dados precisos.
Bridge, Ozkaynak e Turhan (2018), Ofgem (2022) e Song, Shahzad e Paramati (2023)	A energia elétrica é vista como uma infraestrutura estratégica fundamental para os assuntos internos de um país, sendo fator basilar para garantir a competitividade deste país no cenário global.
Organização das Nações Unidas (2015)	O sétimo Objetivo de Desenvolvimento Sustentável menciona a importância de assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos e de tornar as cidades mais sustentáveis.
Olabi <i>et al.</i> (2023)	Citam a escassez na literatura científica de acordos metodológicos e rotas que conduzam ao entendimento do papel das fontes renováveis de energia no alcance dos ODS.
Butturi <i>et al.</i> (2018)	Destacam a importância da implantação de fontes distribuídas de energia renovável para uma transição para um sistema elétrico mais sustentável. Ressalta ainda que a transição para um sistema elétrico sustentável exige uma mudança de perspectiva, considerando uma visão de sustentabilidade multissetorial e a necessidade de ação multissetorial.
Zhou <i>et al.</i> (2024)	Destacam a importância do aprofundamento de estudos de sustentabilidade energética no contexto da sustentabilidade ambiental urbana.

Fonte: Autoria própria (2024).

Diante deste contexto, constata-se haver relevância em estudos que proponham indicadores de sustentabilidade aplicados a Sistemas Fotovoltaicos (SFV) de modo a contribuir para o avanço desta tecnologia e das tomadas de decisão no setor, possibilitando direcionar de maneira mais eficaz políticas públicas urbanas, planejamentos energéticos, programas de incentivo a instalação de SFV, entre outros, no sentido de tornar os SFV e, conseqüentemente a geração fotovoltaica como um todo, cada vez mais sustentável em suas diversas dimensões.

Sob outra perspectiva, para levantar a relevância teórica da pesquisa e sua originalidade – lacunas de pesquisa, sob o aspecto da produção científica, foi realizado um levantamento bibliográfico preliminar, a partir de cinco grandes conceitos correlatos ao tema: (i) Indicadores de Sustentabilidade, (ii) Sistemas

Fotovoltaicos, (iii) Energia Renovável, (iv) Sustentabilidade Ambiental Urbana e (v) Desenvolvimento Sustentável.

Esta investigação foi efetuada inicialmente em agosto de 2022 e refeita em julho de 2024 e atualizada, pontualmente, em setembro de 2024, nas seguintes bases de dados: (i) SciELO (*Scientific Electronic Library Online*), (ii) BDTD (Biblioteca Digital de Teses e Dissertações), (iii) Scopus (Elsevier) e (iv) Web of Science (Coleção Principal – Clarivate Analytics). Entre as diversas bases de dados disponibilizadas pelo portal de periódicos da CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, essas foram escolhidas pela expressiva quantidade de itens indexados revisados por pares em cada uma delas e por oferecerem uma visão geral abrangente da produção mundial em diferentes áreas de pesquisa, tornando assim a pesquisa abrangente o suficiente para abordar os temas em questão de forma interdisciplinar com a profundidade e a amplitude necessárias e minimizando o viés de pesquisa.

O recorte temporal utilizado foi o de documentos publicados nos últimos 5 anos, compreendendo o período de 2020 até 2024. As palavras-chave foram pesquisadas de forma isolada e combinada, e os idiomas utilizados foram o português e o inglês. Os assuntos foram buscados no título, nas palavras-chave e no resumo dos documentos nas bases de dados indicadas, e dentro de cada um dos assuntos buscados foram definidos grupos de descritores que representassem o respectivo conceito, associados a partir do uso de operadores booleanos. Os principais resultados obtidos, na busca combinada, encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados Obtidos na Pesquisa em cada Base de Dados.

Assunto Pesquisado	Resultados				
	Scielo	BDTD	Scopus	Web of Science	Total
“Indicadores de Sustentabilidade” AND “Sistemas Fotovoltaicos” “ <i>Sustainability Indicators</i> ” AND “ <i>Photovoltaic Systems</i> ”	0	6	42	35	625
“Indicadores de Sustentabilidade” AND “Energia Renovável” “ <i>Sustainability Indicators</i> ” AND <i>Renewable Energy</i> ”	0	17	148	119	
“Indicadores de Sustentabilidade” AND “Sustentabilidade Ambiental Urbana” AND “Desenvolvimento Sustentável” “ <i>Sustainability Indicators</i> ” AND “ <i>Urban Environmental Sustainability</i> ” AND “ <i>Sustainable Development</i> ”	2	17	156	79	
“Indicadores de Sustentabilidade” AND “Sistemas Fotovoltaicos” AND “Energia Renovável” AND “Sustentabilidade Ambiental Urbana” AND “Desenvolvimento Sustentável” “ <i>Sustainability Indicators</i> ” AND “ <i>Photovoltaic Systems</i> ” AND “ <i>Renewable Energy</i> ” AND “ <i>Urban Environmental Sustainability</i> ” AND “ <i>Sustainable Development</i> ”	0	0	4	0	

Fonte: Autoria própria (2024).

Foi demonstrado pelo levantamento bibliográfico preliminar, realizado em julho de 2024, que a pesquisa combinada pelos assuntos buscados recuperou 625 documentos no total, justificando pertinência e atualidade dos temas e validando a necessidade de se ampliar os estudos interdisciplinares na área, uma vez que se trata de um enfoque novo e pouco explorado na literatura. Além disso, apenas 4 documentos foram recuperados na pesquisa com as cinco palavras-chaves combinadas, demonstrando assim a originalidade do tema na ótica pretendida.

Também foi demonstrada a carência destes conteúdos no idioma português quando comparado ao idioma inglês: enquanto no idioma inglês foram recuperados 583 documentos, no idioma português recuperou-se 42, indicando uma lacuna compatível com a ampliação de pesquisas em âmbito nacional.

Finalmente, verificou-se, também por meio da revisão sistemática, a inexistência de teses e dissertações no Brasil com o enfoque pretendido, pois a pesquisa pelos cinco temas buscados, neste momento temporal, não retornou nenhum resultado na BDTD.

Diante do exposto justifica-se a importância teórica do desenvolvimento da presente tese, no julgo deste autor.

Ressalta-se ainda que o descritivo completo da metodologia utilizada nesta pesquisa bibliográfica, deste o procedimento para definição dos descritores, os parâmetros de pesquisa, os critérios de inclusão e exclusão, até a definição das buscas combinadas será descrito com detalhes na Seção 5.3 do Capítulo de Metodologia da Pesquisa.

1.5.2 Justificativa Prática e Motivação Pessoal

Segundo a classificação da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES (2019a, 2022) o presente trabalho se encontra inserido dentro da área de Ciências Ambientais, que está estabelecida dentro da grande área Multidisciplinar, a qual, por sua vez, se enquadra no Colégio de Ciências Exatas, Tecnológicas e Multidisciplinar.

Conforme a CAPES (2011), diz-se multidisciplinar, pois a área de Ciências Ambientais, por fundamento, não se constitui como um simples somatório ou combinação entre ciências, sendo intrínseca a ela, na sua origem, a abordagem interdisciplinar, isto é, um método de construção de conhecimentos de fronteira que nasce de uma problemática e complexidade que se deseja identificar, compreender e preferencialmente resolver. Assim, a área de Ciências Ambientais surge da necessidade de se promover conexões entre disciplinas e seus desdobramentos (CAPES, 2011).

Desta forma, conforme já mencionado, este estudo possui uma natureza transversal, pretendendo tratar de maneira interdisciplinar a questão de indicadores de sustentabilidade, sustentabilidade ambiental urbana e energia solar fotovoltaica, procurando avançar para além de suas respectivas fronteiras disciplinares, ultrapassando desta forma os limites do conhecimento disciplinar (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, 2019b), integrando os saberes das áreas de Ciências Ambientais, das Engenharias, de Ecologia, de Administração e de Economia.

É com este alinhamento transversal e interdisciplinar que se fundamenta o Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade Ambiental Urbana – PPGSAU (2019) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, que se encontra inserido dentro da área de Ciências Ambientais, tendo como foco a sustentabilidade ambiental urbana, a partir de perspectiva interdisciplinar.

Segundo o PPGSAU (2024, *online*), o programa “apoia-se em dois grandes eixos temáticos, Sustentabilidade e Ambiente Urbano, cuja intersecção demanda diversidade de competências e atuação interdisciplinar”. A área de concentração de estudos é única, a Sustentabilidade Ambiental Urbana, subdividida em duas Linhas de Pesquisa: Instrumentos de Gestão para Sustentabilidade, e Tecnologias para Sustentabilidade.

Este estudo encontra-se inserido na Linha de Pesquisa de Instrumentos de Gestão para Sustentabilidade – IGS, uma vez que proporrá indicadores de sustentabilidade como instrumento de avaliação e monitoramento da sustentabilidade dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

Ainda segundo o PPGSAU (2024, *online*, grifo nosso), a Linha de Pesquisa IGS engloba:

Pesquisas básicas, prospectivas e aplicadas em instrumentos de gestão para sustentabilidade urbana. Envolve desenvolvimento de métodos, técnicas de tomada de decisão, técnicas de planejamento e gestão, **indicadores e avaliação de sustentabilidade urbana**, sistemas de informação para sustentabilidade, processos de formação e capacitação, gestão da informação.

A presente pesquisa cumpre, portanto, os requisitos formais de classificação e de conteúdo da Linha de Pesquisa, da Área de Concentração e dos Objetivos do Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade Ambiental Urbana, registrando-se a sua aderência ao Programa.

De uma ótica profissional, observa-se que a elaboração do quadro de indicadores proposto nesta pesquisa tem potencial de contribuir positivamente para o mercado fotovoltaico, dentro de uma abordagem de avaliação multicritérios, trazendo parâmetros de avaliação de desempenho entre diversos SFV instalados, servindo de instrumento para apoiar o processo de tomada de decisão e para aprimorar a comparação de soluções e de propostas técnico-comerciais para implantação de novos empreendimentos.

Como motivação pessoal para a escolha do tema, destaca-se o interesse profissional e acadêmico do pesquisador, que identificou a relevância do tema para a comunidade científica e profissional na qual está inserido. No nível acadêmico o tema já foi abordado pelo autor desde o seu curso de Mestrado (2018–2019); no nível profissional, como engenheiro eletricista, este campo faz parte do seu cotidiano de trabalho. Do ponto de vista de atuação futura, o desenvolvimento da presente tese conferirá subsídios para que o autor continue desenvolvendo e aprofundando pesquisas na área em nível acadêmico e compartilhando o conhecimento adquirido como professor universitário.

O pesquisador, igualmente, é integrante do Grupo de Pesquisa Conhecimento e Sustentabilidade Organizacional – CSO, do qual sua Orientadora é a líder. Os níveis de discussão que este grupo aborda são:

[...] i) criação, uso e reúso do conhecimento organizacional e os impactos socio-ambientais, urbanos, rurais, culturais e econômicos destes na Sociedade; ii) cidades globais, seus arranjos produtivos e o meio ambiente urbano; iii) uso e aplicação da Tecnologia e as necessárias combinações e adequações para as condições de desenvolvimento socioambiental, urbano, rural e organizacional sustentável. O grupo de pesquisa, composto por pesquisadores com formações diversas, caracteriza-se pela sua interdisciplinaridade e a procura de aprofundamento em seus núcleos temáticos (Conhecimento e Sustentabilidade Organizacional, 2024, *online*).

Assim, considerando que a presente Tese propõe ferramentas – indicadores de sustentabilidade – visando a promoção do desenvolvimento sustentável no território urbano, esta conflui com a linha de atuação do grupo de pesquisa, da orientação e atende às motivações pessoais e profissionais do pesquisador e da comunidade à qual este serve.

1.6 ABORDAGEM METODOLÓGICA DA PESQUISA

O objetivo deste subitem é apresentar, de forma concisa, as bases metodológicas utilizadas no desenvolvimento da pesquisa. Segundo Remenyi *et al.* (1998), o paradigma de pesquisa é o modo como o pesquisador entende e interpreta a realidade do mundo, ou ainda, segundo Moreira e Caleffe (2011, p.249), o

“conjunto de lentes” usadas para entender o mundo pesquisado e como estas influenciarão o processo de pesquisa.

O paradigma de pesquisa comporta três elementos; (1) a ontologia – natureza e essência da realidade pesquisada; (2) a epistemologia – natureza e tipologia de criação do conhecimento, bem como a relação que se estabelece entre investigadores e o objeto investigado e (3) a metodologia – os métodos que permitirão apreender dados e informações para identificar as estratégias, os planos de ação, as técnicas de coleta de dados, para orientar o desenvolvimento de projetos de pesquisa (Creswell; Clark, 2014; Moreira; Caleffe, 2006).

No presente trabalho, que se encontra inserido dentro da área de Ciências Ambientais, adotou-se uma abordagem ontológica de ordem interpretativista que se caracteriza pelo “descrever e interpretar o fenômeno do mundo em uma tentativa de compartilhar significado com os outros” (Moreira; Caleffe, 2006, p. 61), levando predominantemente a tratamentos qualitativos dos dados coletados aplicando-se vários métodos e técnicas de análise a partir de leituras e da reflexão sobre as obras selecionadas, que tratem de teorias e de conhecimentos já existentes, relativos ao problema de investigação.

Da questão epistemológica compreende-se o conhecimento como intangível (Nonaka; Konno, 1998; Polany, 1967), edificado socialmente, fundamentado na interação entre diversos atores e situações, justificando o uso de diversos métodos, técnicas e procedimentos para se chegar aos dados necessários ao desenvolvimento da pesquisa (Moreira; Caleffe, 2006).

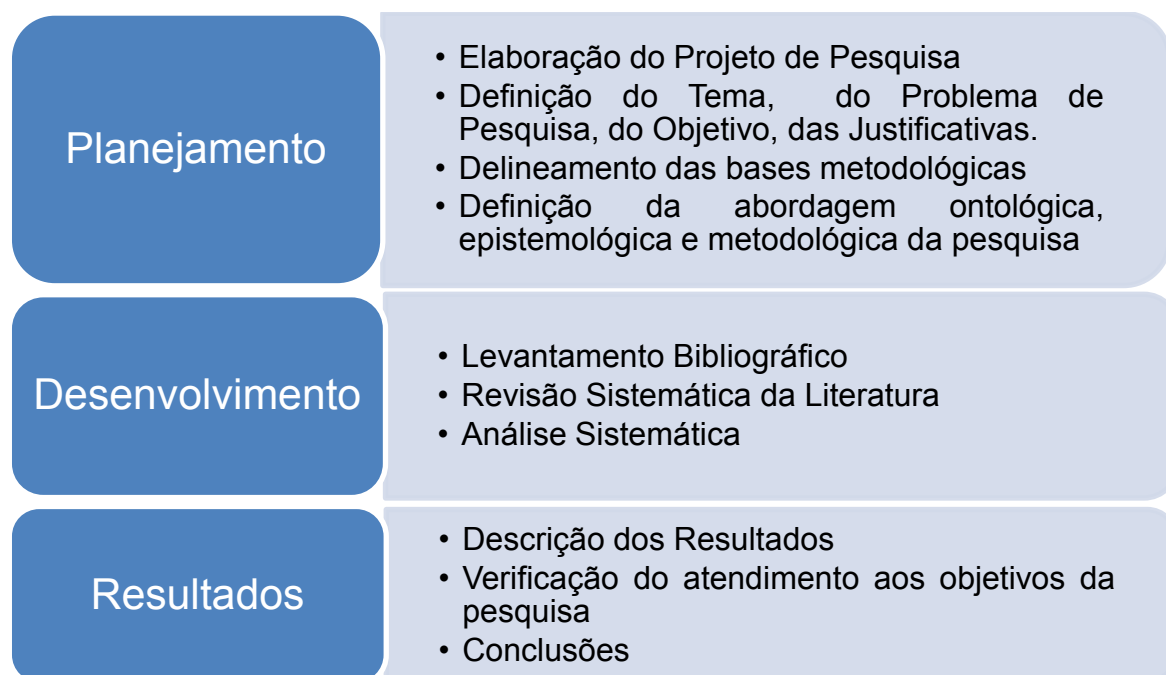
Este estudo pretendeu levantar os dados sobre indicadores de sustentabilidade aplicáveis a sistemas fotovoltaicos por meio de pesquisa bibliográfica de fontes secundárias, ou seja, de documentos já publicados sobre o assunto. Mais especificamente, esta pesquisa bibliográfica foi efetuada por meio de Revisão Sistemática da Literatura – RSL – utilizando-se das recomendações de Dresch, Lacerda e Antunes Jr. (2015) e Page *et al.* (2021), conforme será detalhado na Seção 5.3.

Segundo Marconi e Lakatos (2002, p. 183, 2003), a pesquisa bibliográfica, ou de fontes secundárias, abrange a bibliografia já tornada pública em relação ao tema de estudo, sendo que “sua finalidade é colocar o pesquisador em contato direto” com o que foi publicado sobre determinado assunto.

Nesse método de pesquisa uma multiplicidade de técnicas, para coleta e tratamento dos dados, pode ser aplicada, incluindo a "análise de conteúdo para extrair generalizações com o propósito de produzir categorias conceituais que possam vir a ser operacionalizada em um estudo subsequente" (Marconi; Lakatos, 2002, p. 85). Desta abordagem, este estudo é classificado como misto, contudo com viés de análise predominantemente qualitativo, pois se utiliza de coleta de dados, não necessariamente numéricos, "para descobrir ou aprimorar perguntas de pesquisa no processo de interpretação", utilizando-se, no entanto, de análise quantitativa, quando necessária (Creswell; Clark, 2014; Sampieri; Collado; Lúcio; 2013, p. 33).

A análise sistemática foi fundamentada nas perspectivas de Dresch, Lacerda e Antunes Jr. (2015) e Page *et al.* (2021) e na abordagem de análise de conteúdo descrita por Bardin (2016), que a conceituou como um conjunto de técnicas que viabiliza partir de "procedimentos sistemáticos e objetivos de descrição do conteúdo das mensagens, a obtenção de indicadores quantitativos ou não, que permitam a inferência de conhecimentos relativos às condições de produção e recepção das mensagens" (Bardin, 2016, p. 44).

As macro etapas desta pesquisa estão ilustradas na Figura 1.

Figura 1 – Etapas de Pesquisa.

Fonte: Autoria própria (2024)

A pesquisa foi realizada em três fases: o planejamento da pesquisa, o desenvolvimento desta e a apresentação dos resultados. O planejamento da pesquisa consistiu, inicialmente, da elaboração do projeto da pesquisa, incluindo a definição do tema, a delimitação, a problematização, os objetivos, as justificativas e definições metodológicas iniciais. O desenvolvimento da Pesquisa consistiu nas etapas do levantamento bibliográfico, de revisão sistemática da literatura, de localização dos dados e da análise sistemática. A etapa final do trabalho transcreverá, neste Relato de Tese, agora sob forma de evidências, os resultados da pesquisa de forma a confirmar a tese proposta.

1.7 EMBASAMENTO TEÓRICO

A publicação do *Relatório Brundtland* pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento – CMMAD – em 1987 lançou a noção de sustentabilidade ao debate público (Acseirad, 1999). O *Relatório Brundtland* apresenta a definição mais famosa e que se tornou mundialmente conhecida de desenvolvimento sustentável, afirmando que o “desenvolvimento sustentável é aquele que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das

gerações futuras de suprir suas próprias necessidades” (Berardi, 2013; Borges; Tachibana, 2005; Comissão Mundial Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, 1987, p. 41).

Segundo Maia e Pires (2011), uma das abordagens mais importantes sobre as dimensões da sustentabilidade é a de Sachs (2002), classificando-as em oito dimensões: (i) social, (ii) cultural, (iii) ecológica, (iv) ambiental, (v) territorial, (vi) econômica, (vii) política (nacional) e (viii) política (internacional). Ainda segundo Maia e Pires (2011), diferentes compreensões desta classificação ocorrem em virtude das diferentes interpretações envolvendo os estudos da sustentabilidade, sendo consenso as três dimensões básicas da sustentabilidade: (i) econômica, (ii) social e (iii) ambiental, formando o Triple *Bottom Line*, ou Tripé da Sustentabilidade, proposto por Elkington (1994, 1999) (Sartori; Latrônico; Campos, 2014; Slaper; Hall, 2011).

Derivado dos alinhamentos supramencionados, nesta pesquisa utilizar-se-ão cinco dimensões para categorizar os indicadores de sustentabilidade de sistemas fotovoltaicos, consoante aos estudos de Ghenai, Albawab e Bettayeb (2020), Mei e Chen (2021), Nagarkatti e Kolar (2021) e Zhan e Li (2024), que se utilizam das dimensões: (i) Ambiental, (ii) Econômica, (iii) Social, (iv) Recursos e (v) Tecnológica, ao classificar indicadores de sustentabilidade para fontes renováveis de energia.

Em cada uma das dimensões da sustentabilidade consideradas, as proposições de IDS neste estudo foram orientadas com base nos 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável – ODS, já mencionados e contidos na *Agenda 2030* (Organização das Nações Unidas, 2015), discutida pelos líderes de governos e de Estado de 193 países na Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável de setembro de 2015 (Centro de Informações das Nações Unidas no Brasil, 2021; Organização das Nações Unidas, 2016; Movimento Nacional ODS, 2020; RIO+20, 2012).

As Ciências Ambientais, a problemática ambiental, e, mais especificamente o contexto do desenvolvimento sustentável, será tratado a partir de uma perspectiva interdisciplinar do conhecimento, reconhecendo a relação de interdependência entre sociedade e natureza, conforme visão exposta por Jong e Vijge (2021), Philippi Jr. *et al.* (2000, 2013), Fernandes e Rauen (2016), Sobral *et al.* (2015) e compartilhada por Berkes (2005), Dansereau (1999), Leff (2000), Morin (2010), Sachs (1986), Serres (1990) e Vieira (1992). A temática do desenvolvimento sustentável no contexto

ambiental urbano é abordada por Fu e Zhang (2017), Izquierdo (2022), Sobral *et al.* (2019), Sotto *et al.* (2019) e Zhou *et al.* (2024).

Os Indicadores de Sustentabilidade propostos seguirão as características desejáveis de indicadores de sustentabilidade apresentadas por Berliner e Brimson (1988), Caldeira (2018), Callado e Fensterseifer (2010), Meadows (1998), Neely *et al.* (1997), Seyisi, Mantlana e Ndhleve (2023), Tironi *et al.* (1991) e Zhou *et al.* (2024), e estarão alinhados com as teorias sobre o assunto, incluindo os estudos de Gallopín (1996), Holling (1978), Malheiros, Philippi Jr. e Coutinho (2008), Meadows (1998), Philippi Jr. e Malheiros (2012), Tunstall (1992) e Van Bellen (2002).

A tecnologia fotovoltaica será abordada fundada na literatura de base e em estudos de Agência Nacional de Energia Elétrica (2023), Olabi *et al.* (2023), Pereira *et al.* (2017), Pinho e Galdino (2014), Rüther (2004), Scolari (2019), Tiepolo (2015), Tiepolo *et al.* (2017), Urbanetz Jr. (2010) e Villalva e Gazoli (2012). O cenário fotovoltaico será apresentado conforme estudos da Agência Nacional de Energia Elétrica (2025a, 2025b), Empresa de Pesquisa Energética (2024a, 2024b) e REN21 (2024).

Em relação ao contexto metodológico do trabalho, utilizar-se-ão as recomendações de Creswell e Clark (2014), Gil (2002 e 2008), Marconi e Lakatos (2002 e 2003), Sampieri, Collado e Lucio (2013), Guertin e Bernhard (2005) e Bardin (2016). A Revisão Sistemática da Literatura se apoiará nas recomendações de Dresch, Lacerda e Antunes Jr. (2015) e Page *et al.* (2021), conforme será detalhado na Seção 5.3.

Assim, foram destacados os principais marcos teóricos que ofereceram subsídio sobre os temas abordados, tecendo o pano de fundo e embasando cientificamente o desenvolvimento do presente trabalho e que serão tratados em Capítulos específicos e articulados.

1.8 ESTRUTURA DO RELATO DE TESE

O presente Relato é formado por sete capítulos assim distribuídos:

- Capítulo 1 – Introdução, com apresentação do tema e da delimitação da pesquisa, da problemática, da questão de pesquisa, dos pressupostos, da tese,

dos objetivos da pesquisa, da justificativa, da abordagem metodológica, do embasamento teórico e da estrutura do trabalho.

- Capítulo 2 – Revisão da Literatura, abordando a temática da Sustentabilidade.
- Capítulo 3 – Revisão da Literatura, abordando conceitos relativos à Energia Solar Fotovoltaica.
- Capítulo 4 – Alinhamento conceitual.
- Capítulo 5 – Procedimentos Metodológicos, apresentando a metodologia, os métodos, as técnicas e os procedimentos empregados.
- Capítulo 6 – Dados auferidos e resultados da Pesquisa.
- Capítulo 7 – Considerações finais.

Finalizada a apresentação dos aspectos introdutórios deste Relato de Tese, os próximos dois capítulos tratam da Revisão da Literatura que sustentam as discussões da Tese, culminando no Capítulo de Alinhamento Conceitual, que estabelece o principal viés da análise teórica. Aprofunda-se, então, no próximo Capítulo, a temática da sustentabilidade, iniciando pela caracterização da sua natureza interdisciplinar, seguida da apresentação do seu histórico e finalizando com o subtema indicadores.

2 SUSTENTABILIDADE: das suas origens ao uso de indicadores

Neste Capítulo é abordada inicialmente a relação entre Ciências Ambientais e interdisciplinaridade e apresentado um breve histórico da temática da sustentabilidade. Em sequência tratar-se-á a respeito da Sustentabilidade Ambiental Urbana, das Dimensões do Desenvolvimento Sustentável e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Por fim, se discorrerá sobre Indicadores de Sustentabilidade.

2.1 CIÊNCIAS AMBIENTAIS E INTERDISCIPLINARIDADE

Os processos de interação da sociedade com o seu meio ambiente são naturalmente interdisciplinares (Philippi Jr. *et al.*, 2000). Em sua simplicidade de raciocínio, contudo, transformou-se este complexo conjunto de interações em elementos disciplinares para melhor entendê-los. Essa dinâmica, conforme Philippi Jr. *et al.* (2000), foi útil e criou um bom avanço científico-tecnológico por muitas décadas. Porém, o próprio desenvolvimento humano “gerou novas pressões e interações ambientais que exigem da ciência uma indispensável postura interdisciplinar” (Philippi Jr. *et al.*, 2000, p. XIII).

Segundo Leff (2000, p.19), inseridos nesta dinâmica fracionalista do conhecimento, “a crise ambiental e a crise do saber surgem como a acumulação de externalidades do desenvolvimento do conhecimento e do crescimento econômico”, representando “todo um campo do real negado e do saber desconhecido” proporcionado por esta conjuntura reducionista, requerendo a “internalização de uma dimensão ambiental através de um método interdisciplinar, capaz de reintegrar o conhecimento para apreender a realidade complexa”, avançando, segundo Philippi Jr. (2000, p. 4), “epistemologicamente no sentido de provocar a integração das diferentes interfaces com as quais se apresentam as questões de ordem ambiental”.

Segundo Schmitt *et al.* (2022), na conjuntura do constante aperfeiçoamento do método científico, o estudo interdisciplinar se apresenta como um método promissor, sendo aceito e aplicado pela comunidade científica nas últimas décadas, em um esforço de superar a especialização da ciência e a fragmentação do saber

em diversas áreas de estudo e de pesquisa. Neste sentido, apesar de a interdisciplinaridade não ser considerada por Bicudo (2008) uma ontologia e nem tão pouco uma epistemologia, esta repousa sobre concepções ontológicas e epistemológicas específicas, sendo um modo de proceder e de pesquisar.

Conforme a conceituação epistemológica de Coimbra (2000), a interdisciplinaridade consiste em uma abordagem em que duas ou mais disciplinas estabelecem vínculos intencionais entre si com o objetivo de alcançar um conhecimento mais abrangente, mais diversificado e mais unificado. Cada disciplina, continua Coimbra (2000), mantém a sua própria identidade, sendo essencial que a ciência e o cientista continuem a ser o que são, porém, compartilhando hipóteses, elaborações e conclusões de outras ciências.

Leff (2000, p. 19) destaca a conjuntura e o momento histórico do aparecimento da discussão sobre a questão ambiental e a interdisciplinaridade:

A questão ambiental, com a sua complexidade, e a interdisciplinaridade emergem no último terço do século XX (finais dos anos 60 e começo da década de 70) como problemáticas contemporâneas, compartilhando o sintoma de uma crise de civilização, de uma crise que se manifesta pelo fracionamento do conhecimento e pela degradação do ambiente, marcados pelo logocentrismo da ciência moderna e pelo transbordamento da economização do mundo guiado pela racionalidade tecnológica e pelo livre mercado.

Sobral *et al.* (2015) acrescentam que os grandes problemas da humanidade, especialmente aqueles relacionados à natureza, são pontos de impulso ao desenvolvimento da Ciência, inclusive das Ciências Ambientais, que se apresentam como reflexo do reconhecimento das questões correlatas, principalmente após a década de 1960. Schmitt *et al.* (2022) complementam que o aumento da complexidade, da intensidade e da frequência dos problemas ambientais evidencia a necessidade de interação das diferentes áreas do saber no sentido de procurar soluções e ações práticas na busca da sustentabilidade ambiental, social e econômica. Neste sentido, a área de Ciências Ambientais, segundo Miller e Spoolman (2021), surge no sentido de integrar informações e ideias de áreas como biologia, química, geologia, engenharia, geografia, economia, ciência política e ética.

Ainda segundo Miller e Spoolman (2021), as Ciências Ambientais estudam de forma interdisciplinar as conexões do ambiente natural, investigando como a natureza funciona, como sobreviveu e prosperou e como os seres humanos

interagem com o meio ambiente e como a sociedade pode se desenvolver de forma mais sustentável. Deste modo, complementam Sobral *et al.* (2015), o conhecimento interdisciplinar nas Ciências Ambientais é essencial para dar resposta às questões ambientais, sendo mais do que um pressuposto, é um elemento constitutivo da dinâmica que agrega as demandas socioambientais e a conjuntura do desenvolvimento sustentável.

Schmitt *et al.* (2022), neste alinhamento, destacam a importância da adoção de práticas interdisciplinares nas Ciências Ambientais que atendam as demandas ambientais, sociais e econômicas do desenvolvimento sustentável, possuindo singular relevância para o avanço das pesquisas na área, além de instrumentalizar a comunidade com ferramentas que objetivem a superação de desafios de caráter socioambientais.

Assim, a discussão a respeito de indicadores de sustentabilidade aplicados a sistemas fotovoltaicos, tema desta tese e uma materialização das ferramentas supra aludidas, está inserida dentro do contexto de interdisciplinaridade apresentado, integrando os saberes das áreas de Ciências Ambientais, das Engenharias, da Ecologia, da Administração e da Economia, objetivando, como já mencionado por Coimbra (2000), alcançar um conhecimento mais abrangente, mais diversificado e mais unificado – discussão a se feita na Seção 2.6.

Julga-se, neste sentido, que traçar um histórico da temática da sustentabilidade é necessário preliminarmente, abordando os principais marcos da área, com a finalidade de embasar e de contextualizar o desenvolvimento do presente estudo, conduzindo a construção epistemológica da pesquisa.

2.2 HISTÓRICO DA TEMÁTICA DA SUSTENTABILIDADE

A transição entre os métodos de manufatura artesanais para a indústria mecânica, proporcionado pela Revolução Industrial iniciada na Inglaterra em meados do século XVIII, modificou o modo de vida do planeta impactando na forma como a sociedade consome recursos naturais e transforma o meio ambiente (Pott; Estrela, 2017). As questões ambientais derivadas destas transformações começaram a ser levantadas anos mais tarde, no final da década de 1960 e início da

década de 1970, quando a contaminação de ambientes naturais e seres humanos, decorrente desta nova realidade, chamou atenção da comunidade científica (Goldemberg; Barbosa, 2004; Philippi Jr. *et al.*, 2014).

Dentre os primeiros grandes eventos de poluição atmosférica relatados na literatura, Hogan (2007), Philippi Jr. *et al.* (2014) e Pott e Estrela (2017) destacam o *smog* em Londres no ano de 1952. Este episódio, que levou a óbito aproximadamente 4.000 pessoas, ficou conhecido como A Névoa Matadora, e foi o primeiro incidente ambiental “a promover a movimentação das autoridades de saúde” quanto à qualidade do ar, culminando na promulgação pelo governo britânico da primeira lei de controle da poluição do ar em 1956, chamada de Lei do Ar Puro (Goldemberg; Barbosa, 2004; Pott; Estrela, 2017, p. 272). A partir desta movimentação inicial britânica, novas leis foram aprovadas na América do Norte, Europa Ocidental e no Japão, promovendo “a criação de agências de monitoramento, regulamentação e avaliação da qualidade ambiental” (Goldemberg; Barbosa, 2004; Pott; Estrela, 2017, p. 272).

Vivendo nesta mesma época, e considerada, de acordo com Bonzi (2013, p. 208) como a “mãe do ambientalismo”, Rachel Carson (1907–1964) publicou em 1962 o livro *Primavera Silenciosa* (Carson, 1962), alertando para “o aumento do uso de compostos químicos no pós-guerra” (Pott; Estrela, 2017, p. 272). Segundo Philippi Jr. *et al.* (2014), esse livro teve importante papel na conscientização da sociedade em relação à causa ambiental e aos efeitos na saúde humana decorrentes da degradação do meio ambiente, levando “à proibição do uso do defensivo agrícola conhecido como DDT – Dicloro-Difenil-Tricloroetano” (Hogan, 2007; Pott; Estrela, 2017, p. 272).

Foram dez anos após a publicação do livro de Rachel Carson, porém, que o cenário mundial de fato tomou novos rumos (Pott; Estrela, 2017). Em 1972 foi publicado o relatório *Os limites do Crescimento* (Meadows *et al.*, 1972) pelo Clube de Roma, destacando questões fundamentais como poluição, saneamento, ambiente, energia e crescimento populacional, alertando que o modelo econômico praticado até então culminaria em um limite para seu crescimento (Magrini, 2001; Pott; Estrela, 2017).

Ainda no ano de 1972 a Primeira Conferência das Nações Unidas Para o Meio Ambiente Humano – CNUMAH realizada em Estocolmo (Organização das Nações Unidas, 1972) foi o grande marco institucional do “despertar de uma

consciência ecológica mundial”, (Andrade; Tachizawa; Carvalho, 2000, p. 2), objetivando conscientizar os países a respeito da importância da conservação ambiental como condição fundamental para a manutenção da espécie humana, de tal modo que representou um importante avanço no amadurecimento do conceito de Desenvolvimento Sustentável (Borges; Tachibana, 2005; Mebratu, 1998). Resultante desta conferência, a Declaração da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano (Organização das Nações Unidas, 1972, p. 4 – tradução nossa; Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, 2002) garante no seu primeiro princípio o direito fundamental do homem à “liberdade, à igualdade e a condições de vida adequadas um ambiente de qualidade que lhe permita levar uma vida com dignidade e bem-estar”, além de reforçar a sua “responsabilidade de proteger e melhorar o meio ambiente para as presentes e futuras gerações”.

Segundo Philippi Jr. *et al.* (2014), a conferência de 1972 tem importante correlação com as discussões trazidas no relatório *Os Limites do Crescimento*, sendo que este primeiro evento internacional contou com considerável presença dos países, destacando a necessidade crescente de discutir questões relacionadas aos problemas ambientais e seus impactos sobre as populações. Philippi Jr. *et al.* (2014) destacam ainda que nesta conferência foi criada o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – PNUMA e foi consolidado o conceito de ecodesenvolvimento, que, segundo Pott e Estrela (2017, p. 273), surge como sugestão de um novo tipo de desenvolvimento, no sentido de “conciliar o desenvolvimento econômico à prudência ecológica e à justiça social”, e fortalecer a consciência da sociedade em relação aos problemas ambientais.

Comemorando uma década desde a Conferência de Estocolmo, realizou-se no Quênia em 1982 a Assembleia Mundial dos Estados, a qual originou no ano seguinte a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento – CMMAD (Mello; Hogan, 2007; Pott; Estrela, 2017). Três anos após, em 1985, ocorreu na Áustria a Convenção de Viena para a Proteção da Camada de Ozônio, sendo complementada em 1987 pelo Protocolo de Montreal, que descreve padrões para a redução progressiva de produtos prejudiciais à camada de ozônio, sendo “o único documento até hoje a ter adesão universal” de todos os então 197 países do mundo (Ministério do Meio Ambiente, 2015; Pott; Estrela, 2017, p. 275).

Até este momento, o conceito de desenvolvimento sustentável não havia sido mencionado em nenhum trecho de nenhuma declaração oficial, inclusive não

sendo mencionado em nenhum trecho da declaração resultante da Conferência de Estocolmo de 1972, apesar de essa concepção já ser conhecida na época, de acordo com Mello e Hogan (2007) e Pott e Estrela (2017). Assim, foi a publicação do *Relatório Brundtland*, publicado em 1987 sobre o título *Nosso Futuro Comum*, pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (1987) que lançou a expressão “Desenvolvimento Sustentável” no debate público (Acseirad, 1999; Borges; Tachibana, 2005; Comissão Mundial Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, 1987, p. 41; Robinson, 2004), estabelecendo a necessidade de uma nova forma de relação com o meio ambiente (Pott; Estrela, 2017).

O *Relatório Brundtland* apresenta a definição mais famosa e que se tornou mundialmente conhecida de desenvolvimento sustentável, afirmando que “o desenvolvimento sustentável é aquele que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades” (Berardi, 2013; Borges; Tachibana, 2005; Comissão Mundial Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, 1987, p. 41). Philippi Jr. *et al.* (2014, p. 30) acrescentam ainda que o *Relatório Brundtland* “estabelece a relação fundamental entre desenvolvimento e meio ambiente”, destacando que “o desenvolvimento integral de qualquer território depende da construção de bases sustentáveis, apoiada no tripé justiça social, viabilidade econômica e equilíbrio ambiental”.

O citado relatório também faz menção ao uso de fontes renováveis de energia, que até então não haviam sido destacadas, avaliando que muitos dos problemas ecosocioeconômicos do mundo podem ser resolvidos com o aumento de uso destas fontes, sendo que a promoção do desenvolvimento sustentável requer um foco claro na conservação e no uso eficiente de energia, além de um esforço organizado para desenvolver e difundir novas tecnologias de energias renováveis (Comissão Mundial Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, 1987).

Esse contexto de crescentes reflexões sobre a temática ambiental, aliada à necessidade de revisão de paradigmas então vigentes estimulou países e a comunidade internacional a desenvolver ações conjuntas (Philippi Jr. *et al.*, 2013). Assim, a década de 1990 se apresentou promissora, impulsionada pelas discussões iniciadas mundialmente em Estocolmo e dos avanços do *Relatório Brundtland* (Pott; Estrela, 2017). A Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento – CNUMAD, realizada em 1992 na cidade do Rio de Janeiro, conhecida como Rio 92, Eco-92 ou Cúpula da Terra, foi um marco na

universalização da temática ambiental, abordando a questão ambiental em âmbito público de forma inédita quando governantes de mais de 170 países reuniram-se para discutir problemas urgentes de proteção ambiental e de desenvolvimento socioeconômico (Gugelmin *et al.*, 2003; Philippi Jr. *et al.*, 2013; Pott; Estrela, 2017)

Como resultado das discussões desenvolvidas durante a Rio 92, foram elaborados diversos documentos que sintetizam as preocupações dos povos com relação à questão ambiental, abordando de forma integrada temas como os padrões de produção e consumo, as desigualdades sociais e a necessidade de redução destas diferenças como uma forma de combater a degradação ambiental global (Mello; Hogan, 2007). Dentre estes documentos, a *Agenda 21 Global* (Organização das Nações Unidas, 1992) é considerada o mais importante segundo Gugelmin *et al.* (2003), tendo por finalidade reorientar o desenvolvimento em direção à sustentabilidade, constituindo-se em um processo de planejamento participativo voltado para a implementação de um novo modelo de desenvolvimento, uma vez que analisa a situação atual de determinada região e planeja o “manejo sustentável dos recursos naturais”, resguardando a qualidade de vida das gerações atuais e futuras, com forte ênfase em ações locais e descentralizadas (Gugelmin *et al.*, 2003; Mello, 2003, p. 67; Mello; Hogan, 2007; Pott; Estrela, 2017).

Além disso, a Rio 92 também resultou na criação da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC), que tem por objetivo “estabelecer a base para a cooperação internacional sobre as questões técnicas e as políticas relacionadas ao aquecimento global”; sendo que os países membros da Convenção se reúnem periodicamente na Conferência das Partes (COP) para analisar o progresso na implementação da Convenção (Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável, 2019; Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia, 2015, *online*).

Segundo Philippi Jr. *et al.* (2014), ao se abordar meio ambiente e desenvolvimento, aspectos relacionados ao crescimento populacional, à urbanização e à industrialização, além de aspectos sociais, tornam-se relevantes e diretamente relacionáveis. Nos anos seguintes da década de noventa foram realizados diversos encontros para se debater a temática da sustentabilidade: em 1994 no Egito a Conferência Interacional Sobre População e Desenvolvimento (CIPD); em 1995 em Pequim a IV Conferência Mundial Sobre a Mulher, relacionando direitos da mulher, igualdade social e meio ambiente; ainda em 1995 a Conferência

sobre Desenvolvimento Social, em Copenhague; em 1996 a Segunda Conferência das Nações Unidas sobre Assentamentos Humanos (Habitat II) em Istambul; em 1997 no Japão a terceira Conferência das Partes (COP-3), resultando no Protocolo de Quioto; ainda em 1997 a Rio+5 em Nova Iorque, cujo escopo central foi avaliar os cinco anos desde a Rio 92 (Brasil, 1996; Philippi Jr. *et al.*, 2014; Pott; Estrela, 2017).

De acordo com Pott e Estrela (2017, p. 277), a década de 1990 foi marcada por uma “série de conferências e significativas transformações”, contrastando com o início do século XXI que começou com perda do ritmo no que diz respeito ao enfrentamento das questões ambientais. Segundo Diniz (2002), a Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável – CMDS, conhecida como Rio+10, que ocorreu em 2002 em Johannesburgo, não inovou em relação a Rio 92, concentrando-se em mencionar a importância de ações no sentido de proporcionar melhoria à distribuição de água e de saneamento para populações carentes. Na área energética foi reiterada a importância do aumento do uso de fontes renováveis de energia, sem, contudo, apresentar metas quantitativas (Diniz, 2002). Jacobi (2002) afirma ainda que mesmo com progressos em vários setores pós-Rio 92, os fundamentos de proteção ambiental e de desenvolvimento sustentável ainda eram encarados como um entrave para o crescimento econômico.

Com o objetivo de discutir sobre a renovação dos compromissos políticos firmados anteriormente com relação ao desenvolvimento sustentável, além de “identificar lacunas na implementação das decisões adotadas e estabelecer novos compromissos”, realizou-se em 2012 no Rio de Janeiro a Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável – CNUDS (2012), que ficou conhecida como Rio+20 (Guimarães; Fontoura, 2012, p. 25). Com objetivos pouco ousados, a Rio+20 “não produziu avanços significativos em relação à Rio 92”, devido essencialmente ao conflito de interesses na atual governança ambiental global, no qual cada ator busca o favorecimento de seus próprios interesses, distanciando cada vez mais a adoção de pontos convergentes e afastando os discursos dos compromissos concretos por parte dos governos (Fontoura; Guimarães, 2012; Pott; Estrela, 2017, p. 277).

Apesar dos limitados avanços, a Rio+20 foi o ponto de partida para a elaboração da *Agenda 2030* (Organização das Nações Unidas, 2015) e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS (a serem tratados na Seção 2.5 deste estudo), discutida pelos líderes de governos e de Estado de 193 países na

Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável de setembro de 2015 em Nova Iorque (Organização das Nações Unidas, 2015, 2016; RIO+20, 2012).

Marcando uma mudança na forma de abordagem dos países em relação à definição de suas metas de redução de gases de efeito estufa, o *Acordo de Paris* coroou a 21ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – COP21, realizada no ano de 2015 em Paris, representando uma reorientação do regime das mudanças climáticas, o qual reforça o papel que todos os países devem desempenhar na redução de emissões, além de caracterizar um mecanismo mais flexível e durável (Bodansky, 2016; Peixer, 2019; Souza; Corazza, 2017). No *Acordo de Paris* adotou-se uma abordagem de baixo para cima, na qual as Partes apresentam por si próprias as suas metas de redução de gases de efeito estufa e as suas responsabilidades assumidas, consolidadas na forma de metas climáticas chamadas de Contribuição Nacionalmente Determinada – NDC, em contraponto à abordagem de cima para baixo que caracterizou as negociações no âmbito do *Protocolo de Kyoto* (Peixer, 2019; Souza; Corazza, 2017). O objetivo comum do acordo é “manter o aumento da temperatura média global bem abaixo dos 2 °C acima dos níveis pré-industriais e buscar esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais, reconhecendo que isso reduziria significativamente os riscos e os impactos das mudanças climáticas” (Convenção Quadro Sobre Mudança do Clima, 2015, p. 26; Peixer, 2019).

No contexto da NDC, o Governo Brasileiro apresentou compromissos locais às Nações Unidas, entre eles o de aumentar a participação das fontes renováveis na matriz energética nacional nas próximas décadas (Brasil, 2016).

Na busca por cumprir com os objetivos propostos nos diversos encontros citados, o ambiente urbano assume um papel protagonista, sendo considerado impulsionador do desenvolvimento sustentável global segundo Klopp e Petretta (2017) e Izquierdo (2022). Assim, uma vez destacados os principais marcos históricos da temática da sustentabilidade e pontuando a questão energética, na Seção seguinte a sustentabilidade será caracterizada na sua perspectiva ambiental urbana.

2.3 SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL URBANA

Nas últimas décadas, a busca por um futuro urbano mais sustentável tornou-se o foco dos estudos na área urbana (Fu; Zhang, 2017; Zhou *et al.*, 2024). Segundo Akande *et al.* (2019), os centros urbanos representam o epicentro do desenvolvimento econômico e social contemporâneo, sendo considerados por Tao *et al.* (2019) o motor do crescimento econômico. Estima-se que 55% da população mundial vivia em áreas urbanas no ano de 2018, e que 68% da população residirá nestas áreas até o ano de 2050 (Dayan, 2023; Organização das Nações Unidas, 2019). Ainda, segundo Akande *et al.* (2019), a visão que se tinha sobre os ambientes urbanos vem sendo alterada progressivamente, de modo a serem estes considerados impulsionadores do desenvolvimento sustentável global (Klopp; Petretta, 2017; Izquierdo, 2022), embora ainda seja nestes mesmos ambientes que são revelados os principais contrastes sociais e econômicos existentes nas sociedades (Akande *et al.*, 2019; Izquierdo, 2022). Nesta mesma linha, Klopp e Petretta (2017), Tao *et al.* (2019) e Yu e Wen (2010), complementam ponderando que embora as áreas urbanas façam-se responsáveis por enormes contribuições para a economia, o processo de urbanização também agrava diversos problemas ambientais.

Neste contexto, a sustentabilidade ambiental urbana consiste em alcançar o equilíbrio entre o desenvolvimento econômico e a proteção ao meio ambiente, além de um ambiente social harmônico para os habitantes de determinada cidade, tanto no presente quanto no futuro (Bibri; Krogstie, 2017; Hiremath *et al.*, 2013; Izquierdo, 2022). Fu e Zhang (2017), Li e Yi (2020), Tao *et al.* (2019), Zhang e Chen (2021) corroboram afirmando que a sustentabilidade ambiental urbana é conduzida por um desenvolvimento coordenado entre os pilares econômico, social e ambiental, reafirmando as ideias de Sachs (1993). Assim, finaliza Izquierdo (2022), apesar de ser um conceito amplo, a sustentabilidade ambiental urbana engloba além do lado puramente ambiental, as questões sociais e econômicas.

Uma das particularidades do desenvolvimento das cidades que se faz mister destacar, visto o enfoque do presente Relato de Tese, é o aspecto energético. Segundo Larivière e Lafrance (1999) e Peteleaza *et al.* (2024), o estudo da sustentabilidade energética no ambiente urbano é questão de grande importância

para solução dos diversos problemas ambientais urbanos. Além disso, continuam Larivière e Lafrance (1999), uma vez que a maior parte da energia consumida pelos centros urbanos é produzida fora destes locais, seus impactos transpassam e se estendem para muito além de seus limites.

Desta forma, explorar o dinamismo das diversas dimensões do ambiente urbano contribui para o direcionamento de seu desenvolvimento de forma sustentável, compreendendo as relações de interação entre as atividades humanas urbanas com os elementos ambientais (Shaker, 2015; Zhang; Chen, 2021). Tao *et al.* (2019) complementam afirmando que a avaliação da sustentabilidade ambiental urbana é de fundamental importância para orientar as áreas urbanas a alcançar um desenvolvimento urbano mais sustentável em suas diversas dimensões, como será tratado na Seção 2.4. Nesta linha, Baynes e Wiedmann (2012) já afirmavam que a investigação com critérios científicos da sustentabilidade ambiental monitora o seu dinamismo e fornece uma referência para o desenvolvimento urbano sustentável.

Nesta conjuntura de avaliação da sustentabilidade ambiental urbana, Verma e Raghubanshi (2018) acrescentam que por se tratar de uma realidade muito complexa, a melhor forma de estimar a sustentabilidade de uma cidade, e torná-la comparável, é utilizar um conjunto adequado de indicadores. Izquierdo (2022), conclui ainda que por meio do uso de indicadores, as cidades são capazes de identificar os melhores exemplos a serem seguidos, além de favorecer uma competição saudável de melhoria entre diversas regiões urbanas.

Embasam este ponto de vista os estudos de diversos autores, que se utilizam de indicadores para examinar o desempenho da sustentabilidade ambiental urbana, investigando o desenvolvimento coordenado entre as suas diversas dimensões, tais como Tao *et al.* (2019), Shen *et al.* (2011) e Zhang e Chen (2021).

Não obstante, Klopp e Petretta (2017) e Izquierdo (2022) ponderam que dados precisos e comparáveis sobre cidades ao redor do mundo nem sempre estão disponíveis, e as metodologias de cálculo não são suficientemente testadas. Além disso, deve-se considerar que ao analisar a sustentabilidade de uma cidade com poucos indicadores, corre-se o risco de reduzir a realidade daquele centro urbano a características muito gerais, que podem não refletir adequadamente a sua dinâmica urbana específica.

Neste sentido, a avaliação da sustentabilidade ambiental urbana por meio de indicadores e de metodologia adequados, sob a ótica temática de determinado

aspecto urbano, contribui para avanço geral do conhecimento na área, fornecendo subsídios para avaliar o desempenho da sustentabilidade ambiental dentro de uma área urbana específica, de forma cada vez mais ampla e precisa, considerando as suas diversas dimensões ou pilares (Izquierdo, 2022; Tao *et al.*, 2019; Zhang; Chen, 2021).

2.4 DIMENSÕES DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTAVEL

A partir dos debates seminais promovidos pela já citada Conferência de Estocolmo na Suécia em 1972 e sob a influência do cenário de crítica aos modelos de desenvolvimento econômico até então vigentes, surgiu na década 70 a proposta de um novo modelo de desenvolvimento, o Ecodesenvolvimento (Fernandez, 2011; Maia; Pires, 2011).

Este conceito foi se transformado e evoluindo através da década de setenta (Amorim, 2009), sendo largamente difundido por Ignacy Sachs (Varsóvia, 1927 – Paris, 2023), quem, em 1980, desenvolve conceitual e operacionalmente o ecodesenvolvimento, afirmando que este é:

Um processo criativo de transformação do meio com a ajuda de técnicas ecologicamente prudentes, concebidas em função das potencialidades deste meio, impedindo o desperdício inconsiderado dos recursos e cuidando para que estes sejam empregados na satisfação das necessidades de todos os membros da sociedade, dada a diversidade dos meios naturais e dos contextos culturais. As estratégias do ecodesenvolvimento serão múltiplas e só poderão ser concebidas a partir de um espaço endógeno das populações consideradas. Promover o ecodesenvolvimento é, no essencial, ajudar as populações envolvidas a se organizar, a se educar, para que elas repensem seus problemas, identifiquem as suas necessidades e os recursos potenciais para conceber e realizar um futuro digno de ser vivido, conforme os postulados de justiça social e prudência ecológica. (Sachs, 1986, p. 82).

Da evolução desta corrente teórica, surge nos anos 80 o termo Desenvolvimento Sustentável (Amorim, 2009; Berardi, 2013) que teve a sua definição mais famosa consolidada pelo também já citado *Relatório Brundtland* (*Nosso Futuro Comum*), reconhecendo-o oficialmente como:

Um novo tipo de desenvolvimento capaz de manter o progresso humano, não apenas em alguns lugares e por alguns anos, mas em todo o planeta e até um futuro longínquo. [...] **O desenvolvimento sustentável é aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade de as gerações futuras atenderem suas próprias necessidades.** [...] em essência, o desenvolvimento sustentável é um processo de transformação no qual a exploração de recursos, a direção dos investimentos, a orientação do desenvolvimento tecnológico e a mudança institucional se harmonizam e reforçam o potencial presente e futuro, a fim de atender às necessidades e aspirações humanas (Comissão Mundial Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, 1987, p. 13, 41 e 43, grifo nosso).

Segundo Montibeller Filho (1993), há entre os conceitos de Ecodesenvolvimento e Desenvolvimento Sustentável consenso em muitos aspectos essenciais como a visão abrangente dos fenômenos, a crítica ao reducionismo economicista, a visão de longo prazo, a preocupação com o bem-estar social e a solidariedade com as gerações futuras, além disso, entre ambos os conceitos existe ainda um denominador comum: a dimensão ambiental fazendo parte do processo de desenvolvimento. Amorin (2009) corrobora afirmando que existe uma grande semelhança do conceito de desenvolvimento sustentável ao de sustentabilidade, de modo que, as duas expressões tornaram-se sinônimo para a maioria dos especialistas. Além disso, Sachs (1981, 1986, 1993) considerava que os pontos em comum entre estes dois conceitos são suficientes para poder adotá-los como sinônimos.

Ciegis, Ramanauskiene e Martinkus (2009) alertavam, no entanto, uma vez que os novos conhecimentos e as novas experiências afetam a compreensão dos problemas e a busca por soluções, que o conceito de desenvolvimento sustentável está em constante mudança, de modo que as discussões sobre a sustentabilidade influenciaram estudos e análises que consolidaram teorias sobre o Desenvolvimento Sustentável no que diz respeito à compreensão e à abrangência de suas dimensões (Maia; Pires, 2011; Vijge, 2021).

Na busca pela compreensão e definição de suas dimensões, no *Relatório Brundtland*, são destacados três componentes fundamentais para o desenvolvimento sustentável: (i) proteção ambiental, (ii) crescimento econômico e (iii) equidade social (Comissão Mundial Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, 1987). Para Ciegis, Ramanauskiene e Martinkus (2009, p. 30), “desenvolvimento sustentável não se trata de uma escolha entre a proteção ambiental e o progresso social, mas de um esforço maior para desenvolvimento econômico e social que seja compatível com a proteção ambiental”.

Desses três componentes fundamentais, surge o que Elkington (1994, 1999) denominou como *triple bottom line*, ou, tripé da sustentabilidade, integrando em equilíbrio três dimensões: (i) a pessoa, que aborda o capital humano de uma sociedade ou organização, (ii) o planeta, relacionado com o capital natural da sociedade ou da organização e (iii) o lucro, que trata dos resultados econômicos positivos da organização (Elkington; 2004).

Desta forma, Dias (2017) destaca que o mais importante na abordagem das três dimensões da sustentabilidade, é o equilíbrio dinâmico entre os seus componentes econômico, social e ambiental, porquanto, esse equilíbrio passa a fazer parte fundamental do discurso sobre a sustentabilidade (Maia; Pires, 2011). Ciegis, Ramanauskiene e Martinkus (2009) concluem conceituando que, de forma geral, “o desenvolvimento sustentável envolve três aproximações fundamentais, que são inter-relacionadas e complementares: econômica, social e ambiental, que representam as dimensões da sustentabilidade” (Maia; Pires, 2011, p. 188).

Sachs (1993) inclui, contudo, mais duas dimensões nessa discussão, definindo as chamadas cinco dimensões da sustentabilidade: (i) social, (ii) econômica, (iii) ecológica, (iv) espacial/geográfica e (v) cultural.

Ao analisar esses elementos, Coutinho, Pompeu e Oliveira Jr. (2016) destacam que são vários os fatores que interagem com as características locais e regionais, em especial, destacam os aspectos normativos, os administrativos e os institucionais, relacionados à gestão e ao grau de participação social; essas são as questões que têm a capacidade de influenciar as ações locais, direta ou indiretamente.

Assim, dando continuidade à sua abordagem construtivista, Sachs (2002) complementou o modelo anteriormente proposto, incluindo ainda as dimensões: (i) ambiental, (ii) política (nacional) e (iii) política (internacional), resultando em uma das abordagens mais importantes, destacadas na literatura, sobre as dimensões da sustentabilidade, com a perspectiva de oito aspectos, conforme representado no Quadro 2 (Coutinho; Pompeu; Oliveira Jr, 2009; Maia; Pires, 2011).

Quadro 2 – As Oito Dimensões da Sustentabilidade de Sachs

Dimensão	Diretrizes
Social	• Alcance de um patamar razoável de homogeneidade social; • Distribuição justa de renda; • Emprego pleno e/ou autônomo com qualidade de vida decente; • Igualdade no acesso aos recursos e serviços sociais.
Cultural	• Mudanças no interior da continuidade cultural (equilíbrio entre respeito à tradição e inovação); • Capacidade de autonomia para elaboração de um projeto nacional integrado e endógeno (em oposição às cópias servis dos modelos alienígenas); • Autoconfiança combinada com abertura para o mundo.
Ecológica	• Preservação do potencial da natureza na sua produção de recursos renováveis; • Limitação do uso dos recursos não-renováveis.
Ambiental	• Respeito à capacidade de autodepuração dos ecossistemas naturais.
Territorial	• Configurações urbanas e rurais balanceadas (eliminação das inclinações urbanas nas alocações do investimento público); • Melhoria do ambiente urbano; • Superação das disparidades inter-regionais; • Estratégias de desenvolvimento ambientalmente seguro para áreas ecologicamente frágeis (conservação da biodiversidade pelo ecodesenvolvimento).
Econômica	• Desenvolvimento econômico intersetorial equilibrado; • Segurança alimentar; • Capacidade de modernização contínua dos instrumentos de produção; razoável nível de autonomia na pesquisa científica e tecnológica; • Inserção soberana na economia internacional.
Política – nacional	• Democracia definida em termos de apropriação universal dos direitos humanos; • Desenvolvimento da capacidade do Estado para implementar o projeto nacional, em parceria com todos os empreendedores; • Um nível razoável de coesão social.
Política – Internacional	• Eficácia do sistema de prevenção de guerras, na garantia de paz e na promoção da cooperação internacional; • Um pacote entre países dos hemisférios Norte e Sul de co-desenvolvimento, baseado no princípio de igualdade (regras do jogo e compartilhamento da responsabilidade de favorecimento do parceiro mais fraco); • Controle institucional efetivo do sistema internacional financeiro e de negócios; • Controle institucional efetivo da aplicação do princípio da precaução na gestão do meio ambiente e dos recursos naturais; prevenção das mudanças globais negativas; proteção da diversidade biológica (e cultural); e gestão do patrimônio global, como herança comum da humanidade; • Sistema efetivo de cooperação científica e tecnológica internacional e eliminação parcial do caráter de commodity da ciência e tecnologia, também como propriedade da herança comum da humanidade.

Fonte: Adaptado de Sachs (2002, p. 85-88).

Apesar dos avanços na definição das dimensões do desenvolvimento sustentável, segundo Maia e Pires (2011), diferentes compreensões desta classificação ocorrem em virtude das diferentes interpretações envolvendo os estudos da sustentabilidade. Sachs (2002; 2008, p. 15) afirmava que a abordagem fundamentada na harmonização dos objetivos sociais, ambientais e econômicos não se alterou e ainda era válida, posto que o desenvolvimento sustentável exige o “imperativo ético da solidariedade” com as gerações presentes e futuras, além da explicitação de critérios de sustentabilidade social, ambiental e de viabilidade econômica. “Estritamente falando, apenas as soluções que considerem estes três elementos, isto é, que promovam o crescimento econômico com impactos positivos em termos sociais e ambientais, merecem a denominação de desenvolvimento” (Sachs, 2008, p. 36).

Nesta linha, Maia e Pires (2011) e Alcocer *et al.* (2024) complementam afirmando que entre as principais dimensões da sustentabilidade, essas três são consensuais entre os autores da área: (i) econômica, (ii) social e (iii) ambiental.

Na *Agenda 2030* (Organização das Nações Unidas, 2015), discutida na Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável de setembro de 2015 em Nova Iorque, a busca pelo desenvolvimento sustentável foi baseada na premissa de que todos os seus aspectos devem ser considerados indistintamente, de tal forma que resultou em cinco eixos de atuação: (i) pessoas, (ii) planeta, (iii) prosperidade, (iv) paz e (v) parceria, formando os chamados 5ps da *Agenda 2030* (Movimento Nacional ODS, 2022; Organização das Nações Unidas, 2015).

Não obstante o arcabouço teórico que delineia o pensamento do desenvolvimento sustentável, “ele não é uma teoria pronta e claramente definida, mas, sim, uma perspectiva interdisciplinar de saberes que busca compreender a” inter-relação entre as suas diversas dimensões, o que permite que diferentes abordagens de estudos na área possam utilizar-se das dimensões de sustentabilidade especificamente adequadas para o seu campo de aplicação (Amazonas, 2009; Maia; Pires, 2011, p. 185).

Exemplos disso são os estudos de Ghenai, Albawab e Bettayeb (2020), Mei e Chen (2021), Nagarkatti e Kolar (2021) e Zhan e Li (2024), que se utilizam das dimensões: (i) Ambiental, (ii) Econômica, (iii) Social, (iv) Recursos e (v) Tecnológica, ao classificar indicadores de sustentabilidade para fontes renováveis de energia, um dos temas de interesse deste estudo.

Neste contexto da sustentabilidade energética, Olabi *et al.* (2023) afirmam que a implantação de fontes de energia renovável é um movimento essencial em direção a uma realidade ambiental e climática mais sustentável, e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS surgem como uma forma de operacionalizar essa busca em suas diversas dimensões.

2.5 OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL – ODS

Considerados como precursores dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS, os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio – ODM “emergiram de uma série de cúpulas multilaterais realizadas durante os anos 1990 sobre o desenvolvimento humano” (Movimento Nacional ODS, 2020, *online*), a exemplo da Rio92, COP-3 e Rio+5, já mencionadas, sendo adotados pelos Estados-membros da ONU em 2000 (Griggs *et al.*, 2013). Esses eventos, juntamente com muitos outros, representam o crescimento da cooperação internacional em desenvolvimento sustentável e ajudam a definir ações para tornar o mundo um lugar melhor para se viver, segundo Salvia *et al.* (2019).

Os ODM estabeleceram oito metas internacionais de desenvolvimento que deveriam ser alcançadas até o final de 2015, com foco em fome, pobreza, educação, igualdade de gênero, saúde e meio ambiente, sendo que as metas sociais foram as que obtiveram os resultados mais positivos (Mcarthur; Rasmussen, 2018). Esses oito Objetivos “foram o primeiro arcabouço global de políticas para o desenvolvimento e contribuíram para orientar a ação dos governos nos níveis internacional, nacional e local por 15 anos” (Movimento Nacional ODS, 2020, *online*).

Segundo Sachs (2012), os ODM expressavam a preocupação pública com estes temas e representaram um método eficaz de mobilização global para alcançar um conjunto de importantes prioridades sociais em todo o mundo. Sachs (2012) afirmava ainda que ao agrupar essas prioridades em um conjunto facilmente compreensível de oito metas e ao estabelecer objetivos mensuráveis e com prazo determinado, os ODM ajudaram a promover a conscientização global, a responsabilidade política, a elaboração de métricas aprimoradas, a participação da sociedade e responderem às pressões públicas correlatas.

Apesar do bom desempenho dos ODM, observou-se nos anos seguintes a manutenção de antigos problemas em todo o mundo, além do surgimento de novos e mais complexos desafios, em relação um amplo conjunto de questões (Orzes *et al.*, 2018). Assim, a Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável – CNUDS – ou Rio+20, realizada no Rio de Janeiro em 2012, conforme já citado, estimulou os governos a criar um conjunto de metas que seria integrado ao acompanhamento dos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio – ODM após o ano de 2015 (Griggs *et al.*, 2013). Como resultado, em 2015, na Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável em Nova Iorque, foram criados os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS, servindo como uma continuação dos ODM, mas desta vez com um conjunto de metas a serem alcançadas até 2030 (Organização das Nações Unidas, 2015; Salvia *et al.*, 2019).

Os ODS são parte integrante da *Agenda 2030* (Organização das Nações Unidas, 2015), que consiste em uma declaração oficial adotada pelos membros da ONU contendo um plano de ação global para buscar a sustentabilidade em todos os países (Salvia *et al.*, 2019). A *Agenda* (Organização das Nações Unidas, 2015) possui 169 metas e diversos indicadores para monitoramento, orientados pelos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e apoiados sobre as dimensões econômica, ambiental e social (Dlouhá; Pospíšilová, 2018; Organização das Nações Unidas, 2016).

Os 17 objetivos de desenvolvimento sustentável, juntamente com as suas descrições estão representados no Quadro 3.

Quadro 3 – Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

1 – Erradicação da pobreza	Acabar com a pobreza em todas as suas formas, em todos os lugares.
2 – Fome zero e agricultura sustentável	Acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável.
3 – Saúde e bem-estar	Assegurar uma vida saudável e promover o bem-estar para todos e todas, em todas as idades.
4 – Educação de qualidade	Assegurar a educação inclusiva e equitativa e de qualidade, e promover oportunidades de aprendizagem ao longo da vida para todos e todas.
5 – Igualdade de gênero	Alcançar a igualdade de gênero e empoderar todas as mulheres e meninas.
6 – Água potável e saneamento	Assegurar a disponibilidade e a gestão sustentável da água e saneamento para todos.
7 – Energia limpa e acessível	Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos.
8 – Trabalho decente e crescimento econômico	Promover o crescimento econômico sustentado, inclusivo e sustentável, emprego pleno e produtivo e trabalho decente para todos e todas.
9 – Indústria, inovação e infraestrutura	Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação.
10 – Redução das desigualdades	Reduzir a desigualdade dentro dos países e entre eles.
11 – Cidades e comunidades sustentáveis	Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis.
12 – Consumo e produção responsáveis	Assegurar padrões de produção e consumo sustentáveis.
13 – Ação contra a mudança global do clima	Tomar medidas urgentes para combater a mudança do clima e seus impactos.
14 – Vida na água	Conservação e uso sustentável dos oceanos, dos mares e dos recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável.
15 – Vida terrestre	Proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra e deter a perda de biodiversidade.
16 – Paz, justiça e instituições eficazes	Promover sociedades pacíficas e inclusivas para o desenvolvimento sustentável, proporcionar o acesso à justiça para todos e construir instituições eficazes, responsáveis e inclusivas em todos os níveis.
17 – Parcerias e meios de implementação	Fortalecer os meios de implementação e revitalizar a parceria global para o desenvolvimento sustentável.

Fonte: Adaptado de Organização das Nações Unidas (2015, p. 18-19, 2016).

Importante destacar, visto o enfoque desta tese, o ODS 7 e ODS 11, que tratam especificamente da sustentabilidade energética e da sustentabilidade urbana, tendo como algumas de suas metas o acréscimo substancial da participações de fontes de energia renováveis na matriz energética global (assunto a ser tratado na Seção 3.2), o aumento da urbanização sustentável e a redução do impacto ambiental negativo *per capita* das cidades (Organização das Nações Unidas, 2015).

A partir da elaboração dos ODS, pesquisas relacionadas começaram a surgir de modo interdisciplinar no mundo acadêmico, a exemplo de Bebbington e Unerman (2018), Le Blanc (2015), McCollum *et al.* (2018), Nerini *et al.* (2017), Nilsson, Griggs e Visbeck (2016), Scolari e Strauhs (2024) e Schone, Timofeeva, Heiz (2022). Segundo Leal Filho *et al.* (2018), os ODS são uma oportunidade para estimular o estudo da sustentabilidade no meio acadêmico, sendo pesquisa, inovação e educação mecanismos importantes nesta busca. Leal Filho *et al.* (2018) enfatizam ainda o caráter interdisciplinar e transdisciplinar da pesquisa em sustentabilidade, sendo que estudos em nível local sobre um determinado aspecto ecosocioeconômico são importantes para compreender adequadamente a sustentabilidade sob uma ótica mais ampla e em uma maior escala, pois embora os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável tenham uma abordagem global, as ações realizadas são locais, e devem ser avaliadas também em escala local.

Neste contexto de busca por uma compreensão mais ampla do real impacto dos ODS, indicadores de sustentabilidade se apresentam como ferramentas capazes de medir, monitorar e avaliar o progresso do desenvolvimento sustentável sob a ótica destes (Salvia *et al.*, 2019) em diferentes regiões e em diferentes aspectos.

2.6 INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE

Segundo Moldan, Janousková e Hák (2012), o conceito de desenvolvimento sustentável e de suas dimensões evoluiu de uma interpretação preponderantemente subjetiva e qualitativa para um entendimento voltado para o pensamento objetivo e quantitativo, de modo que ferramentas adequadas para essa análise são necessárias. Nesse sentido, Van Bellen (2002) destaca a importância do

desenvolvimento e da utilização de ferramentas que avaliem a sustentabilidade do desenvolvimento.

Na busca por ferramentas que objetivem e quantifiquem o desenvolvimento sustentável sob determinada ótica, Turcu (2013) descreve que os estudos dedicados ao desenvolvimento de conjuntos de indicadores de sustentabilidade foram os que, até então, obtiveram maior sucesso nesse propósito (Mega; Pedersen, 1998; Ravetz, 2000).

Ao discorrer sobre questões teóricas sobre indicadores, Gallopín (1996) afirmava que diferentes autores definem indicadores de forma distinta, significando entre outros:

- uma medida do comportamento do sistema em termos de atributos significativos e perceptíveis (Holling, 1978);
- uma medida que resume informações relevantes para um determinado fenômeno (Mcqueen; Noak, 1988);
- uma variável hipoteticamente ligada à variável estudada que não pode ser observada diretamente (Chevalier *et al.*, 1992);
- um parâmetro que aponta para informações sobre o estado de um fenômeno (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico, 1993);
- reflexos parciais da realidade (Meadows, 1998);
- informações qualitativas, quantitativas, estatísticas e/ou gráficas, que buscam apresentar a realidade de uma forma sistemática (Rauli; Araújo; Wiens, 2006);
- um parâmetro de especial pertinência para refletir determinadas condições do sistema em análise (Silva; Souza-Lima, 2010);
- ferramentas constituídas por uma ou mais variáveis que, associadas de diversas formas, revelam significados mais amplos sobre os fenômenos a que se referem (Instituto Brasileiro de Geografia E Estatística, 2015).
- uma qualidade ou característica que sugere eficácia, progresso ou sucesso (Arnott, Moser, Goodrich, 2016; Seyisi, Mantlana, Ndhleve, 2023).

Para Meadows (1998), os indicadores são ferramentas de mudança, de aprendizado e de propaganda, sendo que sua presença, ausência ou destaque afetam o comportamento em relação ao fato avaliado. Ainda segundo Meadows (1998), por estarem no centro do processo de tomada de decisão, quando os

indicadores são mal escolhidos, imprecisos, tendenciosos ou mal avaliados, eles podem causar erros de interpretação do fenômeno em análise e as decisões baseadas nestes indicadores podem não ser eficazes, levando a condutas equivocadas e super ou sub-reações ao fenômeno. Nesta mesma linha, para Malheiros, Philippi Jr. e Coutinho (2008), os indicadores propiciam diagnósticos de temas de interesse, subsidiando o processo de tomada de decisão.

De acordo com Gallopín (1996) e Tunstall (1992), as principais funções dos indicadores são: (i) Avaliação de condições e tendências, (ii) Comparação entre lugares e situações, (iii) Avaliação de condições e tendências em relação às metas e aos objetivos, (iv) Provisão de informações de advertência e (v) Antecipação de futuras condições e tendências.

Gallopín (1996) acrescenta ainda que os indicadores mais relevantes são aqueles que sintetizam as informações significantes sobre o fenômeno observado, fazendo com que certos aspectos deste fenômeno, que são pouco perceptíveis, se tornem aparentes para o leitor, sendo que os indicadores possuem maior significado “mais pelo o que apontam do que pelo seu valor absoluto” (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2015, p. 12).

Nesta busca por indicadores relevantes para uma determinada análise, diversos autores apontam as características desejáveis de um bom indicador (Berliner; Brimson, 1988; Caldeira, 2018; Callado; Fensterseifer, 2010; Meadows, 1998; Neely *et al.*, 1997; Tironi *et al.*, 1991), sendo que estas características estão sintetizadas no Quadro 4, passando desde a sua seleção às condições de sua comparação – *benchmark*.

Quadro 4 – Características Desejáveis de Bons Indicadores

Característica Desejável	Descrição
Seletivo	O indicador deve estar relacionado a fatores essenciais ou críticos do processo avaliado.
Claro	Facilmente entendível, com unidade sensata expressa em número imaginável.
Representativo	O indicador deve ser escolhido ou formulado de forma que possa representar satisfatoriamente o fenômeno a que se refere.
Suficiente	Não muita e nem pouca informação, dando um panorama adequado da situação.
Simples	Devem ser de fácil compreensão e aplicação, e sem demora para a sua compilação.
Baixo Custo	Deve ser gerado a um baixo custo.
Estável	Deve ser coletado com base em procedimentos rotinizados e que permitam sua comparação ou a análise de tendências ao longo do tempo
Disponível	Os dados para alimentar o indicador devem estar disponíveis.
Que permite comparação externa	Deve ser desenvolvido para permitir a comparação com outros recortes espaciais.

Fonte: Adaptado de Berliner e Brimson (1988), Caldeira (2018), Callado e Fensterseifer (2010), Meadows (1998), Neely *et al.* (1997) e Tironi *et al.* (1991).

Apesar do arcabouço teórico que permeia o estudo de indicadores, Turcu (2013) afirma que mesmo existindo inúmeros conjuntos de indicadores de sustentabilidade, nenhum possui uma abrangência universal, existindo inclusive divergências a respeito da escolha destes indicadores para determinada abordagem, pois, se por um lado os indicadores devem ser objetivos, claros e representativos, por outro lado eles são resultado de um processo de seleção subjetivo.

Nesta contraposição entre o objetivo e o subjetivo, Veleza e Ellenbecker (2000) observam que grande parte das metodologias de análise utilizavam apenas indicadores quantitativos para mensurar o desempenho da sustentabilidade, no entanto, em muitas situações torna-se importante fazer uso de indicadores qualitativos, mesmo que isso represente uma maior subjetividade no processo de análise (Callado; Fensterseifer, 2010; Upadhyaya; Biswas; Tam, 2021).

Meadows (1998) já seguia esta mesma linha, afirmando que os indicadores não precisam ser necessariamente números, eles podem assumir muitas formas como sinais, símbolos, imagens, cores, evidenciando aspectos qualitativos e de percepção. Meadows (1998) concluiu ainda que não são apenas indicadores que

são necessários para avaliar o desenvolvimento sustentável, e sim um sistema de informação coerente a partir do qual os indicadores possam ser derivados.

Van Bellen (2002) acrescenta ainda que a utilização de sistemas de indicadores constitui elemento legitimador no delineamento da agenda pública e social para o desenvolvimento, de modo que esses sistemas passam a se tornar componentes dessa agenda, responsáveis por estabelecer importantes mudanças de prioridades e de comportamento dos atores sociais.

Neste contexto, ao propor a utilização de indicadores para avaliar a sustentabilidade das diversas tecnologias de geração de eletricidade, Evans, Strezov e Evans (2009) validam tal proposição citando os estudos de Denholm e Kulcinski (2004), Gagnon, Bélanger e Uchiyama (2002), Hondo (2005), Lenzen (2008), Uchiyama (2007) e Weisser (2007), que obtiveram sucesso em seus objetivos. Evans, Strezov e Evans (2009) vão além e afirmam ainda que ao se avaliar a sustentabilidade do setor energético, indicadores específicos devem ser utilizados, pois os impactos ambientais, sociais e econômicos são significativamente distintos a depender da fonte de geração de energia elétrica avaliada.

Atualizando os estudos precursores, Afshari *et al.* (2022), Dorning *et al.* (2019), Ghenai, Albawab e Bettayeb (2020) e Schmidt-Scheele *et al.* (2022), por exemplo, se aprofundam na temática e propõe o uso de indicadores como forma de avaliação da sustentabilidade de sistemas de geração de energia elétrica sobre diferentes perspectivas, em especial a ambiental, a social e a econômica, não destoando das dimensões anteriormente tratadas.

Permeando os conceitos apresentados sobre indicadores, Van Bellen (2002, p. 62) expande a discussão acrescentando que alguns preceitos gerais importantes devem ser seguidos quando se seleciona ou se avalia sistemas de indicadores, de modo que “a conformidade com estes preceitos, juntamente com a aplicação adequada da ferramenta para uma determinada realidade, está relacionada diretamente com o sucesso de um processo de avaliação”. Assim, na próxima Sessão são apresentadas orientações conceituais e empíricas a respeito da formulação de grupos de indicadores para avaliação da sustentabilidade.

2.7 PRECEITOS GERAIS PARA SELEÇÃO DE INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE

O já citado *Relatório Brundtland*, de 1987, assim como a também já citada *Agenda 21* (Organização das Nações Unidas, 1992), resultado da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento de 1992, ressaltam a necessidade de medir e de avaliar o progresso em direção ao desenvolvimento sustentável, a partir da pesquisa e do desenvolvimento de novas ferramentas que possibilitem tal medição e avaliação (Adewumi *et al.*, 2019; Bakkes, 2012; Hardi; Zdan; 1997; Pintér *et al.*, 2012; The Global Development Research Center, 2023; Van Bellen, 2002).

Em resposta a esse desafio, esforços significativos vêm sendo empregados nos mais diferentes níveis, para avaliar a performance do desenvolvimento (Butkiene *et al.*, 2024; Olabi *et al.*, 2023; Van Bellen, 2002; Zhou *et al.*, 2024). A necessidade de fortalecer a base de evidências é um elemento comum desses esforços, mas embora o reconhecimento desta seja generalizado, não há consenso sobre como isso pode ser alcançado e como diferentes atores interessados, tanto no setor público quanto no privado, devem harmonizar suas abordagens (Olabi *et al.*, 2023; Pintér *et al.*, 2012; Zhou *et al.*, 2024).

Em um desses esforços, em novembro de 1996, um grupo internacional de especialistas e de pesquisadores dos cinco continentes se reuniu no Centro de Estudos e Conferências da Fundação *Rockefeller* em *Bellagio*, Itália, para revisar o progresso até o momento e sintetizar percepções de esforços práticos em andamento (Adewumi *et al.*, 2019; Bakkes, 2012; The Global Development Research Center, 2023; Van Bellen, 2002).

O resultado deste encontro ficou conhecido como os Princípios de *Bellagio* (Hardi; Zdan; 1997) e orientam todo o processo de avaliação, incluindo a escolha e o desenho dos indicadores, a sua interpretação e a comunicação de resultados (Adewumi *et al.*, 2019; Butkiene *et al.*, 2024; Pintér *et al.*, 2012; The Global Development Research Center, 2023).

Ao todo foram definidos dez princípios que abordam quatro aspectos da avaliação do progresso em direção ao desenvolvimento sustentável (Hardi; Zdan; 1997; The Global Development Research Center, 2023; Van Bellen, 2002):

- O Princípio 1 aborda o ponto de partida de qualquer avaliação: estabelecer uma visão de desenvolvimento sustentável e objetivos claros que forneçam uma definição prática dessa visão em termos significativos para a unidade de tomada de decisão em questão.
- Os Princípios 2 até 5 tratam do conteúdo da avaliação e da necessidade de conciliar uma visão ampla do sistema com um foco prático nas questões prioritárias atuais.
- Os Princípios 6 a 8 lidam com questões-chave do processo de avaliação, como transparência, comunicação e participação.
- Os Princípios 9 e 10 tratam da necessidade de estabelecer uma capacidade contínua de avaliação.

Segundo Pintér *et al.* (2012), a ideia por trás dos Princípios de *Bellagio* é de que a harmonização não é simplesmente uma questão de selecionar estruturas e indicadores comuns, mas de seguir uma abordagem comum de desenvolvimento, com uso de sistemas de medição como parte integrante de como as instituições e a sociedade funcionam (Adewumi *et al.*, 2019). Assim, continua Pintér *et al.* (2012), não se espera que os Princípios conduzam diretamente a conjuntos de indicadores comuns, mas que ajudem a orientar o *design* e a análise geral do sistema de indicadores que, com o tempo, resultaram em convergência (Butkiene *et al.*, 2024).

Ainda segundo Pintér *et al.* (2012), os Princípios de *Bellagio* tornaram-se amplamente conhecidos, e embora bem-sucedidos, o surgimento de novos métodos de avaliação e de novos desafios da sustentabilidade superaram os limites dos Princípios originais. Assim, uma revisão e uma atualização foram organizadas, seguindo uma abordagem semelhante à usada para desenvolver os Princípios originais (Bakkes, 2012).

A reunião de revisão, envolvendo especialistas reconhecidos internacionalmente, foi realizada em abril de 2009 no mesmo local onde o grupo original se reuniu. A reunião foi coorganizada pelo *International Institute for Sustainable Development* – IISD e pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico – OCDE (Butkiene *et al.*, 2024; Pintér *et al.*, 2012).

Rebatizados de Princípios de Avaliação e Medição de Sustentabilidade de *Bellagio*, ou do inglês *BellagioSTAMP* (*Bellagio Sustainability Assessment and Measurement Principles*) os princípios foram reduzidos de dez para oito e

reformulados de forma mais sucinta eliminando algumas das ambiguidades e das duplicações que estavam presentes no conjunto original (Bakkes, 2012; Butkiene *et al.*, 2024; International Institute for Sustainable Development, 2009; Pintér *et al.*, 2012), conforme apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 – Princípios de Bellagio – BellagioSTAMP

Princípio 1: Visão orientadora

A avaliação do progresso em direção ao desenvolvimento sustentável será guiada pelo objetivo de oferecer bem estar respeitando a capacidade da biosfera em sustentá-lo para as gerações futuras.

Princípio 2: Considerações essenciais

A avaliação em direção ao desenvolvimento sustentável levará em consideração:

- As bases do sistema social, econômico e ambiental como um todo, e a interação entre seus componentes.
- A adequação dos mecanismos governamentais.
- Dinâmicas das tendências atuais e dos impulsionadores de mudanças, e suas interações.
- Riscos, incertezas, e atividades que possam ter impactos ultrapassando fronteiras.
- Implicações para tomada de decisões, incluindo trocas e sinergias .

Princípio 3: Escopo Adequado

A avaliação em direção ao desenvolvimento sustentável adotará:

- Um horizonte de tempo apropriado que abranja tanto os efeitos de curto prazo, como os de longo prazo das atuais decisões políticas e atuais atividades humanas.
- Um apropriado alcance geográfico abrangendo do local para o global.

Princípio 4: Estrutura e indicadores

Avaliação do progresso em direção ao desenvolvimento sustentável será baseada em:

- Uma estrutura conceitual que identifique o domínio que o núcleo dos indicadores devem cobrir.
- Os mais recentes e confiáveis dados, projeções e modelos para descobrir tendências e construir cenários.
- Métodos de medição padronizados, tanto quanto possível, com interesse na comparabilidade.
- Comparação dos valores do indicador com metas e referências, onde possível.

Princípio 5: Transparência

A avaliação dos progressos em direção ao desenvolvimento sustentável irá:

- Assegurar que os dados, indicadores e resultados da avaliação sejam acessíveis ao público.
- Expor as escolhas, suposições e incertezas que influenciam nos resultados da avaliação.
- Divulgar as fontes dos dados e dos métodos.
- Divulgar todas as fontes de recursos financeiros, e possíveis conflitos de interesses.

Princípio 6: Comunicação Efetiva

No interesse de uma comunicação eficaz, para atrair o público mais amplo possível e minimizar o risco de mau uso, a avaliação do progresso em direção ao desenvolvimento sustentável irá:

- Usar uma linguagem clara e simples.
- Apresentar as informações de uma maneira honesta e objetiva, para inspirar confiança.
- Usar inovadoras ferramentas visuais e gráficas para auxiliar na interpretação e a contar uma história.
- Disponibilizar os dados com bastante detalhes de forma confiável e prática.

Princípio 7: Ampla Participação

Para reforçar a sua legitimidade e relevância, a avaliação do progresso rumo ao desenvolvimento sustentável deverá:

- Encontre caminhos apropriados que reflitam a opinião pública, enquanto providencia uma liderança ativa.
- Envolver-se desde o início com os usuários da avaliação para que ela melhor se ajuste a suas necessidades.

Princípio 8: Continuidade e capacidade

Avaliação do progresso em direção ao desenvolvimento sustentável exigirá:

- Repetidas medições.
- Sensibilidade a mudanças.
- Investimento para desenvolver e manter capacidade adequada.
- Melhoramento e aprendizado contínuos.

Fonte: Adaptado de International Institute for Sustainable Development (2009), traduzido por Penteadó e Duarte (2014, p. 5).

Os oito princípios orientam-se em quatro áreas (Butkiene *et al.*, 2024; International Institute For Sustainable Development, 2009; Pintér *et al.*, 2012):

1. Conteúdo: as questões que devem ser respondidas nas avaliações.
2. Processo: a forma como as avaliações devem ser realizadas.
3. Escopo: a gama de avaliações nas dimensões de tempo e geografia.
4. Impacto: a maneira de maximizar o impacto das avaliações no público e nos formuladores de políticas.

Segundo Pintér *et al.* (2012), o *BellagioSTAMP* pode tanto apresentar um aspecto apenas orientativo, quanto ser adotado e incorporado de forma mais formal em códigos de conduta, padrões ou melhores práticas formalmente estabelecidas (Adewumi *et al.*, 2019; Butkiene *et al.*, 2024). Tanto em um caso, como no outro, Pintér *et al.* (2012) concluem que o *BellagioSTAMP* pode muito bem ser um guia importante que eleva o padrão dessas avaliações ao nível necessário (Adewumi *et al.*, 2019; Butkiene *et al.*, 2024).

Quando aplicados ao contexto energético, como por exemplo, no estudo de Butkiene *et al.* (2024), o *BellagioSTAMP* contribui para orientar a seleção e para avaliar a integridade do conjunto de indicadores.

Ainda neste contexto, Olabi *et al.* (2023) afirmam que a energia solar surgiu como concorrente proeminente no setor de energia renovável, atraindo considerável atenção e recebendo elogios por seu potencial significativo. No entanto, continuam Olabi *et al.* (2023), embora a energia solar fotovoltaica seja comumente considerada ambientalmente sustentável, há uma crescente discussão acadêmica em torno de suas consequências ecológicas inadvertidas, incluindo a utilização de terras para fazendas solares, a reciclagem de painéis fotovoltaicos, além de aspectos socioeconômicos como a redução de empregos em setores de energia convencionais e a disparidades no acesso à eletricidade renovável, evidenciando a importância de elaboração de indicadores que avaliem estes aspectos da tecnologia.

Diante desta conjuntura, de busca pelo desenvolvimento sustentável, a questão energética assume, então, um dos focos principais de discussão, de acordo com o Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT (2010), enfrentando-se a dificuldade de conciliar a manutenção do fornecimento de insumos energéticos com a manutenção no curto e no longo prazo das necessidades ambientais, sociais, éticas, culturais, econômicas, espaciais e políticas da sociedade, sendo esta a

discussão a ser entabulada no Capítulo seguinte, explorando-se a Energia Fotovoltaica.

3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Serão abordados sequencialmente, neste Capítulo, os constructos que dizem respeito à energia solar fotovoltaica. Primeiramente serão abordados os novos paradigmas do setor energético e expostos os aspectos gerais das fontes renováveis de energia, seguidos de conceitos relativos à energia solar fotovoltaica. Será apresentado o cenário fotovoltaico mundial e brasileiro e aborda a geração distribuída de energia elétrica. Finalmente serão efetuadas considerações a respeito da correlação entre a geração fotovoltaica e o ambiente urbano.

3.1 NOVOS PARADIGMAS NO SETOR ENERGÉTICO

Segundo Fonseca *et al.* (2021a, p. 1, tradução nossa), “as crescentes preocupações com as alterações climáticas e a segurança energética levaram a uma mudança de paradigma no quadro energético”, uma vez que a redução das emissões responsáveis por essas alterações é reconhecida como um objetivo estratégico a nível global (Butturi *et al.*, 2018).

Nesse contexto, segundo relatório da Energy Information Administration (2018) é projetado um aumento de 44% na demanda global de energia de 2018 a 2040 e um aumento de 77% na geração líquida de eletricidade em todo o mundo no mesmo período. No entanto, esse relatório também afirma que 80% da energia total gerada em 2040 será produzida a partir de combustíveis fósseis (Li *et al.*, 2020).

Essa situação representa uma preocupação significativa para o setor de energia, uma vez que as tendências de aumento de emissões dos últimos anos não estão alinhadas com o acordo de Paris para manter o aumento da temperatura global abaixo de 2°C (Convenção Quadro Sobre Mudança do Clima, 2015; Fonseca *et al.*, 2021b; International Renewable Energy Agency, 2018). Com efeito, no ano de 2018, por exemplo, aproximadamente 20% do aumento do consumo de energia mundial foi consequência de condições climáticas extremas, como ondas de frio e de calor causadas pelo aquecimento global (International Energy Agency, 2019a).

Além disso, aspectos sociais e de saúde pública também podem ser associados a essa discussão de mudança de paradigma do setor energético.

Segundo Henriques e Schnorr (2010), a disponibilidade de eletricidade nas residências é em si uma necessidade humana básica e um precursor para o fornecimento de todos os serviços essenciais de infraestrutura. Porém, segundo a Energy Information Administration (2009), muitos países em desenvolvimento têm dificuldade em fornecer energia elétrica para toda a sua população, fazendo com que pelo menos 1,6 bilhão de pessoas no mundo não tenham acesso a ela.

Nesse sentido, a falta de fontes modernas e confiáveis de energia elétrica no ambiente doméstico, com o consequente uso de combustíveis tradicionais como querosene, lenha e carvão, geram impactos negativos nas populações vulneráveis socioeconomicamente, incluindo desde a liberação de toxinas durante a combustão, o que contribui para a prevalência de doenças respiratórias, até os riscos de incêndio e de acidentes com ingestão de substâncias tóxicas (Henriques, 2010).

Como consequência, segundo a Organização Mundial da Saúde (2006), o uso de combustíveis tradicionais para fornecimento de energia doméstica em países em desenvolvimento resultava em 1,5 milhão de mortes por ano, com crianças representando 800.000 dessas mortes.

Além disso, Henriques (2010) destaca ainda que níveis de iluminação insuficientes e a impossibilidade de alimentação elétrica de computadores prejudicavam o desenvolvimento de atividades educacionais e sociais. Assim, esse autor concluía afirmando que a falta do acesso a eletricidade nas residências elevava à degradação ambiental e inibia o desenvolvimento econômico.

Nesse contexto, Fonseca *et al.* (2021b) afirmam que o projeto de sistemas de energia sustentável requer ampliar a análise para além dos limites tradicionais para incluir as necessidades e restrições econômicas, ambientais e sociais no processo de tomada de decisão, corroborando com Bakshi e Fiksel (2003).

Como resposta a este cenário, está em curso uma transformação energética global para satisfazer o aumento contínuo do consumo de energia e cumprir os objetivos ambientais mundiais (Fonseca *et al.*, 2021b). Essa mudança necessária se assenta em três pilares principais: (i) aumentar a participação de fontes renováveis de energia, (ii) aumentar o uso de eletricidade de baixo carbono como forma de energia de uso final e (iii) implantar a geração distribuída de energia (International Energy Agency, 2019b; International Renewable Energy Agency, 2018; REN21, 2022).

Considerando os aspectos anteriormente mencionados, a geração distribuída (GD) de energias renováveis é, segundo Fonseca *et al.* (2021b), uma alternativa adequada aos desafios expostos, uma vez que se enquadra adequadamente nas características dos sistemas de energia sustentável, características estas que, segundo Alanne e Saari (2006) e Rong e Lahdelma (2016), incluem: (i) custo-benefício, (ii) confiabilidade, (iii) segurança e (iv) respeito ao meio ambiente. Conceitualmente a Geração Distribuída será abordada na Seção 3.5, sendo caracterizada pela existência de inúmeras fontes geradoras de pequeno porte localizadas junto à unidade consumidora (UC) (Boeff, 2013).

Nesse sentido, Butturi *et al.* (2018) afirmam que a discussão sobre a introdução de fontes distribuídas renováveis no sistema elétrico há muito se concentra em questões técnicas, econômicas e políticas, porém, a transição para um sistema elétrico sustentável exige uma mudança de perspectiva, considerando uma visão de sustentabilidade multissetorial e a necessidade de ação multissetorial, visão essa adotada por este estudo, e abordada nas Seções 2.3 e 2.4.

A literatura na área (Kumar *et al.*, 2016; Lambert; Silva, 2012; McKenna *et al.*; 2018; Silva *et al.*, 2021) corrobora com esta perspectiva, afirmando que a implementação da geração distribuída (GD) renovável não pode ser incentivada apenas considerando os benefícios relacionados a questões de natureza econômica, mas também alcançando os benefícios sociais, ambientais e políticos.

Ao incluir o viés da sustentabilidade ambiental urbana nessa discussão multissetorial da sustentabilidade, a micro e a minigeração distribuída de energia (MMGD), modalidades de geração distribuída (GD), instaladas no ambiente urbano, a serem discutidas sequencialmente – Seção 3.6, oferecem a possibilidade de lidar com ineficiências no fornecimento de energia e com a dependência de combustíveis fósseis de usinas convencionais e centralizadas, estando focadas em cobrir demandas locais, como, por exemplo, em residências, edifícios, comércios, *campi* universitários, hospitais, entre outros, usando fontes de energia específicas no local (Fonseca *et al.*, 2021a), atendendo às necessidades da sustentabilidade ambiental urbana.

Essa transição do sistema de geração de energia predominantemente centralizado para uma configuração descentralizada é defendida pela comunidade científica e formuladores de políticas (Bauwens; Gotchev; Holstenkamp, 2016; Silva *et al.*, 2021). Para Butturi *et al.* (2018), uma maior implantação de fontes distribuídas

de energia renovável é considerada essencial para uma transição para um sistema elétrico mais sustentável, sendo que, segundo Henriques (2010), essas fontes, as renováveis de energia, têm se mostrado uma alternativa adequada e economicamente viável para este fim.

3.2 FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA ELÉTRICA

Segundo Gomes (2013), a agenda da política energética global tem sido orientada por três pilares principais: (i) segurança econômica – geração elétrica a custo competitivo, (ii) segurança energética – confiabilidade no fornecimento de energia e (iii) segurança ambiental – restrição aos impactos ambientais resultantes da geração elétrica. Neste contexto, por reforçarem estes três pilares, as fontes renováveis de geração de energia elétrica mostram-se como uma solução para promover o desenvolvimento sustentável no setor (Connolly; Lund; Mathiesen, 2016; Kuang *et al.*, 2016; Olabi *et al.*, 2023).

As Fontes Renováveis de Energia são aquelas que existem em uma quantidade praticamente ilimitada na natureza, sendo reabastecidas de forma natural e em pequenas escalas de tempo em relação à vida humana, ou seja, são aquelas se renovam na natureza a uma taxa suficiente para a sua utilização (Energy Information Administration, 2022; National Geographic Society, 2024). Pode-se dividi-las em dois grupos principais: (i) Biomassa Tradicional e (ii) Renováveis Modernas (REN21, 2022).

A biomassa tradicional corresponde à combustão direta de madeira, carvão vegetal, folhas e resíduos agrícolas, florestais, animais e humanos; é usada frequentemente em áreas rurais e em países em desenvolvimento, em fogueiras, em fornos para cozinhar, em aquecimento residencial e para uso agrícola e industrial de pequeno porte (Karekezi; Lata; Coelho, 2004; REN21, 2022). A biomassa tradicional está muitas vezes relacionada a dispositivos muito ineficientes, levando a altos níveis de poluição, degradação ambiental e desmatamento (Karekezi; Lata; Coelho, 2004; REN21, 2022).

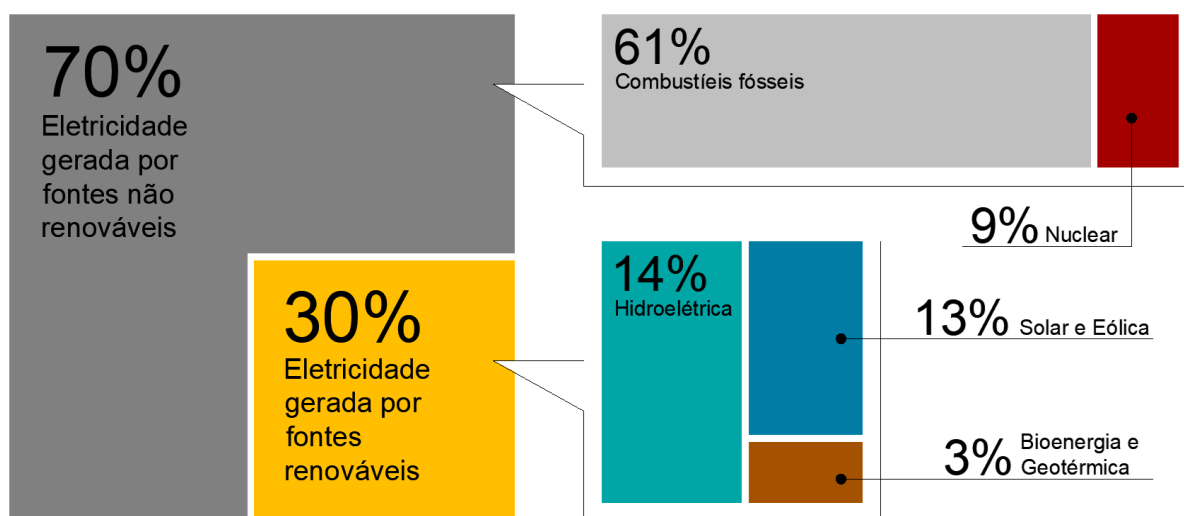
As fontes renováveis modernas correspondem à hidroelétrica, aos biocombustíveis, à biomassa moderna (combustão de biomassa em sistemas de alta eficiência e cogeração), à geotérmica, à eólica e à solar (REN21, 2022).

Por outro lado, as Fontes Não Renováveis de Energia são aquelas que existem em uma quantidade limitada na natureza, sendo esgotáveis em relação à escala de tempo da vida humana e não se renovando a uma taxa suficiente para a sua utilização, ou seja, a sua “reposição na natureza é muito lenta, pois resulta de um processo de milhões de anos sob condições” físico-químicas específicas (Empresa de Pesquisa Energética, 2019, *online*; Morse, 2024). Existem quatro tipos principais de recursos não renováveis: (i) petróleo, (ii) gás natural, (iii) carvão e (iv) energia nuclear (National Geographic Society, 2023). Os três primeiros são coletivamente chamados de combustíveis fósseis, pois foram formados na Terra a partir de plantas e animais mortos ao longo de milhões de anos; enquanto a energia nuclear vem de elementos radioativos, principalmente urânio, que é minerado e depois refinado em combustível (National Geographic Society, 2023).

Quando se trata de energias renováveis com foco na sustentabilidade ambiental e na preservação do meio ambiente, é importante que estas duas categorias de energias renováveis: (i) Biomassa Tradicional e (ii) Renováveis Modernas, estejam discriminadas, pois, apesar de a biomassa tradicional ser uma fonte renovável, não necessariamente corresponde às práticas sustentáveis e benéficas ao meio ambiente, diferente das fontes renováveis modernas que possuem características sustentáveis, embora todas causem, em maior ou menor nível, algum tipo de impacto ambiental (Karekezi; Lata; Coelho, 2004; REN21, 2022).

Nesse contexto, a matriz elétrica mundial é composta em sua maior parcela por fontes não renováveis de energia, provenientes da queima de combustíveis fósseis e energia nuclear (REN21, 2024). Segundo estimativas do *think tank* global *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century* – REN21 (2024), no ano de 2023 aproximadamente 70% da energia elétrica mundial foi gerada por fontes não renováveis e aproximadamente 30% por fontes renováveis, incluindo: (i) hidroelétrica, (ii) solar, (iii) eólica, (iv) bioenergia e (v) geotérmica, conforme pode-se observar na Figura 2.

Figura 2 – Porcentagem da Energia Elétrica Gerada por Fonte no Mundo no Ano de 2023.

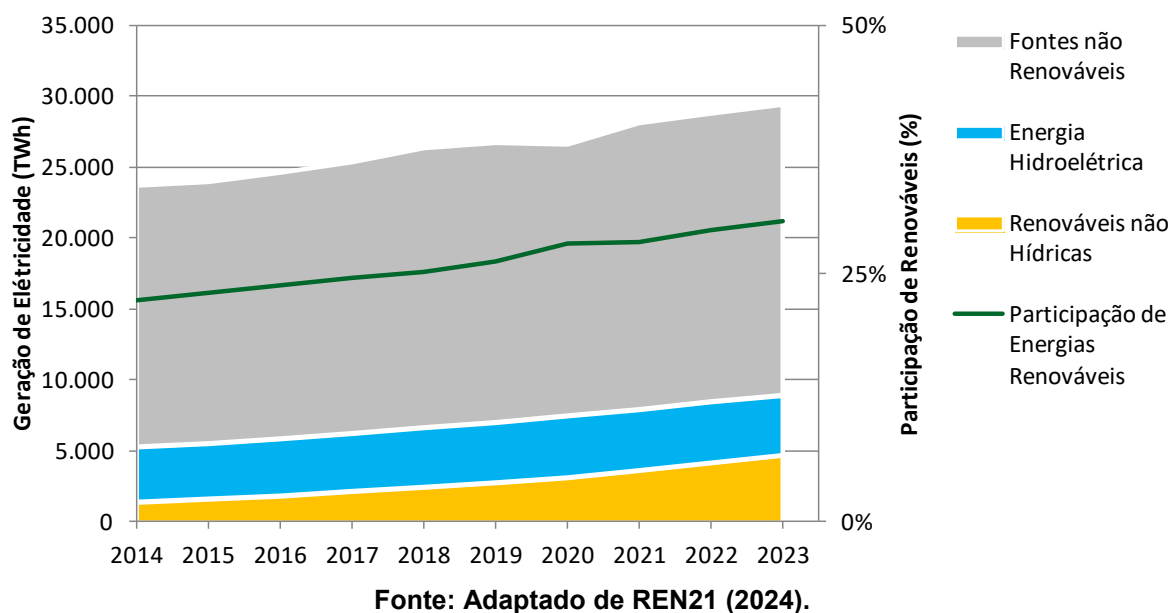


Fonte: Adaptado de REN21 (2024).

Apesar da maior participação das fontes não renováveis na geração de eletricidade mundial, entre os anos de 2014 e de 2023 observou-se gradativa redução na participação das fontes não renováveis e constante aumento na participação das fontes renováveis, conforme se pode observar pela linha verde na Figura 3 (REN21, 2024). Neste período, a participação das fontes não renováveis passou de 78% para 70%, enquanto a participação das renováveis não hídricas (área amarela no gráfico) passou de 6% para 16%; a participação da geração hidroelétrica (área azul no gráfico) se manteve estável na média de 16%, resultando em um aumento da participação total das fontes renováveis de 22% em 2014 para 30% em 2023 (REN21, 2024).

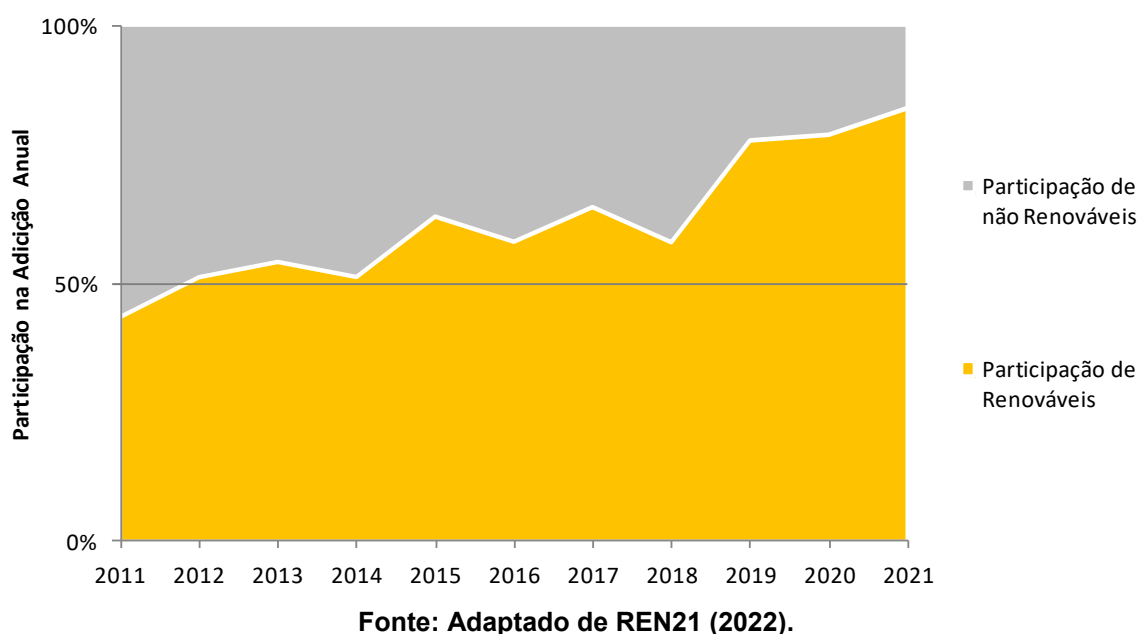
A geração hidroelétrica aparece de forma separada às outras fontes renováveis na Figura 3, pois, como visto, a energia hidroelétrica é um componente bastante significativo de geração renovável – 47% no ano de 2023 – e, portanto, pode encobrir o desenvolvimento de outras tecnologias de energia renovável caso seja incluída na mesma categoria (REN21, 2024).

Figura 3 – Geração Mundial de Energia Elétrica por Fonte e Participação de Renováveis, entre os anos de 2014 e 2023.



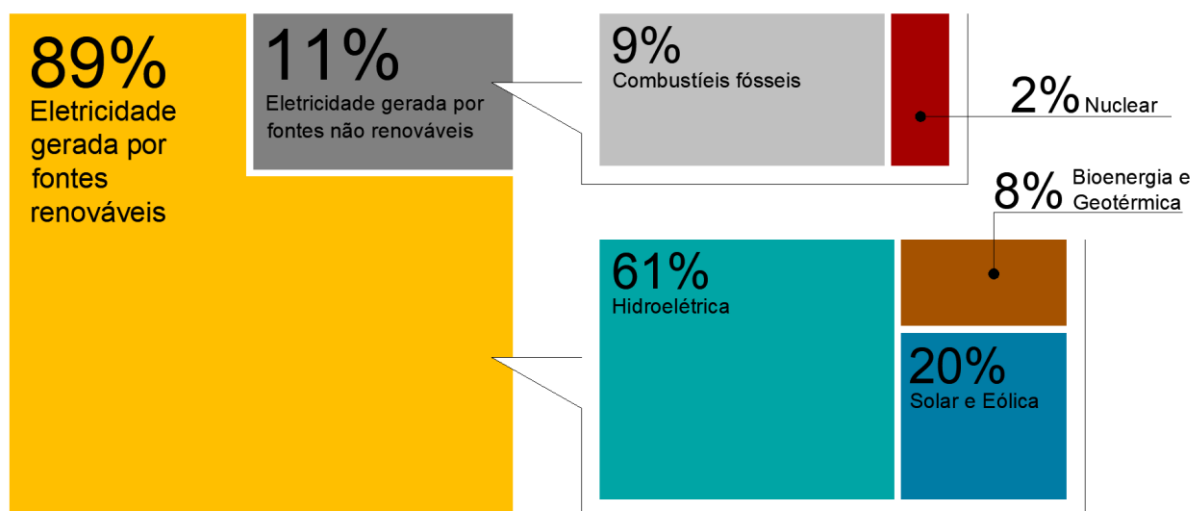
Seguindo essa tendência, desde o ano de 2012 é adicionada no mundo mais potência de geração de energia elétrica renovável do que não renovável, conforme se pode observar na Figura 4 (REN21, 2022). No ano de 2021, último ano em que esta análise aparece no relatório do REN21, 84% da nova potência de geração de energia elétrica adicionada no mundo era renovável (REN21, 2022).

Figura 4 – Participação nas Adições Anuais de Capacidade de Geração de Energia Elétrica no Mundo, entre os anos de 2011 e 2021.



Diferentemente do cenário mundial, em que, como já mencionado, ainda existe a predominância de fontes não renováveis para a geração de energia elétrica, no Brasil a matriz elétrica é composta principalmente por fontes renováveis, conforme ilustrado na Figura 5 (Empresa de Pesquisa Energética, 2024b). No ano de 2023, aproximadamente 89% da energia elétrica gerada no Brasil foi proveniente de fontes renováveis, sendo 20% de fonte solar e eólica (Empresa de Pesquisa Energética, 2024b).

Figura 5 – Porcentagem da Energia Elétrica Gerada por Fonte no Brasil no Ano de 2023.

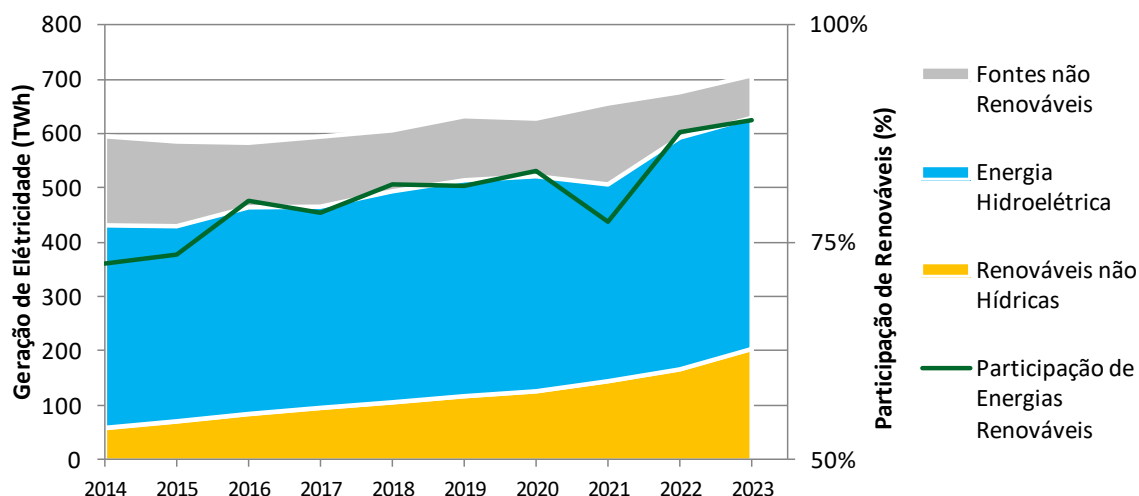


Fonte: Adaptado de Empresa de Pesquisa Energética (2024b).

De forma semelhante ao cenário mundial, observa-se no Brasil uma tendência de aumento da participação das fontes renováveis não hídricas na geração de energia elétrica entre os anos de 2014 e 2023, conforme ilustrado na Figura 6, passando de uma contribuição de 10% em 2014 para 29% em 2023 (Empresa de Pesquisa Energética, 2024a, 2024b). Em termos brutos, a quantidade de energia gerada pelas fontes renováveis não hídricas passou de 59 TWh em 2014 para 204TWh em 2023, um aumento de 246% no período (Empresa de Pesquisa Energética, 2024a, 2024b).

Verifica-se também que a contribuição das fontes renováveis oscilou durante este período, devido ao aumento do uso de combustíveis fósseis para a geração de energia elétrica, em razão da diminuição da oferta hidroelétrica em consequência das crises hídricas observadas no início da década de 2010 e no ano de 2021 – Figura 6 (Empresa de Pesquisa Energética, 2024a). Apesar disso, na média do período 81% de toda a energia elétrica gerada no Brasil foi proveniente de fontes renováveis (Empresa de Pesquisa Energética, 2024a, 2024b).

Figura 6 – Geração Brasileira de Energia Elétrica por Fonte e Participação de Renováveis, entre os anos de 2014 e 2023.



Fonte: Adaptado de Empresa de Pesquisa Energética (2024a, 2024b).

Assim, embora a matriz elétrica brasileira seja predominantemente renovável, ela é pouco diversificada, uma vez que a geração hidroelétrica contribuiu com 62% de toda a energia elétrica gerada entre o ano de 2014 e o ano de 2023 (Empresa de Pesquisa Energética, 2024a, 2024b); o que torna a matriz elétrica brasileira muito dependente de fatores climáticos, principalmente dos níveis de chuva.

Desta forma, ao se analisar as diferentes fontes energéticas com foco na confiabilidade do fornecimento de energia, observa-se que as fontes renováveis modernas são menos confiáveis do que as fontes não renováveis, sendo altamente dependentes de condições climáticas de curto, de médio e de longo prazo (National Geographic Society, 2024). No caso do Sistema Elétrico Brasileiro, a geração hidroelétrica e a termoelétrica contribuem para a estabilidade do sistema, sendo consideradas **fontes firmes** capazes de garantir o atendimento da demanda de carga típica do sistema; por sua vez, as fontes renováveis como a eólica e a solar fotovoltaica são consideradas **fontes intermitentes** de energia devido à variabilidade temporal elevada associada às condições meteorológicas presentes no local da usina (Pereira *et al.*, 2017).

Além da análise das fontes renováveis do ponto de vista da geração de energia elétrica, é possível analisá-las também sob a ótica da capacidade total instalada. Na Tabela 2 está representada a capacidade total instalada de geração de energia elétrica por fonte renovável no Brasil e no Mundo.

Tabela 2 – Capacidade de Geração de Energia Elétrica Renovável no Brasil e no Mundo

Fonte de Energia Renovável	Mundo (2021)		Brasil (2025)*			
	Capacidade Instalada		Capacidade Instalada			Quant. de Usinas
	GW	%	GW	% da capacidade nacional	% da capacidade mundial da fonte	
Hídrica	1.170,5	41%	110,0	51%	9%	1.386
Solar	766,2	27%	52,5	25%	7%	3.139.872
Eólica	743	26%	33,2	16%	4%	1.204
Biomassa	145	5%	17,9	8%	12%	1.227
Geotérmica	14,1	0,5%	0,0	0%	0%	0
Total	2.838,8	100%	213,6	100%	8%	3.143.689

* Inclui Geração Centralizada e Micro e Minigeração distribuída, dados de 9 de janeiro de 2025.

Fonte: Adaptado de REN21 (2022) e Agência Nacional de Energia Elétrica (2025a, 2025b).

Observa-se que o Brasil possui 8% de toda a capacidade de geração de energia elétrica renovável do mundo, o que equivale a 213,6 GW. A geração hídrica ocupa o primeiro lugar em capacidade renovável instalada tanto no Brasil como no mundo, representando 51% da capacidade renovável nacional e 41% da mundial. Não obstante, destaca-se que a geração solar e a geração eólica mundiais juntas já possuem uma capacidade de geração maior do que a hídrica. Nessa tendência, a geração solar brasileira já representa 25% de toda a capacidade renovável no Brasil e 7% da mundial (REN21, 2022; Agência Nacional de Energia Elétrica, 2025a, 2025b).

Embora a capacidade total instalada da energia solar no Brasil represente somente 25% do total renovável nacional, a quantidade de usinas instaladas dessa fonte (3.139.872 usinas) representa 99,9% da quantidade total de usinas de geração de energia elétrica brasileira (3.143.689 usinas) (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2025a, 2025b). Esse fato se deve pelo grande potencial e facilidade dessa fonte ser instalada de forma distribuída (Scolari, 2019), conforme será abordado na Seção seguinte.

3.3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar é responsável indiretamente pela origem de praticamente todas outras fontes de energia citadas anteriormente, uma vez que é a partir dela que se realiza o ciclo hidrológico, a indução da circulação de massas de ar e o fornecimento de energia para a realização de fotossíntese (Pinho; Galdino, 2014). Por outro lado, fisicamente falando, a energia solar não é um recurso renovável visto que sua energia é consequência das reações de fusão nuclear dos átomos de Hidrogênio para formar Hélio (Pereira *et al.*, 2017). Porém, considerada a escala de tempo da vida no planeta Terra, pode-se considerar que a energia proveniente do Sol é inesgotável (Pereira *et al.*, 2017).

A disponibilidade do recurso energético solar e sua variabilidade espacial e temporal estão diretamente relacionadas a fatores: (i) astronômicos, (ii) físicos e (iii) climatológicos (Pereira *et al.*, 2017). Os fatores astronômicos a serem considerados dizem respeito à posição do Sol em relação à Terra, e interferem diretamente na “variabilidade da radiação solar incidente no topo da atmosfera” (Pereira *et al.*, 2017, p. 17).

Do ponto de vista físico e climatológico, as nuvens são o principal fator modulador da radiação solar, fazendo com que os diferentes comprimentos de onda da radiação eletromagnética solar interajam de forma distinta com os diversos constituintes atmosféricos, podendo produzir processos de absorção, reflexão e espalhamento da radiação solar incidente na superfície terrestre (Pereira *et al.*, 2017). Assim, fatores climáticos como quantidade de chuva e nuvens de uma região interferem diretamente no aproveitamento da energia solar para fins de geração de energia fotovoltaica.

Resultante dessas variáveis, a radiação solar é mensurada pela Irradiância Solar (W/m^2), que representa a potência solar instantânea incidente em uma determinada superfície (Pinho; Galdino, 2014). A Irradiância Solar média anual no limite da atmosfera terrestre é de 1.360 W/m^2 , este valor é também chamado de constante solar (Pinho; Galdino, 2014). Convencionalmente, a irradiância solar incidente na superfície terrestre ao meio-dia solar quando o sol está perpendicular à superfície é de 1.000 W/m^2 , sendo este valor utilizado como padrão pela indústria fotovoltaica para o ensaio de células e módulos fotovoltaicos (Tonin, 2017).

Consequentemente, quando se integra a irradiância no tempo, obtêm-se a “Irradiação Solar (Wh/m^2), ou energia radiante incidente acumulada em um intervalo de tempo”, por exemplo em um dia ($\text{Wh/m}^2.\text{dia}$) ou em um ano ($\text{Wh/m}^2.\text{ano}$) (Pereira *et al.*, 2017, p. 19).

Dentre as formas de utilização da energia solar pode-se destacar as aplicações diretas para o aquecimento de água e de ambientes e as aplicações para geração de energia elétrica por meio da: (i) geração heliotérmica, também chamada de geração solar térmica concentrada, e da (ii) geração fotovoltaica, foco do presente estudo, que se utiliza do princípio do efeito fotovoltaico (REN21, 2022).

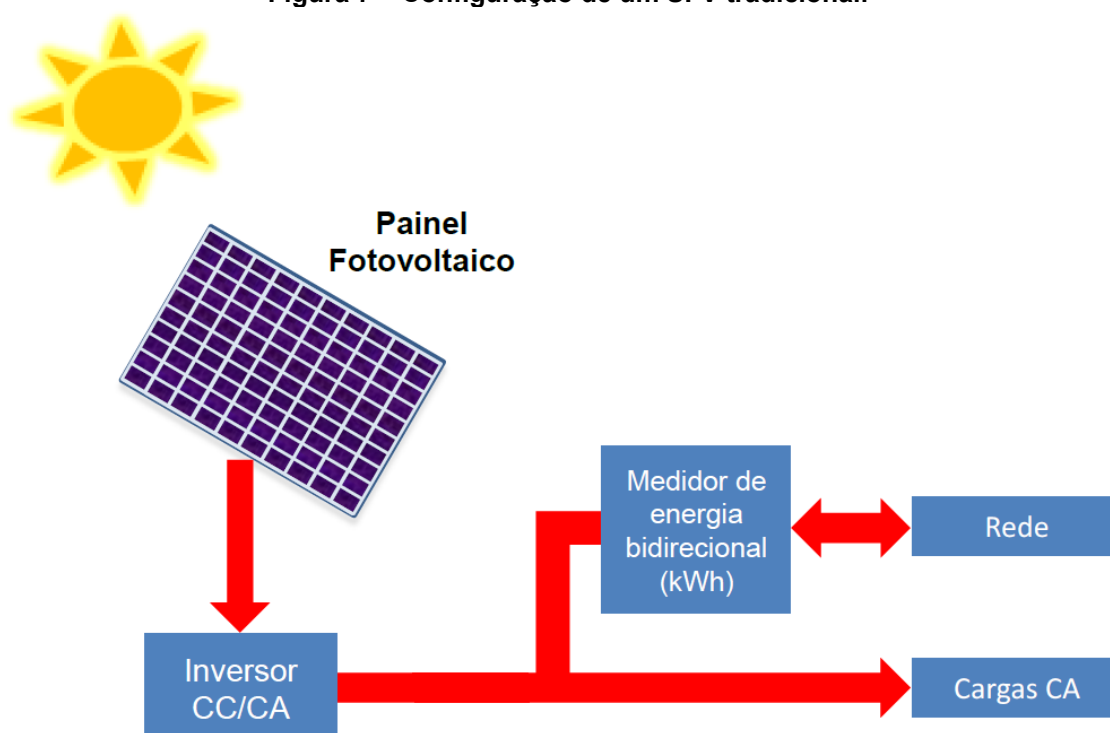
Descoberto em 1839 pelo físico francês Alexandre-Edmond Becquerel (1820 –1891), o efeito fotovoltaico pode ser definido como:

[...] o fenômeno físico que permite a conversão direta da luz em eletricidade. Esse fenômeno ocorre quando a luz, ou radiação eletromagnética do Sol, incide sobre uma célula composta por materiais semicondutores com propriedades específicas. (Villalva; Gazoli, 2012, p. 65).

Assim, o dispositivo capaz de reproduzir o efeito fotovoltaico de forma utilizável, transformando a radiação eletromagnética emitida pelo Sol em eletricidade é a célula fotovoltaica, que representa a unidade fundamental de um sistema FV (Pinho; Galdino, 2014). Como cada célula possui tamanho limitado e produz pouca eletricidade, várias células são interligadas e coladas sobre uma estrutura rígida formando assim o módulo fotovoltaico que possui potência e tamanho compatíveis com as necessidades de uma instalação sendo comercializados dessa forma (Gazoli; Villalva; Guerra, 2012). Os diversos módulos fotovoltaicos são, por sua vez, interligados eletricamente entre si formando arranjos fotovoltaicos série e/ou paralelo de modo a atingir os níveis de tensão e de corrente necessários para a aplicação (Pinho; Galdino, 2014).

Além dos módulos fotovoltaicos, um Sistema Fotovoltaico (SFV) é composto também por um Inversor, que é o equipamento eletrônico capaz de converter a corrente contínua (CC) proveniente dos módulos fotovoltaicos em corrente alternada (CA) para então ser utilizada (Tonin, 2017). Dessa forma, um SFV pode ser definido como o conjunto de elementos que geram e que fornecem eletricidade pela conversão direta da energia solar a partir do processo fotovoltaico (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020), conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Configuração de um SFV tradicional.



Fonte: Adaptado de Tiepolo (2015).

Além disso, os SFV podem ser classificados em duas categorias quanto à interligação com a rede pública: (i) Sistemas Fotovoltaicos Isolados (SFVI), e (ii) Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFVCR) (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008).

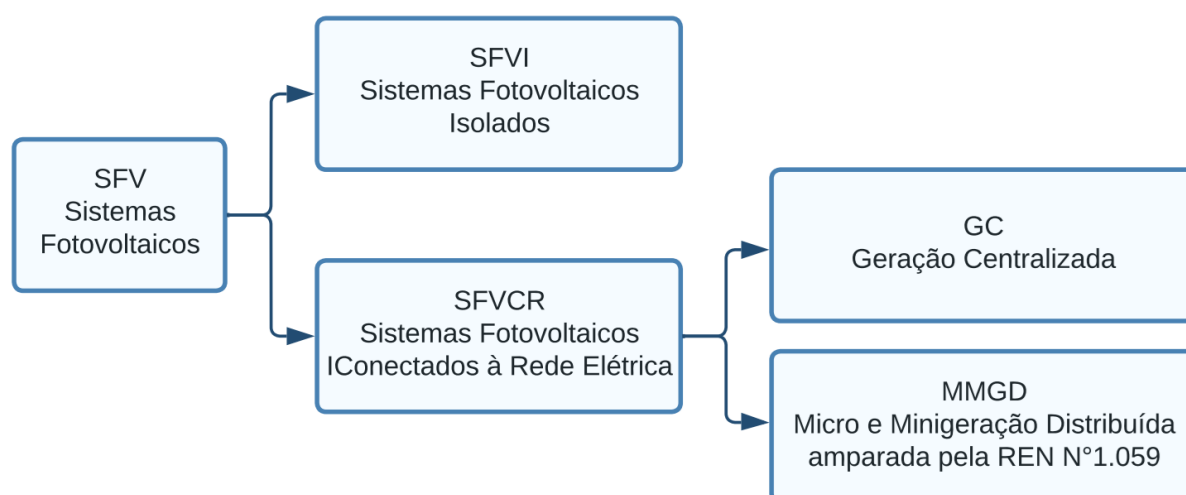
Os Sistemas Fotovoltaicos Isolados são assim chamados por não possuírem conexão com o sistema público de fornecimento de energia elétrica (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020). Estes sistemas operam de maneira isolada para atender a somente uma unidade consumidora ou à uma pequena comunidade (minirrede), utilizando-se de um banco de baterias para armazenamento. Os SFVI possibilitam o fornecimento de energia elétrica em locais que não possuem rede de distribuição por questões econômicas ou ambientais, assim, são utilizados principalmente em localidades isoladas, em ilhas ou em aplicações para alimentar cargas específicas como sistema de iluminação pública, geladeiras para armazenar vacinas, bombas de água e outros (Tonin, 2017).

Por sua vez, os sistemas fotovoltaicos conectados a rede elétrica são aqueles que estão efetivamente conectados ao sistema público de fornecimento de energia elétrica (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020), constituindo o sistema mais encontrado no Brasil e no mundo (Campos, 2016, REN21, 2022).

Os SFVCR apresentam reduzida complexidade quando comparados com os SFVI devido à ausência dos bancos de baterias, que podem ser considerados o elo frágil dos sistemas isolados devido aos seus elevados custos de manutenção e seus impactos ambientais causados principalmente no momento de descarte das baterias, que possuem materiais tóxicos (Campos, 2016). Assim, nos SFVCR a própria rede elétrica da concessionária é vista como um elemento armazenador, recebendo ou fornecendo energia de acordo com a necessidade do momento (Urbanetz Jr., 2010).

A classificação dos SFV em relação ao seu tipo de conexão com a rede elétrica e em relação ao seu caráter centralizado ou distribuído é representada na Figura 8.

Figura 8 – Classificação de Sistemas Fotovoltaicos.



Fonte: Adaptado de Urbanetz Jr. (2010).

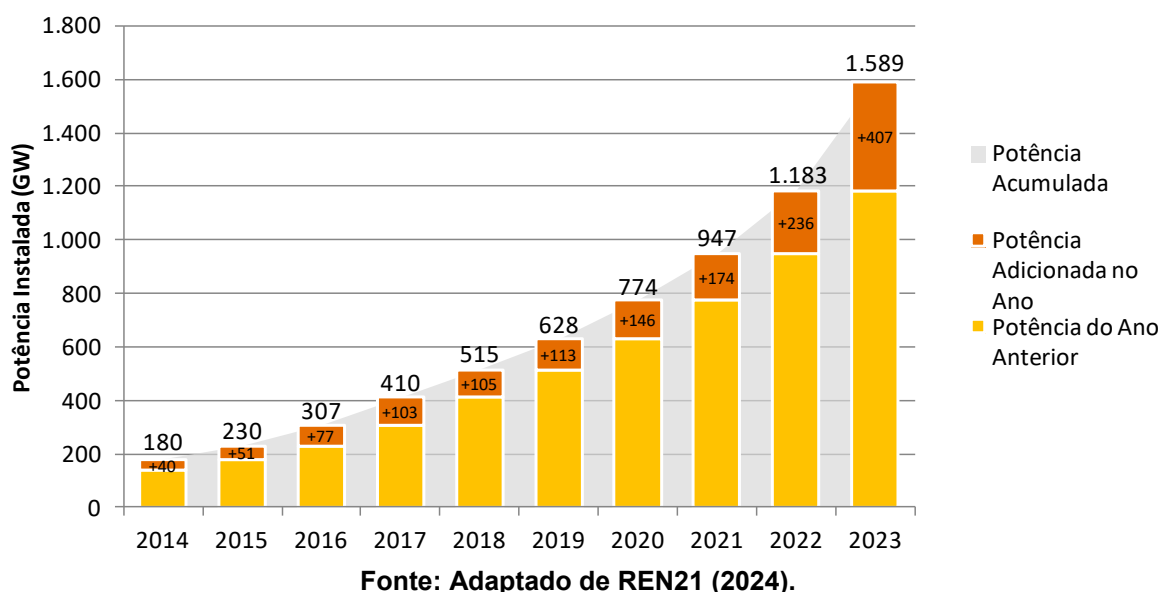
Relembra-se neste momento que, conforme definido no Capítulo introdutório, mais especificamente na Seção 1.2 – Delimitação da Pesquisa, esse estudo se restringirá a considerar os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica, instalados dentro do ambiente urbano e enquadrados como micro e minigeração distribuída – MMGD – de acordo com a Resolução Normativa N° 1.059/2023 (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2023) citada na Seção 3.5 e cujo cenário mundial e nacional será apresentado na Seção seguinte.

3.4 CENÁRIO FOTOVOLTAICO

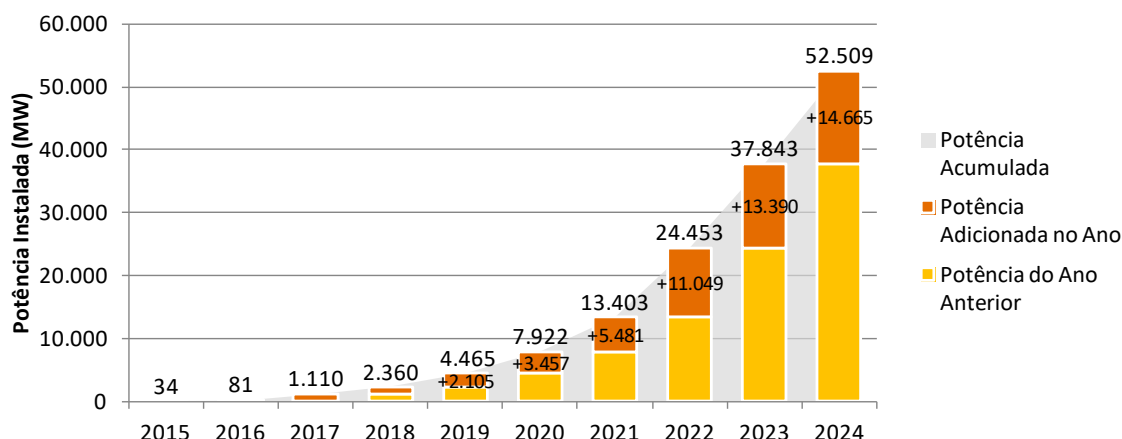
Impulsionando a tendência de aumento da participação das fontes renováveis não hídricas na matriz energética mundial e Brasileira, descrita na Seção 3.2, a energia solar fotovoltaica (FV) vem se destacando na última década, registrando anualmente recordes de adição de capacidade instalada, ou seja, desde o ano 2012 é adicionada no mundo e no Brasil mais potência FV no ano corrente do que nos anos anteriores (Empresa de Pesquisa Energética, 2024a; REN21, 2022).

Ilustra-se esse comportamento do cenário mundial na Figura 9. Observa-se que no ano de 2023 foram adicionados 407 GW de potência fotovoltaica, o que representou um aumento de 72% em relação ao montante instalado em 2022, totalizando uma capacidade de geração de 1.589 GW no mundo (REN21, 2024).

Figura 9 – Capacidade mundial da energia fotovoltaica e adições anuais, 2014-2023.



Segundo o REN21 (2024), a China, os Estados Unidos, a Índia, o Japão e a Alemanha representam, nessa ordem, os países com as maiores capacidades fotovoltaicas instaladas no mundo, somando uma potência instalada de 1.096GW, que representa 69% do total mundial. Neste mesmo estudo, o Brasil aparece com destaque na quinta posição em capacidade adicionada no ano de 2023, quando foram adicionados 13,4GW de geração fotovoltaica, conforme ilustrado na Figura 10.

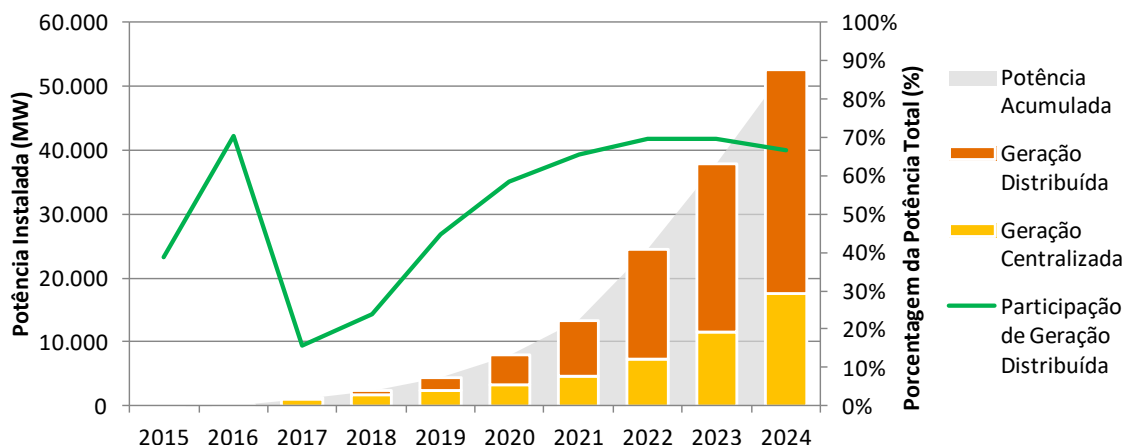
Figura 10 – Capacidade brasileira da energia fotovoltaica e adições anuais, 2015-2024.

* Inclui Geração Centralizada e Micro e Minigeração Distribuída

Fonte: Adaptado Empresa de Pesquisa Energética (2024a), Agência Nacional de Energia Elétrica (2025a, 2025b).

Seguindo a tendência mundial, observou-se no Brasil entre o ano de 2023 e o ano de 2024 um aumento de 38,8% na capacidade FV instalada, passando de 37.843MW em 2023 para 52.509MW em 2024 (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2025a, 2025b). Esse aumento foi ocasionado principalmente pela micro e minigeração distribuída – MMGD, responsável por 59% das novas adições entre esses dois anos.

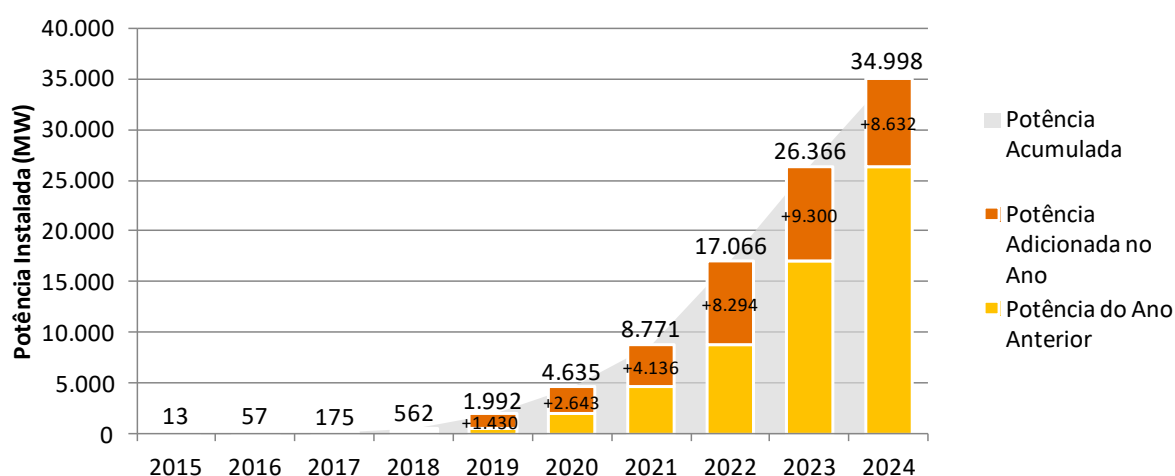
Além disso, desde o ano de 2017 é observada a tendência de aumento na participação da MMGD em relação a geração centralizada, ao passo que, no final de 2024 aproximadamente 67% da capacidade instalada correspondia a MMGD – conforme ilustrado na Figura 11 (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2025a, 2025b; Empresa de Pesquisa Energética, 2024a).

Figura 11 – Capacidade brasileira da energia fotovoltaica centralizada e distribuída, 2015-2024.

Fonte: Adaptado de Empresa de Pesquisa Energética (2024a), Agência Nacional de Energia Elétrica (2025a, 2025b).

Desta forma, sendo a Micro e a Minigeração Distribuída o enfoque do presente estudo por, como já mencionado, estarem em grande parte instaladas no ambiente urbano, importante se faz avaliar o seu crescimento de forma independente da geração centralizada, conforme ilustrado na Figura 12. Observa-se que no ano de 2024 foram instalados 8.632MW de potência de geração FV, o que equivale a 33% de toda a potência instalada até então desde 2012, totalizando 34.998MW de capacidade instalada (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2025a, 2025b; Empresa de Pesquisa Energética, 2024a).

Figura 12 – Capacidade brasileira de micro e minigeração distribuída fotovoltaica, 2015-2024.



Fonte: Adaptado de Empresa de Pesquisa Energética (2024a), Agência Nacional de Energia Elétrica (2025a).

Destaca-se ainda que, desde o ano de 2012, quando foi publicada a Resolução Normativa N° 482 da ANEEL (ver Seção 3.5) que regulamentou e que estabeleceu as condições gerais da Micro e Minigeração Distribuída, a geração fotovoltaica instalada nessa modalidade teve um desenvolvimento constante e expressivo, registrando uma taxa de crescimento anual média de 157% entre o ano de 2015 e o ano de 2024 (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2025a, 2025b; Empresa de Pesquisa Energética, 2024a). Além disso, observa-se no período entre o ano de 2015 e o ano de 2023, que a potência FV adicionada em determinado ano é superior à adicionada no ano anterior, demonstrando o crescimento do setor de geração distribuída, setor esse que será abordado na Seção seguinte.

3.5 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA ELÉTRICA

Segundo Castro e Dantas (2018), o setor elétrico se consolidou baseado em um paradigma tecnológico em que a geração é centralizada, os fluxos de energia possuem caráter unidirecional e os consumidores possuem comportamento passivo. Essa configuração é chamada Geração Centralizada (GC), sendo composta por grandes usinas geradoras localizadas em locais específicos e apropriados, de modo que a distribuição da energia gerada até o consumidor final é efetuada através de extensas linhas de transmissão e distribuição (Boeff, 2013). Deste modo, a geração centralizada é caracterizada por possuir um número relativamente pequeno de usinas geradoras, porém, em sua maioria de grande porte e situadas, em geral, fora do espaço considerado urbano (Boeff, 2013).

Entretanto, continuam Castro e Dantas (2018), nota-se uma tendência de descentralização dos sistemas elétricos motivada pela busca de infraestruturas elétricas mais sustentáveis, por um maior número de consumidores engajados às questões socioambientais e pela crescente viabilidade técnico-econômica de novas tecnologias. Assim, a geração distribuída (GD) é caracterizada pela existência de inúmeras fontes geradoras de pequeno porte localizadas junto à unidade consumidora (UC) (Boeff, 2013). Nesta configuração, a energia elétrica gerada pode tanto alimentar a própria UC quanto ser exportada para a rede de distribuição sendo utilizada por outra unidade consumidora. Por reduzir as distâncias entre a unidade geradora e a unidade consumidora, a GD favorece o descongestionamento e a redução das perdas dos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (Boeff, 2013; Tiepolo, 2015).

Para Chen *et al.* (2013) e Fonseca *et al.* (2021b), a geração distribuída no ambiente urbano teria condições de desenvolvimento rápido em todo o mundo devido ao seu potencial promissor para reduzir a parcela do consumo de energia fóssil na geração de energia elétrica e de mitigar perdas de energia, além de descarregar o sistema de distribuição e aumentar a flexibilidade de operação do sistema (Ackermann; Anderson; Soder, 2001; Barin *et al.*; 2010; Falaghi *et al.*, 2011; Pepermans *et al.*, 2005; Tan *et al.*, 2013), o que efetivamente aconteceu.

Fonseca *et al.* (2021a) corroboram com os benefícios da GD, afirmando que ela oferece uma alternativa confiável, flexível e eficiente para a transição energética.

Nos sistemas GD o consumo de energia está próximo ao local de geração, de modo que a eficiência energética é aumentada, pois as perdas de energia em linhas de transmissão de longa distância são evitadas (Fonseca *et al.*, 2021b). Além disso, a geração distribuída também promove o uso de recursos locais e renováveis, aumentando assim a autossuficiência e a segurança energética, além de oferecer uma alternativa de fornecimento de energia com baixas emissões de carbono (Fonseca *et al.*; 2019, 2021b; Marrone *et al.*; 2023; Shivarama; Sathish, 2015).

Já para Silva *et al.* (2021), a utilização de sistemas de GD conectados à Geração Centralizada (GC) de Energia oferece benefícios como redução das perdas de energia, melhoria dos níveis de tensão e aumento da capacidade de transmissão do sistema (Guedes, 2013). Essa complementaridade da GD na rede elétrica predominantemente centralizada torna o sistema de distribuição mais confiável, além de contribuir para a minimização dos problemas decorrentes das mudanças climáticas, ao reduzir a necessidade de uso de grandes centrais termoelétricas (Algarni; Bhattacharya, 2009; Lora; Haddad, 2006).

A configuração atual do sistema elétrico brasileiro é composta em sua maior parcela por usinas de geração centralizada, mas sendo instaladas, em número cada vez maior, pequenas usinas de geração distribuída, conforme pode-se observar na Tabela 3. A energia solar fotovoltaica é a maior responsável pelo crescimento da geração distribuída no Brasil, uma vez que, das 3.122.114 usinas de geração distribuída existentes, 3.121.365 são relativas a essa modalidade de geração.

Tabela 3 – Capacidade de Geração de Energia Elétrica Renovável Centralizada e Distribuída no Brasil

Fonte de Energia	Geração Centralizada		Micro e Minigeração Distribuída	
	GW	Quant. de Usinas	GW	Quant. de Usinas
Hídrica	109,9	1.320	0,06	66
Solar	17,5	18.507	35,0	3.121.365
Eólica	33,2	1.105	0,02	99
Biomassa	17,7	643	0,2	584
Total	178,3	21.575	35,3	3.122.114

*** Dados de 9 de janeiro de 2025.**

Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Energia Elétrica (2025a. 2025b).

O fato de os consumidores de pequeno e médio porte poderem instalar uma usina fotovoltaica (FV) no telhado de suas residências ou comércios a um custo relativamente acessível, fez com que a geração FV, fosse consolidada como uma fonte de geração de energia elétrica predominantemente distribuída no Brasil, embora também existam grandes usinas instaladas de modo centralizado (Scolari, 2019).

Além de ser predominantemente distribuída, a geração fotovoltaica também possui um caráter marcante de integração ao ambiente urbano devido a sua flexibilidade de instalação e a sua capacidade de se adaptar arquitetonicamente às construções, características essas que serão tratadas na Seção 3.6.

No que diz respeito ao Brasil, a Geração Distribuída teve início em 1994 com o Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios (PRODEEM), que por sua vez, foi incorporado ao Programa Luz Para Todos (LpT) em 2003 (Silva *et al.*, 2021). Anos depois, em 2012, a geração distribuída de energia foi regulamentada pela Resolução Normativa Nº 482, de 17 de abril de 2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2012) e pela sua posterior atualização na Resolução Normativa Nº 687, de 24 de novembro de 2015 do mesmo órgão (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2015), em que foram estabelecidas as condições gerais para o acesso de microgeração e de minigeração distribuída aos

sistemas de distribuição de energia elétrica, além do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE).

Seguindo as necessidades de atualização normativa, as duas resoluções citadas anteriormente foram revogadas e atualizadas pelas Resoluções Normativas Nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021 da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2021) e Nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023 do mesmo órgão (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2023), sendo estas as resoluções em vigor no momento da elaboração deste estudo.

Contudo, destaca-se que foi a publicação da já citada Resolução Normativa Nº 482 o marco inicial da disseminação da geração distribuída no Brasil, sobretudo da solar fotovoltaica, permitindo que desde os consumidores residenciais de pequeno porte até os consumidores industriais de grande porte pudessem instalar sistemas fotovoltaicos em suas próprias unidades consumidoras com reduzida burocracia de homologação (Scolari *et al.*, 2018).

As principais definições adotadas pelas Resoluções Normativas Nº 1.000 e Nº 1.059, de singular importância para o desenvolvimento desse estudo são:

- Microgeração Distribuída: “Central geradora de energia elétrica, com potência instalada, em corrente alternada, menor ou igual a 75kW e que utilize [...] fontes de renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição de energia elétrica por meio de instalações de unidade consumidora” (ANEEL, 2023, p. 3).
- Minigeração Distribuída: “Central geradora de energia elétrica renovável [...] conectada na rede de distribuição de energia elétrica por meio de instalações de unidade consumidora, que possua potência instalada em corrente alternada maior que 75 kW e menor ou igual a [...] 3 MW” para fontes não despacháveis (ANEEL, 2023, p. 3).
- Sistema de Compensação de Energia Elétrica - SCEE: “sistema no qual a energia elétrica ativa é injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída na rede da distribuidora local, cedida a título de empréstimo gratuito e posteriormente utilizada para compensar o consumo de energia elétrica ativa ou contabilizada como crédito” (ANEEL, 2023, p. 3).

Cabe neste momento efetuar um paralelo entre o sistema de compensação de energia brasileiro com o cenário mundial, no qual existem duas políticas de

compensação de energia elétrica para a geração distribuída, o *Net Metering* e o *Feed-in* (REN21, 2022).

O sistema de compensação brasileiro é semelhante ao chamado *Net Metering* na literatura mundial, no qual existe um acordo regulado em que as unidades consumidoras com GD recebem créditos pelo excesso de geração, que pode ser aplicado para compensar o consumo em outros períodos (REN21, 2022).

Já a política de *Feed-in* normalmente garante às UC com GD pagamentos especificados pela sua geração (R\$/kWh) durante um período fixo, podendo também estabelecer regulamentos pelos quais os geradores têm a opção de vender energia diretamente à rede. Existem inúmeras opções para definir o nível do incentivo, podendo o pagamento ser determinado por um preço mínimo estabelecido ou flutuar sobre o preço da eletricidade no atacado (Scolari, 2019; REN21, 2022).

Por permitir a venda direta da energia elétrica gerada, a política de *Feed-in* também incentiva a implantação de usinas de geração fotovoltaica com viés comercial, visando a obtenção de lucro direto. Diferente da política de *Net Metering*, que por meio das políticas de compensação de energia elétrica visam a redução dos custos de energia elétrica do consumidor final (REN21, 2022).

Devido à facilidade de implantação e de controle, o *Net Metering* é o sistema mais utilizado no mundo. Porém, por possuir mais possibilidades de utilização em vários tipos de cenários, gerando assim maiores vantagens tanto para o consumidor quanto para o sistema elétrico público, as políticas de *Feed-in* vêm ganhando espaço no mercado mundial, sobretudo em países desenvolvidos (Scolari, 2019; REN21, 2022).

Nesse contexto também cria-se a figura do prosumidor³ de energia na medida em que o usuário final que instala um sistema de micro e minigeração distribuída em sua unidade consumidora é ao mesmo tempo um consumidor e um produtor de eletricidade (Facchini, 2017), conferindo assim ao usuário final um papel mais ativo ao longo da cadeia produtiva de eletricidade (Butturi *et al.*, 2018).

Dentro desse cenário da geração elétrica renovável e distribuída, a energia solar fotovoltaica vem se destacando e se expandindo à medida que se torna a

³ Prosumidor é um termo originado do inglês - *prosumer* - que provém do neologismo cunhado por Alvin Toffler (1928-2016) por meio da junção de *producer* (produtor) e *consumer* (consumidor), para a análise do comportamento dos indivíduos, concomitantemente, produtores e consumidores de informação (Bório, 2014).

opção mais competitiva para geração de eletricidade em um número crescente de locais (Empresa de Pesquisa Energética, 2024; REN21, 2021, 2022, 2024).

Assim, a geração solar fotovoltaica de micro e minigeração distribuída contribui para a sustentabilidade energética nestes três aspectos já citados: (i) representa uma fonte renovável de geração de energia elétrica, (ii) pode ser instalada em forma de geração distribuída e (iii) pode ser integrado ao ambiente urbano, conforme será descrito na Seção seguinte.

A integração ao ambiente urbano vem ao encontro dos preceitos da Sustentabilidade Ambiental Urbana – Seção 2.3, sendo o estudo da sustentabilidade energética no ambiente urbano uma questão de grande importância para solução dos diversos problemas ambientais urbanos, segundo Larivière e Lafrance (1999) e Peteleaza *et al.* (2024).

3.6 GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NO AMBIENTE URBANO

Segundo a Organização das Nações Unidas (2022), as cidades representam o local onde é gerado 80% do produto interno bruto e onde vive aproximadamente 56% da população mundial, de modo que as áreas urbanas são consideradas responsáveis por 75% do consumo global de energia e por 70% das emissões de dióxido de carbono relacionadas à energia (Edenhofer *et al.*, 2014; Formolli *et al.*, 2022).

Assim, segundo Formolli *et al.* (2022) o processo de busca pela sustentabilidade energética, em linha com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7 – Energia Limpa e Acessível e com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis, exige uma contribuição substancial das cidades.

Nesse contexto, a geração fotovoltaica (FV) distribuída contribui e se alinha a esse processo, sendo a integração entre essa tecnologia e o ambiente urbano alvo de estudos de vários pesquisadores (Cenek; Hlavacek, 2019; Formolli *et al.*, 2022; Premier, 2022; Scolari, 2019).

Em estudo de elaboração de um panorama da geração FV no Brasil, verificou-se que os sistemas de geração FV distribuída concentram-se nos grandes

centros urbanos do país (Scolari, 2019). Nesse sentido, diversos autores pesquisam dos pontos de vista arquitetônico, energético e de planejamento urbano as formas de integração da geração FV nas cidades (Abdalazeem, 2022; Cardoso, 2019; Cenek; Hlavacek, 2019; Kumar *et al.*, 2020; Vassiliades; Savvides; Buonomano; 2022; Vyas *et al.*, 2022).

Segundo Cardoso (2019), a integração de painéis FV em edificações e outras estruturas urbanas demonstra que é possível mesclar tecnologia, arquitetura e comportamento social em prol de um ambiente urbano sustentável. Rütther (2004) já citava as vantagens dessa integração:

- Adaptabilidade: pois não requerem disponibilidade de espaços extras.
- Fornecimento de energia em horários estratégicos.
- Contribuição para reduzir perdas no processo de transmissão-distribuição de energia.
- Substituição de elementos construtivos convencionais.
- Promoção da modernização do ambiente construído do ponto de vista arquitetônico e energético.
- Colaboração para a automação energética.

Cardoso (2019) acrescenta ainda que a evolução da tecnologia fotovoltaica foi fundamental para a sua disseminação no ambiente urbano. A redução dos custos de fabricação dos módulos FV vem tornando a tecnologia mais acessível, embora ainda não seja uma realidade para a maior parcela da população urbana (REN21, 2022).

Além disso, o desenvolvimento de módulos fotovoltaicos flexíveis, transparentes e com maior rendimento, por exemplo, ampliou as possibilidades de aplicação da tecnologia, possibilitando a associação desses módulos a elementos estruturais de uma edificação, como janelas, portas, sacadas, claraboias, paredes e telhados, contribuindo para uso da tecnologia no meio urbano (Cardoso, 2019).

De forma resumida apresenta-se os diferentes tipos de aplicação dos módulos fotovoltaicos no ambiente urbano no Quadro 6, salientando-se que:

- Os sistemas FV denominados *Building Applied Photovoltaic* (Sistema Fotovoltaico Aplicado a Edificação) – BAPV e *Building Integrated Photovoltaic* (Sistema Fotovoltaico Integrado a Edificação) – BIPV mesclam as

funcionalidades dos equipamentos de conversão solar FV com a infraestrutura da edificação local, sendo os mais observados no ambiente urbano (Cardoso, 2019; Nakano, 2017).

- O conjunto BAPV consiste em painéis FV aplicados à edificação já pronta, considerando, ou não, perspectivas visuais e estéticas (Cardoso, 2019). A principal aplicação desses elementos está nos telhados, com o foco na eficiência de geração de energia do painel, uma vez que, nesses espaços, a incidência de radiação solar ocorre em maior concentração (Nakano, 2017; R  ther, 2004).
- J   o sistema BIPV est   integrado aos elementos constitutivos da edifica  o desde a concep  o do projeto, tornando-se parte dos elementos estruturais da pr  pria constru  o (Kumar *et al.*, 2020).
- Por outro lado, as usinas de solo n  o s  o encontradas com frequ  ncia no ambiente urbano devido    necessidade de   rea de solo para a sua instala  o, inviabilizando sua instala  o nestes locais (Kumar *et al.*, 2020). Formolli *et al.* (2022) complementam ainda afirmando que quando grandes instala  es solares s  o planejadas no n  vel do solo, uma abordagem de projeto paisag  stico deve ser escolhida, enquanto o impacto ecol  gico deve ser reduzido pelo planejamento cuidadoso da ado  o de solu  es alternativas, como por exemplo, agrovoltaicas.

Quadro 6 – Tipos de Sistemas Fotovoltaicos Instalados no Ambiente Urbano.

Tipo de Sistema Fotovoltaico	Local de Instalação	Descrição
BAPV – <i>Building Applied Photovoltaic</i> – Sistema Fotovoltaico Aplicado a Edificação	Instalado na envoltória do edifício, no telhado, na fachada, nas janelas, nos brises, entre outros.	Os módulos fotovoltaicos são instalados em estruturas anexadas ao edifício, acompanhando a envoltória do edifício (telhado, fachada, janelas, brises, entre outros), mas não sendo um elemento estrutural do edifício. Por exemplo, um módulo fotovoltaico pode ser instalado no telhado, mas não faz parte do telhado e não desempenha função estrutural de envoltória da edificação.
BIPV – <i>Building Integrated Photovoltaics</i> – Sistema Fotovoltaico Integrado a Edificação		Os módulos fotovoltaicos são integrados aos elementos constitutivos, podendo assumir a função de algumas estruturas fundamentais como telhado, fachada, janelas, brises, entre outros. Por exemplo, um módulo fotovoltaico pode assumir a função de telhado ou de fachada, estando integrada com a edificação desde a concepção do projeto.
Usina de Solo	No solo	Os módulos fotovoltaicos são instalados em estruturas metálicas que são colocadas na superfície do solo com suporte de concreto.
Estacionamento fotovoltaico	Em áreas de estacionamento no solo.	Os módulos fotovoltaicos são instalados em estruturas metálicas com dimensões compatíveis a serem utilizadas como cobertura para automóveis em um estacionamento.
Aplicado ou Integrado à Veículo	Exterior do veículo ou em periféricos.	Os módulos fotovoltaicos são instalados ou integrados em estruturas de veículos, como vidros de janelas, teto solar, etc.
Em poste	Postes de rua.	Os módulos fotovoltaicos são fixados ou integrados aos postes, por exemplo, postes de iluminação pública.
Usina Solar Flutuante	Superfície de água.	Os módulos fotovoltaicos são montados em estruturas flutuantes.
Usina Agrovoltáica	No solo	Instalada de modo a permitir o uso simultâneo de áreas de terra para geração de energia solar fotovoltaica e agricultura.
Árvore fotovoltaica	Superfície terrestre ou postes e torres existentes.	Os módulos fotovoltaicos são montados como folhas em estruturas semelhantes a árvores.

Fonte: Adaptado de Kumar et al. (2020).

Nessa linha, Formolli *et al.* (2022) citam a importância de considerar a energia solar nos estágios iniciais de planejamento para alcançar níveis satisfatórios de integração. Para tanto, o maior nível de conhecimento de indicadores, associados

ao projeto, permite atuar sobre sua morfologia, alcançando a melhor solução em termos de ganhos energéticos, ambientais e econômicos (Formolli *et al.*, 2022).

Além disso, continuam esses autores, quando devidamente projetados, os sistemas fotovoltaicos podem atuar como elementos caracterizadores e como um material arquitetônico diferenciador capaz de valorizar a estética de toda a intervenção urbana, sendo necessário, portanto, considerá-los com um olhar interdisciplinar, para além de sua função de geração de eletricidade (Formolli *et al.*, 2022).

Essa visão interdisciplinar da geração fotovoltaica vem ao encontro do alinhamento conceitual adotado por este Relato de Tese, considerando-a como um elemento fundamental na busca pela sustentabilidade ambiental urbana em suas múltiplas dimensões. Assim, o Alinhamento Conceitual das teorias tratadas no tema em estudo e de como elas estão inter-relacionadas para embasar e justificar a consecução desta pesquisa estão descritas no Capítulo seguinte.

4 ALINHAMENTO CONCEITUAL

Este Capítulo tem a finalidade de delinear a estrutura teórica estabelecendo o viés unificador dos indicadores de sustentabilidade com os sistemas fotovoltaicos, voltado à sustentabilidade ambiental urbana e à geração distribuída de energias renováveis.

Para tanto, esses conceitos serão abordados de forma inter-relacionada de modo a alinhá-los conceitualmente tendo em vista o contexto e os objetivos desta Tese. Inicia-se o Capítulo com o delineamento teórico de Indicadores de Sustentabilidade e de Geração Distribuída de Energia Renováveis no Ambiente Urbano, finalizando-o será apresentada a proposta inicial.

4.1 INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE

Diferentes autores conceituam indicadores de forma distinta, a exemplo de Gallopín (1996), conforme abordado na Seção 2.6. Neste estudo, adotou-se o entendimento sistêmico de que:

- (i) Um indicador é uma medida que resume informações relevantes para um determinado fenômeno (Mcqueen; Noak, 1988),
- (ii) Indicadores fornecem informações qualitativas, quantitativas, estatísticas e/ou gráficas, que buscam apresentar a realidade de uma forma sistemática (Rauli; Araújo; Wiens, 2006) e
- (iii) Indicadores são “ferramentas constituídas por uma ou mais variáveis que, associadas de diversas formas, revelam significados mais amplos sobre os fenômenos a que se referem” (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2015, p. 11).

Nesse sentido, de acordo com Meadows (1998), por serem ferramentas de mudança, de aprendizado e de propaganda, a presença, a ausência ou o destaque de determinado indicador afeta o comportamento de observador em relação ao fato avaliado, no caso específico desta Tese, afeta o comportamento da comunidade científica e dos formuladores de políticas em relação à tecnologia fotovoltaica. Essa

autora complementa ainda afirmando que quando os indicadores são mal escolhidos, imprecisos, tendenciosos ou mal avaliados, eles podem causar erros de interpretação do fenômeno em análise e as decisões baseadas nestes indicadores podem não ser eficazes, levando a condutas equivocadas e super ou sub-reações ao fenômeno, evidenciando a importância da correta identificação e seleção de indicadores, etapas da proposta desta Tese.

Assim, apoiando-se nas conceituações de Gallopín (1996) e Tunstall (1992) destaca-se as seguintes funções dos indicadores já citadas: (i) Avaliação de condições e tendências, (ii) Comparação entre lugares e situações, (iii) Avaliação de condições e tendências em relação às metas e aos objetivos, (iv) Provisão de informações de advertência e (v) Antecipação de futuras condições e tendências.

Neste estudo considera-se, então, que os indicadores mais relevantes são aqueles que sintetizam as informações relevantes sobre o fenômeno observado, fazendo com que certos aspectos deste fenômeno que são pouco perceptíveis se tornem aparentes para o usuário (Gallopín, 1996), sendo que os indicadores possuem maior significado pelo que apontam do que pelo seu valor absoluto (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2015).

Nesse sentido, diversos autores indicam as características desejáveis para que um indicador seja relevante para uma determinada análise (Berliner; Brimson, 1988; Caldeira, 2018; Callado; Fensterseifer, 2010; Meadows, 1998; Neely *et al.*, 1997; Tironi *et al.*, 1991), sendo consideradas no âmbito deste estudo especialmente as seguintes: (i) Seletividade, (ii) Clareza, (iii), Representatividade, (iv) Suficiência, (v) Simplicidade, (vi) Baixo Custo, (vii) Estabilidade, (viii) Disponibilidade, (ix) Comparativo.

Van Bellen (2002) ressalta ainda a importância de se considerar a questão da multidimensionalidade da sustentabilidade ao se trabalhar com indicadores voltados a esta, ao passo que, uma vez que existem diferentes concepções a respeito das dimensões relacionadas à sustentabilidade a escolha e a utilização destas dimensões se tornam fator importante quando se avalia o grau de sustentabilidade do desenvolvimento de determinado fenômeno.

Observou-se então, por meio da leitura inicial do *corpus* de pesquisa que o tema compreendendo indicadores aplicados à sistemas fotovoltaicos é abordado de maneira interdisciplinar por vários autores da área, perpassando diferentes dimensões do campo de estudo. Ghenai, Albawab e Bettayeb (2020), Mei e Chen

(2021), Nagarkatti e Kolar (2021) e Zhan e Li (2024), por exemplo, categorizaram os indicadores de sistemas fotovoltaicos em cinco dimensões: (i) Ambiental, (ii) Econômica, (iii) Social, (iv) Recursos e (v) Tecnológica. Seguindo essa linha, essa mesma categorização foi utilizada nas etapas seguintes desta pesquisa, resultando no Quadro 14 da Seção 6.4 do Capítulo de resultados.

Na visão dos autores supracitados (Ghenai; Albawab; Bettayeb, 2020; Mei; Chen, 2021; Nagarkatti; Kolar, 2021; Zhan; Li, 2024), em síntese:

- a Dimensão Ambiental envolve aspectos relativos aos impactos ambientais do uso de determinada tecnologia de geração de eletricidade, a exemplo da emissão de gases de efeito estufa e do potencial de acidificação;
- a Dimensão Econômica engloba os elementos para a avaliação do desempenho econômico de determinada planta, como tempo de retorno e taxa interna de retorno;
- a Dimensão Social envolve componentes representativos das consequências da interação do sistema de geração de eletricidade com a sociedade, como criação de empregos e aceitabilidade social;
- a Dimensão Recursos compreende os aspectos relativos à energia gerada pelo sistema de geração, como produção de eletricidade e previsibilidade de geração;
- a Dimensão Tecnológica apresenta atributos relativos ao desempenho tecnológico específico de determinada fonte geradora, como os índices de mérito, maturidade tecnológica e operabilidade da planta.

Aprofundando a reflexão, outra consideração efetuada por Van Bellen (2002) a respeito da mensuração da sustentabilidade reside na dificuldade de utilização de uma ferramenta que capture toda a complexidade do desenvolvimento, sem reduzir a significância de cada um dos escopos utilizados no sistema. Assim sendo, observou-se, também por meio da leitura inicial do *corpus* de pesquisa, que os estudos neste campo transitam entre essas diferentes dimensões com maior ou menor intensidade, de acordo com a abrangência ou especificidade que o autor enseja (Garraín *et al.*, 2020; Ghenai; Albawab; Bettayeb, 2020; Hassan; Das; Hasan, 2022). Apesar dos estudos de maior amplitude abordarem mais dimensões do fenômeno, eles não cobrem com profundidade um determinado aspecto que é mais

bem apreciado em estudos mais específicos (Makram *et al.*, 2021; Pawliczek; Zimmermannova, 2018). Desta forma, avalia-se que, tanto um, quando o outro tipo de estudo, são importantes para construir um arcabouço teórico sobre o tema.

Por fim, Van Bellen (2002) destaca o desafio de superar as limitações implícitas na utilização de metodologia predominantemente quantitativas, pois, as diferentes dimensões da sustentabilidade com as quais o fenômeno em estudo se relaciona, não estão associadas necessariamente a grandezas físicas quantitativas. Esse autor cita como exemplo desse fenômeno a dimensão social da sustentabilidade, conquanto seja possível associar essa dimensão a indicadores quantitativos, esta associação sofre limitações em função da própria variável que se procura observar.

Nessa linha, Veleza e Ellenbecker (2000) já observavam que grande parte das metodologias de análise utiliza apenas indicadores quantitativos para mensurar o desempenho da sustentabilidade, no entanto, em muitas situações torna-se importante fazer uso de indicadores qualitativos, mesmo que isso represente uma maior subjetividade no processo de análise (Callado; Fensterseifer, 2010; Upadhyaya; Biswas; Tam, 2021).

Ciente deste desafio, utilizar-se-á neste estudo uma abordagem mista, predominantemente qualitativa, empregando-se, contudo, análise quantitativa, quando essa se fizer necessária, conforme descrito no Capítulo 5 (Creswell; Clark, 2014; Sampieri; Collado; Lúcio; 2013).

No contexto interdisciplinar do estudo da sustentabilidade, apresentado na Seção 2.1, abordado por Albino e Berardi (2012), Berardi (2013), Hajer (1995), Lajara *et al.* (2023), Martens (2006), Organização das Nações Unidas (2007), Romulo *et al.* (2024), Singh (2024) e Zeijl-Rozema *et al.* (2008), a questão energética assume um dos focos principais da discussão, levando, segundo Fonseca *et al.* (2021a), a novos paradigmas no setor energético, no qual a geração distribuída de energia renováveis surge como uma solução para promover o desenvolvimento sustentável neste.

4.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS NO AMBIENTE URBANO

Foram apresentados os novos paradigmas do setor energético segundo a concepção de Butturi *et al.* (2018), Fonseca *et al.* (2021a, 2021b), Henriques (2010), Henriques e Schnorr (2010) – na Seção 3.1, paradigmas estes impulsionados pelas crescentes preocupações com as alterações climáticas e a segurança energética.

Essa mudança necessária se assenta em três pilares principais, conforme a International Energy Agency (2019b), International Renewable Energy Agency (2018) e REN21 (2022), sendo: (i) aumento da participação de fontes renováveis de energia, (ii) aumento do uso de eletricidade de baixo carbono como forma de energia de uso final e (iii) implantação da geração distribuída de energia.

Nesse sentido, o presente estudo corrobora com Fonseca *et al.* (2021b) considerando que a geração distribuída (GD) de energias renováveis é uma alternativa adequada aos desafios expostos, uma vez que se enquadra nas características dos sistemas de energia sustentável, de acordo com Alanne e Saari (2006) e Rong e Lahdelma (2016), conforme citado na Seção 3.5 do Capítulo 3, sobretudo em: (i) custo-benefício, (ii) confiabilidade, (iii) segurança e (iv) respeito ao meio ambiente.

Conceitualmente a Geração Distribuída foi abordada na Seção 3.5, sendo caracterizada pela existência de inúmeras fontes geradoras de pequeno porte localizadas junto à unidade consumidora (UC) (Boeff, 2013). Nesse contexto, Cenek e Hlavacek (2019), Formolli *et al.* (2022), Premier (2022) e Scolari (2019) abordam a integração da Geração Distribuída Fotovoltaica no ambiente urbano, a qual contribui para o processo de descentralização da geração de energia elétrica.

Essa transição do sistema de geração de energia predominantemente centralizado para uma configuração descentralizada é defendida pela comunidade científica e pelos formuladores de políticas (Bauwens; Gotchev; Holstenkamp, 2016; Silva *et al.*, 2021). No entanto, a transição para um sistema elétrico sustentável exige uma mudança de perspectiva, considerando uma visão de sustentabilidade multidimensional e a necessidade de ação multissetorial, visão essa adotada por este estudo, fundamentando-se em Butturi *et al.* (2018) e abordada nas Seções 2.3 e 2.4.

Assim, ao incluir o viés da sustentabilidade ambiental urbana nessa discussão, a micro e a minigeração distribuída de energia (MMGD) instalada no ambiente urbano oferece a possibilidade de lidar com ineficiências no fornecimento de energia e com a dependência de combustíveis fósseis de usinas convencionais e centralizadas, estando focadas em cobrir demandas energéticas urbanas próximas ao local de geração (Fonseca *et al.*, 2021a).

Os aspectos relativos à legislação da micro e da minigeração distribuída de energia no Brasil foram apresentados na Seção 3.5, sendo regulamentada pela Resolução Normativa Nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021 da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2021) e pela sua posterior atualização na Resolução Normativa Nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023 do mesmo órgão (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2023), em que são estabelecidas as condições gerais para o acesso de microgeração e de minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, além do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE).

Destaca-se ainda que a publicação da já citada Resolução Normativa Nº 482 foi o marco inicial da disseminação da geração distribuída no Brasil, sobretudo da solar fotovoltaica, permitindo que desde os consumidores residenciais de pequeno porte até os consumidores industriais de grande porte pudessem instalar sistemas fotovoltaicos em suas próprias unidades consumidoras com reduzida burocracia de homologação (Scolari, 2019).

Contudo, a universalização da micro e minigeração distribuída ainda encontra obstáculos, principalmente em regiões vulneráveis socioeconomicamente, tendo o seu uso muitas vezes limitado devido à baixa capacidade financeira e técnica destas comunidades (Henriques, 2010).

Neste sentido, Silva *et al.* (2021) destacam os desafios que essas comunidades enfrentam para acessar a tecnologia de micro e de minigeração distribuída, como baixa renda familiar *per capita*, falta de políticas públicas, dificuldade de acesso a informações sobre GD e alto custo do sistema.

Apesar dos desafios a serem superados, Butturi *et al.* (2018) concluem afirmando que a transição para um sistema elétrico de baixa emissão e com alta participação de fontes de energia renováveis pode ser acelerada pela integração de fontes renováveis por meio da micro e minigeração distribuída no ambiente urbano.

Esse processo de transição energética carece, no entanto, de processos sistemáticos de apoio à decisão e de indicadores adequados uma vez que a tomada

de decisões conscientes depende da obtenção de informações estratégicas baseadas em avaliações robustas e dados precisos (Empresa de Pesquisa Energética, 2015; Moreira *et al.*, 2024).

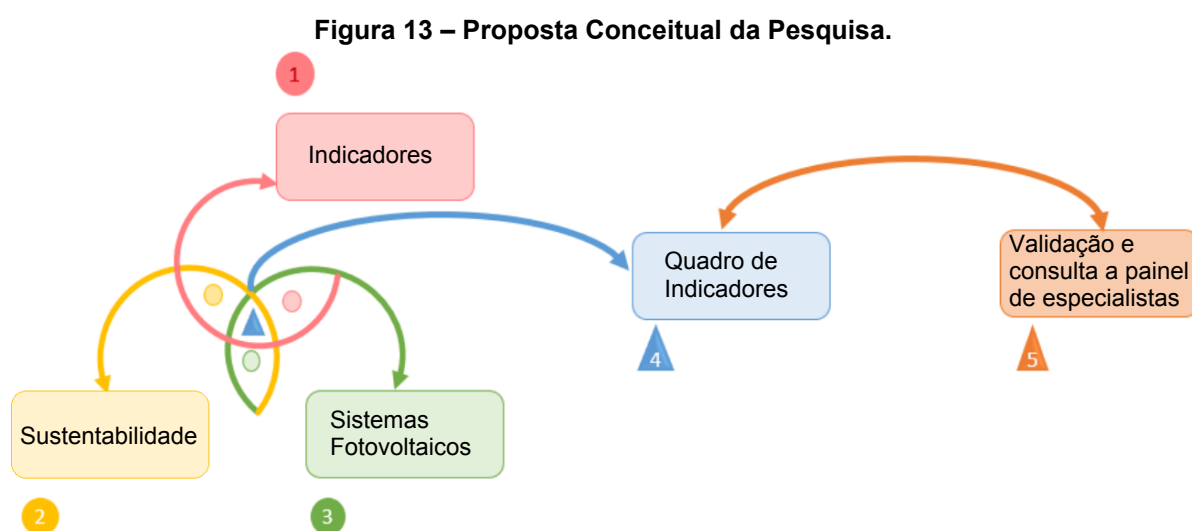
Assente nos elementos direcionadores infere-se, portanto, a tese de que: Indicadores de sustentabilidade, quando corretamente propostos, podem avaliar a sustentabilidade de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica nas diversas dimensões da sustentabilidade, conforme apostado na Seção 1.3.

Para tanto, a proposta conceitual desta pesquisa é composta por cinco etapas. As três primeiras (etapas 1, 2 e 3) formam uma análise em triangulação - a partir de uma revisão sistemática da literatura - dos elementos alicerçadores dessa tese: (1) indicadores, (2) sustentabilidade e (3) sistemas fotovoltaicos.

A partir dessa análise, a próxima etapa (4) é a criação – por meio de uma análise sistemática – de um quadro de indicadores de sustentabilidade para sistemas fotovoltaicos. Por último, na etapa 5, o quadro de indicadores será validado e submetido a um painel de especialistas da área.

Assim, um conjunto de indicadores neste escopo, cerne da proposta desta tese, constitui-se então como uma ferramenta que propicia um diagnóstico sobre o tema, subsidiando o processo de tomada de decisão da comunidade científica e de formuladores de políticas.

As cinco etapas da proposta conceitual estão representadas na Figura 13.



Fonte: Autoria própria (2024).

Assim, tendo visto a exposição apresentada, a partir das delimitações iniciais, da revisão da literatura e deste alinhamento conceitual, apresenta-se a seguir os procedimentos metodológicos da pesquisa.

5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS DA PESQUISA

Nesse Capítulo serão apresentados os procedimentos metodológicos utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa, descrevendo aspectos relativos à classificação da pesquisa, ao seu planejamento e ao seu desenvolvimento, descrevendo as técnicas utilizadas e os procedimentos de coleta e de tratamento de dados adotados. Assim, neste Capítulo é tecida a base metodológica em relação aos procedimentos e à operacionalização da pesquisa.

5.1 CLASSIFICAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Segundo Sampieri, Collado e Lúcio (2013, p. 30), a pesquisa científica é “um conjunto de processos sistemáticos, críticos e empíricos aplicados no estudo de um fenômeno”. Deste modo, com o intuito de atingir os objetivos desse estudo, o delineamento de métodos, de técnicas e de procedimentos se faz necessário, fornecendo as bases lógicas à investigação científica (Creswell; Clark, 2014; Gil, 2002; Marconi; Lakatos, 2003; Sampieri; Collado; Lúcio; 2013).

Os critérios para a classificação dos tipos de pesquisa variam de acordo com o enfoque dado pelo autor desta (Marconi; Lakatos, 2002), sendo utilizado neste estudo, sobretudo as definições e as classificações de Sampieri, Collado e Lúcio (2013).

Seguindo a classificação desses autores, esta pesquisa possui um enfoque predominantemente qualitativo, utilizando-se de coleta de dados, não necessariamente numéricos, para descobrir ou aprimorar perguntas de pesquisa no processo de interpretação, fazendo uso, todavia, de análise quantitativa, quando necessária (Sampieri; Collado; Lúcio; 2013). Dessa ótica, esta pesquisa tem, portanto, uma abordagem mista na visão de Creswell e Clark (2014), considerando-se uma perspectiva sistêmica.

Classifica-se o alcance da pesquisa como: (i) exploratório, por examinar um tema ou um problema de pesquisa pouco estudado, fato já demonstrado no Capítulo 1 e que será reforçado na Seção 5.3; e sequencialmente (ii) descritivo, uma vez que se busca especificar as propriedades e as características do fenômeno de análise,

por meio da coleta de informações de maneira independente sobre os conceitos ou as variáveis a que se referem (Sampieri; Collado; Lúcio; 2013).

O plano de ação se dá no campo não experimental, uma vez que o fenômeno de estudo é observado e analisado sem a manipulação deliberada de variáveis; além disso, a dimensão temporal utilizada é de natureza transversal, pois o recorte temporal de coleta de dados do estudo é bem definido (Sampieri; Collado; Lúcio; 2013).

O delineamento do desenho metodológico da pesquisa é apresentado na Matriz de Consistência – Figura 14 – a partir da qual se recupera desde a questão de pesquisa, a tese e os objetivos, já apresentados no Capítulo 1, até os elementos metodológicos desta.

Figura 14 – Matriz de Consistência.

Matriz de Consistência	
Questão de Pesquisa	Enfoque da Pesquisa
Quais indicadores podem ser usados para avaliação da sustentabilidade de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, considerando-se as várias dimensões da sustentabilidade?	Misto, predominantemente Qualitativo, com uso de tratamento Quantitativo quando necessário.
Tese	Alcance da Pesquisa
Indicadores de sustentabilidade, quando corretamente propostos, podem avaliar a sustentabilidade de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica nas diversas dimensões da sustentabilidade.	Exploratório e Descritivo.
Objetivo Geral	Plano de Ação
Propor um conjunto de indicadores para avaliação da sustentabilidade de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.	Não experimental e Transversal.
Objetivos Específicos	Método de Coleta de Dados
OE1 - Selecionar indicadores para a elaboração de um quadro referencial de Indicadores de Sustentabilidade para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, considerando-se as variáveis da dimensão da sustentabilidade ambiental urbana.	Levantamento Bibliográfico e Revisão Sistemática da Literatura.
OE2 - Validar os Indicadores de Sustentabilidade por meio de consulta a painel de especialistas.	Método de Análise de Dados
OE3 - Elaborar o Quadro Referencial de Indicadores a partir da validação efetuada.	Análise Sistemática.
	Método de Validação de Dados
	Avaliação descritiva e consulta a painel de especialistas por meio de aplicação de questionário.

Fonte: Autoria própria (2024).

Uma vez descritos os principais elementos metodológicos da pesquisa, na Seção seguinte serão apresentadas as etapas da pesquisa, que foram baseadas no paradigma epistemológico da *Design Science* (Dresch; Lacerda; Antunes Jr., 2015; Simon, 1996), igualmente explicitada.

5.2 ETAPAS E PROTOCOLO DA PESQUISA

Considerando que a transdisciplinaridade – característica fulcral deste estudo – tem estrutura teórica própria e métodos de pesquisa específicos, nos quais as ciências tradicionais podem apresentar limitações (Gibbons *et al.*, 1994; Starkey; Madan, 2001; Van Aken, 2004, 2005), paradigmas epistemológicos adequados devem ser utilizados durante a condução deste estudo.

Neste contexto, o paradigma epistemológico adotado para a elaboração do presente estudo é o da *Design Science*, proposta por Simon (1996). Não tendo como objetivo precípua descobrir leis naturais ou universais que expliquem o comportamento do objeto de estudo, a *Design Science* objetiva, segundo Dresch, Lacerda e Antunes Jr. (2015, p. 57), desenvolver “soluções para melhorar sistemas existentes, resolver problemas, ou, ainda, criar novos artefatos que contribuam para uma melhor atuação humana”.

Segundo Dresch, Lacerda e Antunes Jr. (2015), a *Design Science Research* é um método de pesquisa que fundamenta e operacionaliza uma pesquisa conduzida sob o paradigma da *Design Science*, sendo orientada à solução de problemas específicos, não almejando obrigatoriamente a solução ótima, mas sim, uma solução satisfatória para o problema.

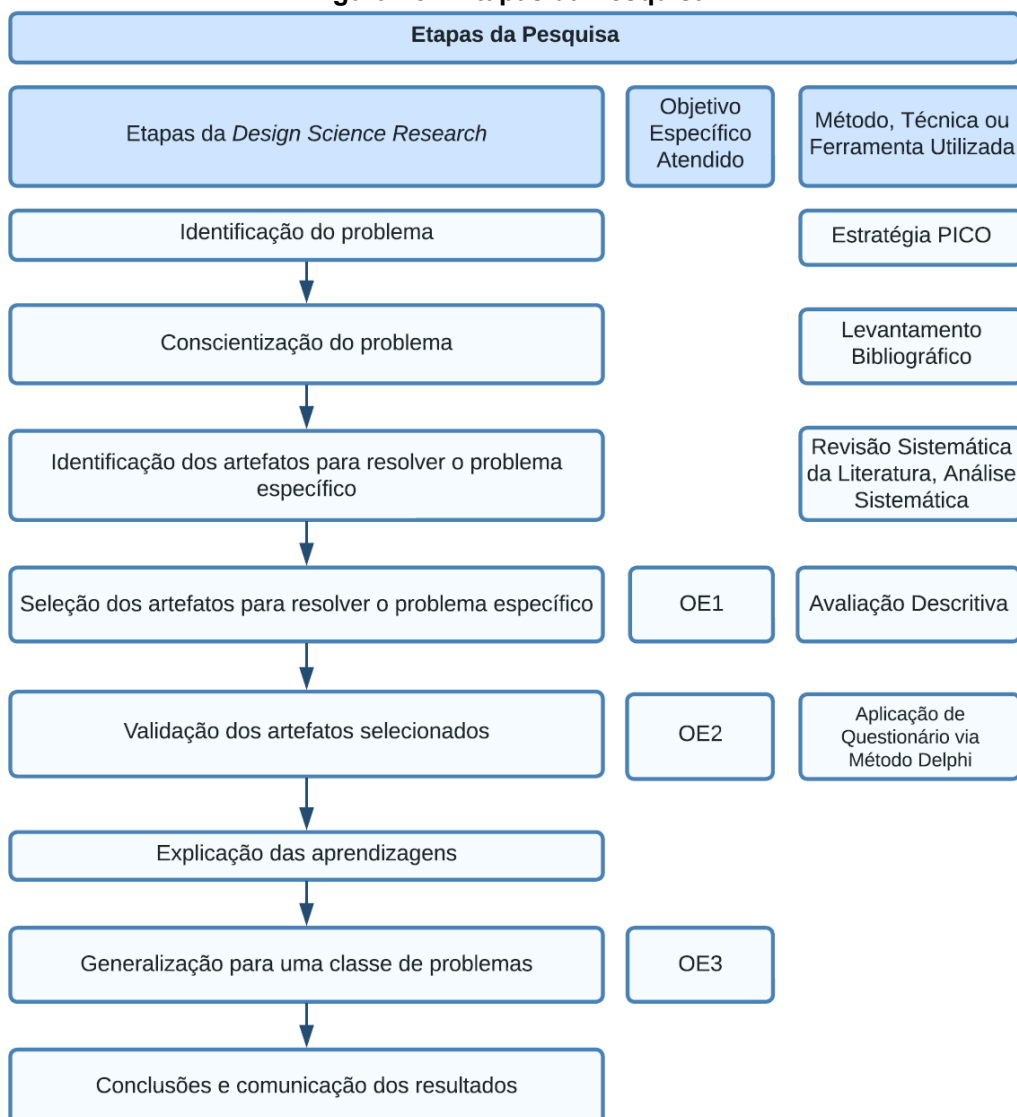
Além disso, segundo esses mesmos autores, a *Design Science* é adequada para a condução de pesquisas transdisciplinares do chamado tipo 2, proposto por Gibbons *et al.* (1994), que são pesquisas “caracterizadas pela transdisciplinaridade e pela heterogeneidade, [...] socialmente responsáveis e reflexivas, além de considerarem um campo amostral amplo e heterogêneo, colaborando, assim, em um problema definido dentro de um contexto específico e localizado”, o que difere do conhecimento de tipo 1, que possui um viés puramente acadêmico “apoiado em uma

única disciplina e caracterizado pelo homogeneidade” (Gibbons *et al.*, 1994, p. 3 – tradução nossa).

Assim, da óptica transdisciplinar, e apoiado no já citado modelo de Gibbons *et al.* (1994), o presente estudo tem a pretensão de produzir conhecimento do tipo 2, ou seja, utilizar-se da transdisciplinaridade para a resolução de problemas, o que atende, igualmente aos propósitos da pesquisa aplicada (Gil, 2002).

As etapas da pesquisa estão representadas na Figura 15, orientadas pelos preceitos da *Design Science Research* e adaptadas para este estudo, partindo-se da etapa de identificação e conscientização do problema, passando pela identificação, pela seleção e pela validação a partir da aplicação de um questionário a um painel de especialistas, finalizando pela explicação, generalização e conclusões a respeito dos resultados obtidos.

Figura 15 – Etapas da Pesquisa.



Fonte: Adaptado de Dresch, Lacerda e Antunes Jr. (2022).

Cabe apresentar também o protocolo de pesquisa para cada um dos objetivos específicos, indicando o método, a técnica ou a ferramenta utilizada e a referência metodológica utilizada da literatura, conforme o Quadro 7.

Quadro 7 – Protocolo de Pesquisa

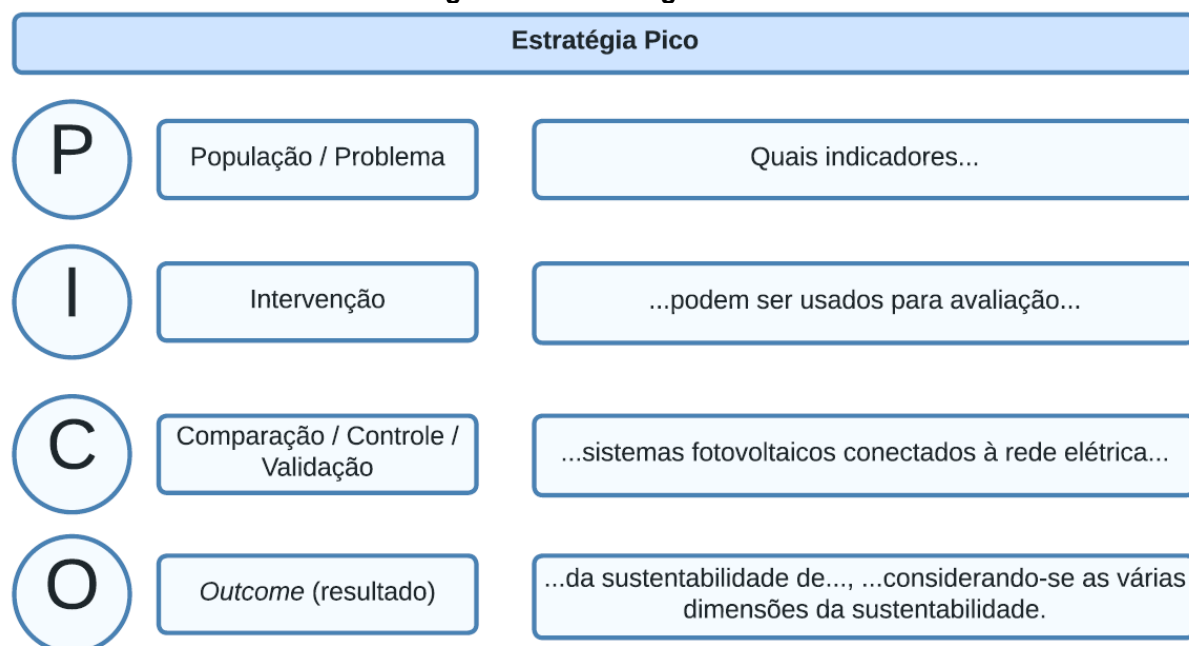
Objetivo Específico 1: Selecionar indicadores para a elaboração de um quadro referencial de Indicadores de Sustentabilidade para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, considerando-se as variáveis da dimensão da sustentabilidade ambiental urbana.
Método, Técnica ou Ferramenta Utilizada: Revisão Sistemática da Literatura, Análise Sistemática e Avaliação Descritiva.
Referências Metodológicas: Dresch, Lacerda e Antunes Jr. (2015), Hevner <i>et al.</i> (2004) e Page <i>et al.</i> (2021).
Objetivo Específico 2: Validar os Indicadores de Sustentabilidade por meio de consulta a painel de especialistas.
Método, Técnica ou Ferramenta Utilizada: Aplicação de questionário pelo método Delphi.
Referências Metodológicas: Antunes (2014), Echeverría e Hott (1990), Estévez e Gallastegui (2005), Linstone e Turoff (1975), Marconi e Lakatos (2002) e Santoyo (2011).
Objetivo Específico 3: Elaborar o Quadro Referencial de Indicadores a partir da validação efetuada.
Método, Técnica ou Ferramenta Utilizada: Generalização por meio de raciocínio indutivo.
Referências Metodológicas: Dresch, Lacerda e Antunes Jr. (2015) e Sampieri, Collado e Lúcio (2013).

Fonte: Autoria própria (2024).

Detalha-se, sequencialmente, o processo de formulação da Questão de Pesquisa, já apresentada no Capítulo 1 e que seguiu a Estratégia PICO. Tendo origem em pesquisas de áreas da saúde, segundo Santos, Pimenta e Nobre (2007), mas podendo ser utilizada para construir questões de pesquisa de naturezas diversas, a estratégia PICO é um acrônimo para representar os elementos fundamentais da questão de pesquisa: (i) **P**roblema, (ii) **I**ntervenção, (iii) **C**omparação e (iv) **O**utcomes (desfecho, resultado).

A decomposição da Questão de Pesquisa deste trabalho nos quatro componentes PICO está ilustrada na Figura 16.

Figura 16 – Estratégia PICO.



Fonte: Autoria própria (2024).

Ainda segundo Santos, Pimenta e Nobre (2007), uma pergunta de pesquisa bem construída contribui para o desenvolvimento da Revisão Sistemática da Literatura, uma vez que ela subsidia a escolha consciente das palavras-chaves, de modo a focar no escopo da pesquisa, evitando assim a realização de buscas desnecessárias e maximizando a recuperação de informações relevantes nas bases de dados.

Nesta linha, a escolha das palavras-chaves, e consequentemente dos descritores que direcionaram a Revisão Sistemática da Literatura, descrita na Seção seguinte, foi efetuada com base na decomposição da questão de pesquisa nos quatro componentes PICO, resultando das seguintes principais palavras-chave: (i) sistemas fotovoltaicos, (ii) indicadores e (iii) sustentabilidade.

Desta forma, sendo um elemento importante na condução da *Design Science Research* (Dresch; Lacerda; Antunes Jr., 2015), a Revisão Sistemática da Literatura – RSL, será descrita na Seção seguinte.

5.3 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Nesta Seção serão detalhados os procedimentos e os parâmetros de pesquisa da Revisão Sistemática da Literatura – RSL, incluindo a descrição das etapas da RSL, a definição dos descritores, a formulação da estratégia de busca e a apresentação dos resultados.

Cabe destacar que o método de coleta de dados utilizado neste estudo se deu por meio de pesquisa bibliográfica. Mais especificamente, a coleta de dados foi efetuada por meio da própria Revisão Sistemática da Literatura que será descrita nas Subseções seguintes.

Para Van Aken (2011), uma revisão sistemática da literatura pode ajudar a identificar soluções para determinada classe de problema, além de identificar lacunas na literatura existente. Galvão, Pansani e Harrad (2015, p. 1) e Page *et al.* (2021) complementam conceituando que uma revisão sistemática é uma “revisão de uma pergunta formulada de forma clara, que utiliza métodos sistemáticos e explícitos para identificar, selecionar e avaliar criticamente pesquisas relevantes, e coletar e analisar dados destes estudos que são incluídos na revisão”.

Nesta linha, Dresch, Lacerda e Antunes Jr. (2015) afirmam que uma RSL oferece importantes benefícios à pesquisa, pois proporciona uma visão abrangente e robusta do tema de estudo, mantendo os pesquisadores a par do que tem sido estudado em suas áreas de interesse e resultando em uma melhor interpretação dos resultados tendo o arcabouço da literatura como base.

Dresch, Lacerda e Antunes Jr. (2015) destacam ainda que não há um único método para a realização de uma revisão sistemática da literatura, ao passo que oferecem uma sugestão de protocolo voltado a revisões sistemáticas com fins acadêmicos, que pode inclusive, ser adaptado a revisões com outras finalidades, segundo estes autores.

Desta forma, adequando-se às necessidades desse estudo, a revisão sistemática da literatura foi conduzida adaptando-se os métodos e os protocolos de pesquisa propostos por Dresch, Lacerda e Antunes Jr. (2015) e por Page *et al.* (2021). As etapas do protocolo de pesquisa adotado são ilustradas na Figura 17.

Figura 17 – Protocolo da Revisão Sistemática da Literatura.

Protocolo da Revisão Sistemática da Literatura		
Etapas	Parâmetro	Detalhamento
Planejamento	Tema da Revisão Sistemática	Indicadores de sustentabilidade aplicados a sistemas fotovoltaicos conectados a rede elétrica
	Questão da Revisão Sistemática	Quais indicadores podem ser usados para avaliação da sustentabilidade de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, considerando-se as várias dimensões da sustentabilidade?
Definição	Recorte Temporal	Publicações dos últimos 5 anos (2018-2022)
	Idiomas	Português e Inglês
	Amplitude da revisão	Revisão Configurativa
	Extensão da busca	Estratégia de Saturação
Busca	Palavras-chave	A - Sistemas Fotovoltaicos [<i>Photovoltaic Systems</i>] B - Indicadores [<i>Indicators</i>] C - Sustentabilidade [<i>Sustainability</i>]
	Descritores	A - Fotovoltaico, Fotovoltaicos, Fotovoltaica, Fotovoltaicas, Energia Solar [<i>Photovoltaic, Photovoltaics, Solar Energy</i>] B - Indicadores, Indicador, Índices, Índice [<i>Indicators, Indicator, Indexes, Index</i>] C - Sustentabilidade, Sustentável, Sustentáveis [<i>Sustainability, Sustainable, Sustainables</i>]
	Campos de Busca	Título, Resumo e Palavras-chave
	Tipos de Publicação	Artigos periódicos, capítulos de livros, livros, artigos de eventos científicos, teses e dissertações
	Bases de Dados	SciELO (Scientific Electronic Library Online), BDTD (Biblioteca Digital de Teses e Dissertações), Scopus (Elsevier) e Web of Science (Coleção Principal – Clarivate Analytics)
Resultados	Triagem dos Resultados	Exclusão de documentos duplicados e verificação de alinhamento aos objetivos do estudo
	Análise dos Resultados	Análise Sistemática

Fonte: Adaptado de Dresch, Lacerda e Antunes Jr. (2022) e Page et al. (2021)

Uma vez apresentado o protocolo de pesquisa, na Subseção seguinte serão detalhados os seus diversos parâmetros, de modo a possibilitar a replicação dos resultados obtidos.

5.3.1. Parâmetros de Pesquisa

Segundo Brizola e Fantin (2017), os parâmetros de pesquisa da RSL, que incluem definições a respeito da sua amplitude, de seus critérios de inclusão e exclusão, da sua estratégia de busca e de suas fontes de busca são definidos pelo tipo de questão que se pretende responder. Dresch, Lacerda e Antunes Jr. (2015) complementam conceituando que questão abertas, que objetivam explorar um tema de forma abrangente são mais bem respondidas com uma revisão configurativa, em oposição à revisão agregativa, que se visa responder questões fechadas e testar teorias.

Neste sentido, pretendeu-se efetuar uma revisão configurativa, na qual buscam-se estudos primários heterogêneos, que são explorados e interpretados resultando em “uma renderização teórica coerente” (Dresch; Lacerda; Antunes Jr., 2015, p. 147). Para isso, utilizou-se uma estratégia de busca de saturação, que objetiva localizar estudos primários suficientes para uma configuração coerente do tema de interesse. Deste modo, a busca foi por novos materiais, e esta se estendeu até o momento em que os resultados não mais contribuíssem com novos conceitos para o processo de síntese em tela (Brunton *et al.*, 2012; Dresch; Lacerda; Antunes Jr., 2015).

A etapa de consulta inicial da RSL foi efetuada em agosto de 2022 nas seguintes bases de dados: (i) SciELO (Scientific Electronic Library Online), (ii) BDTD (Biblioteca Digital de Teses e Dissertações), (iii) Scopus (Elsevier) e (iv) Web of Science (Coleção Principal – Clarivate Analytics). Entre as diversas bases de dados disponibilizadas pelo portal de periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, estas foram escolhidas pela grande quantidade de itens indexados revisados por pares em cada uma delas e por oferecerem uma visão geral abrangente da produção mundial em diferentes áreas de pesquisa, tornando assim a pesquisa abrangente o suficiente para abordar os temas em

questão de forma interdisciplinar com a profundidade e a amplitude necessárias e minimizando vieses de pesquisa.

O recorte temporal utilizado foi de itens de informação publicados nos últimos 5 anos, compreendendo o período de 2018 até 2022, uma vez que a busca foi efetuada em primeira execução em agosto de 2022, com última atualização em julho de 2024. Os idiomas utilizados foram o português e o inglês. Foram considerados os seguintes tipos de publicação: (i) artigos em periódicos, (ii) capítulos de livros, (iii) livros, (iv) artigos de eventos científicos, (v) teses e (vi) dissertações.

Uma vez caracterizados os parâmetros de busca, será detalhado, na Seção seguinte, o processo de definição das palavras-chave e dos descritores.

5.3.2. Definição das Palavras-chave e dos Descritores

Como já citado, a definição das palavras-chave foi subsidiada pela decomposição da questão de pesquisa nos quatro componentes PICO. Deste modo, buscou-se por meio de uma revisão sistemática da literatura abordar o estado da arte sobre indicadores de sustentabilidade aplicados a sistemas fotovoltaicos; além de verificar a existência de estudos abordando os três grandes temas de Tese simultaneamente: (i) sistemas fotovoltaicos, (ii) indicadores e (iii) sustentabilidade.

Com o intuito de ampliar a pesquisa para bases internacionais e recuperar uma quantidade de documentos adequada para o estudo, optou-se, como já citado, por efetuar a RSL tanto no idioma português quanto no idioma inglês, sendo as palavras-chave versadas para a língua inglesa: (i) *photovoltaic systems*, (ii) *indicators* e (iii) *sustainability*.

Cada um dos temas relativos às palavras-chaves definidas possui diversos descritores possíveis, não existindo um tesouro com um termo único amplamente difundido, podendo assim, este apresentar-se de diversas formas. Na tentativa de minimização de viés na estratégia de busca, Dresch, Lacerda e Antunes Jr. (2015) ressaltam a importância de, além de efetuar a busca pelos termos principais, efetuar também incluindo sinônimos, diferentes grafias e expressões similares, o que se assemelha a estabelecer possíveis descritores.

Seguindo esta orientação, a escolha dos descritores foi efetuada utilizando-se de teste de aderência que considerou diversos descritores para cada termo principal (Dresch; Lacerda; Antunes Jr., 2015). Segundo Ruthes e Silva (2015), o teste de aderência permite averiguar de forma quantitativa a pertinência do termo, mensurando o retorno de cada descritor quando pesquisado nas ferramentas de busca das bases de dados. Nesta etapa foram realizados testes para os três grupos de descritores isoladamente, que resultaram nos dados apresentados na Tabela 4, sendo que R% significa a representação percentual do descritor em relação ao total.

Tabela 4 – Teste de Aderência dos Descritores.

Palavra-chave / keyword		Descritores	R%			
			Scielo	BDTD	Scopus	Web of Science
A	Sistemas Fotovoltaicos	Fotovoltaico	18%	22%	----	----
		Fotovoltaicos	20%	22%	----	----
		Fotovoltaica	25%	22%	----	----
		Fotovoltaicas	11%	22%	----	----
		Energia Solar	27%	12%	----	----
		Total	100%	100%	----	----
	<i>Photovoltaic Systems</i>	<i>Photovoltaic</i>	----	----	38%	60%
		<i>Photovoltaics</i>	----	----	40%	14%
		<i>Solar Energy</i>	----	----	21%	26%
		Total	----	----	100%	100%
B	Indicadores	Indicadores	29%	25%	----	----
		Indicador	7%	25%	----	----
		Índices	16%	25%	----	----
		Índice	47%	25%	----	----
		Total	100%	100%	----	----
	<i>Indicators</i>	<i>Indicators</i>	----	----	13%	18%
		<i>Indicator</i>	----	----	13%	11%
		<i>Indexes</i>	----	----	37%	7%
		<i>Index</i>	----	----	37%	64%
		Total	----	----	100%	100%
C	Sustentabilidade	Sustentabilidade	53%	58%	----	----
		Sustentável	36%	30%	----	----
		Sustentáveis	12%	12%	----	----
		Total	100%	100%	----	----
	<i>Sustainability</i>	<i>Sustainability</i>	----	----	32%	35%
		<i>Sustainable</i>	----	----	68%	65%
		Total	----	----	100%	100%

Fonte: Autoria própria (2024).

O objetivo desta busca inicial é conhecer o tamanho do universo dos temas pesquisados, de modo que a definição dos descritores utilizados para cada palavra-chave seja efetuada com o embasamento adequado. Nessa etapa inicial foram utilizados os mesmos parâmetros de pesquisa e bases de dados utilizadas na RSL já descritas no Item 5.3.1. Assim, dessa busca inicial, formaram-se conjuntos de descritores para cada palavra-chave, tanto para na Língua Portuguesa quanto na Língua Inglesa, conforme observa-se no Quadro 8.

Quadro 8 – Resumo das Palavras-Chave e de seus Respectivos Descritores

Palavra-chave / keyword		Conjuntos de Descritores
A	Sistemas Fotovoltaicos	Fotovoltaico, Fotovoltaicos, Fotovoltaica, Fotovoltaicas, Energia Solar
	<i>Photovoltaic Systems</i>	<i>Photovoltaic, Photovoltaics, Solar Energy</i>
B	Indicadores	Indicadores, Indicador, Índices, Índice
	<i>Indicators</i>	<i>Indicators, Indicator, Indexes, Index</i>
C	Sustentabilidade	Sustentabilidade, Sustentável, Sustentáveis
	<i>Sustainability</i>	<i>Sustainability, Sustainable</i>

Fonte: Autoria própria (2024).

O resultado da busca simples efetuada com os descritores selecionados em cada uma das bases de dados no idioma inglês e no idioma português está representado na Tabela 5, sendo possível efetuar importantes ponderações sequenciais a respeito da escolha dos descritores utilizados, o que contribuirá para atestar a originalidade, a pertinência e as lacunas existentes do tema em estudo.

Tabela 5 – Pesquisa Individual pelos Descritores.

Palavra-chave / keyword		Descritores	Resultados			
			Scielo	BDTD	Scopus	Web of Science
A	Sistemas Fotovoltaicos	Fotovoltaico	10	841	----	----
		Fotovoltaicos	11	841	----	----
		Fotovoltaica	14	841	----	----
		Fotovoltaicas	6	841	----	----
		Energia Solar	15	471	----	----
	<i>Photovoltaic Systems</i>	<i>Photovoltaic</i>	----	----	78.715	58.731
		<i>Photovoltaics</i>	----	----	81.371	14.021
		<i>Solar Energy</i>	----	----	42.432	25.382
B	Indicadores	Indicadores	1.519	35.662	----	----
		Indicador	371	35.662	----	----
		Índices	845	35.662	----	----
		Índice	2.446	35.662	----	----
	<i>Indicators</i>	<i>Indicators</i>	----	----	281.901	162.790
		<i>Indicator</i>	----	----	281.901	100.683
		<i>Indexes</i>	----	----	774.377	59.687
		<i>Index</i>	----	----	774.377	563.646
C	Sustentabilidade	Sustentabilidade	453	7.503	----	----
		Sustentável	306	3.837	----	----
		Sustentáveis	100	1.511	----	----
	<i>Sustainability</i>	<i>Sustainability</i>	----	----	147.077	120.567
		<i>Sustainable</i>	----	----	307.121	222.784

Fonte: Autoria própria (2024).

Destaca-se, em primeiro lugar, que a pesquisa com descritores de maior revocação revela o tamanho do universo de cada um dos temas pesquisados; por exemplo, a busca pelo termo *Photovoltaic* encontrou 78.715 documentos na Base de Dados Scopus, enquanto os descritores *Indicators* e *Sustainable* retornaram respectivamente 281.901 e 307.121 resultados na mesma base, revelando a pertinência e atualidade dos temas.

Em segundo lugar, essa pesquisa serve de parâmetro para comparar os bancos de dados em relação ao número de resultados obtidos, de modo a verificar se os temas pesquisados se encontram efetivamente no escopo dos periódicos indexados por elas. Assim, para os mesmos descritores citados anteriormente, a base de dados Web of Science encontrou 58.731, 162.790 e 222.784 resultados respectivamente, valores próximos aos obtidos na Scopus e superiores aos obtidos

nas bases em português (SciELO e BDTD). Constatou-se a carência desses conteúdos no idioma português quando comparado ao idioma inglês: a pesquisa na base de dados Scielo retornou, respectivamente 10 resultados para o termo Fotovoltaico, 1.519 resultados para o termo Indicadores e 453 resultados para o termo Sustentabilidade, indicando uma possível lacuna compatível com a necessária ampliação de pesquisas em âmbito nacional.

A busca indica também que todos os descritores pesquisados (ver a Tabela 5 e o Quadro 8) são empregados em algum momento e em algum contexto por vários autores diferentes, podendo-se afirmar que eles representam os temas de estudo.

Apesar de os descritores escolhidos gerarem alta revocação na busca simples, observa-se por outro lado um baixo retorno na pesquisa combinada. Deste modo, justamente por terem uma alta revocação a busca combinada destes descritores, que será abordada na Subseção seguinte, se encarregará de direcionar e contextualizar a pesquisa dentro da abordagem pretendida, visando obter tanto precisão quanto revocação satisfatórias da estratégia de busca para atender aos objetivos pretendidos com a Revisão Sistemática da Literatura.

Acrescenta-se ainda que foram eliminados das buscas os termos abreviados, pois se espera que quando um autor utiliza um termo abreviado seja no título, nas palavras-chaves ou no resumo, ele descreve o termo por extenso também em algum destes campos, de forma que a versão por extenso vai aparecer na busca pretendida, na percepção do autor desta tese. Infere-se que outros dois motivos para se eliminar as abreviações são que os termos abreviados podem ter outro significado em outras áreas, e que algumas bases de dados não conseguem efetuar uma busca precisa utilizando-se termos de apenas dois caracteres, como é o caso do BDTD.

Depois de cumpridas as etapas anteriores, definidos os parâmetros de busca e selecionados os descritores, foi efetuada a consulta nas bases de dados propriamente dita, conforme será detalhado na Subseção seguinte.

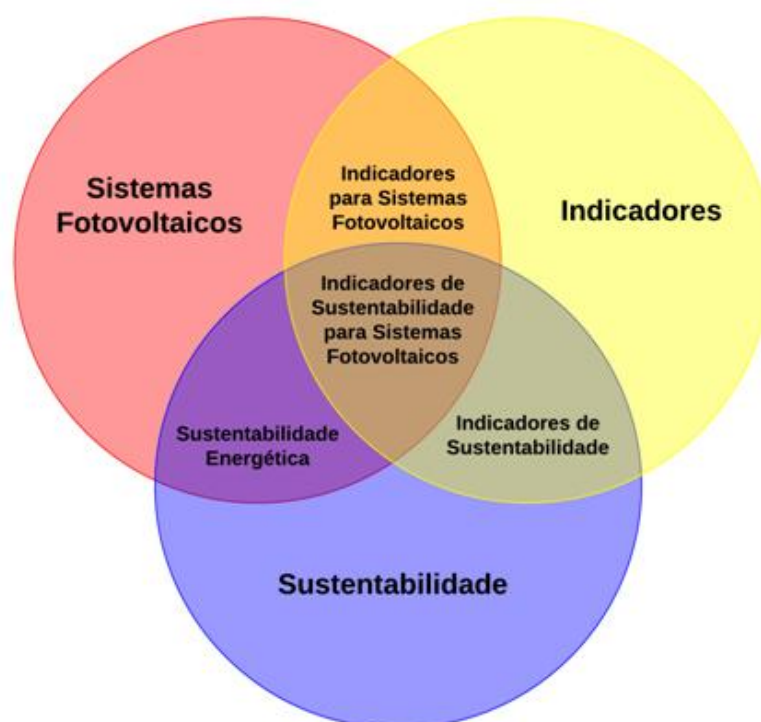
5.3.3. Busca Simples e Busca Combinada

A etapa de consulta nas bases de dados iniciou-se com a busca simples pelos grupos de descritores nas bases de dados. Observou-se que os resultados obtidos nessa busca possuem grande revocação, porém baixa precisão em relação ao tema de estudo, o que já era esperado, uma vez que a consulta individual pelos descritores, já detalhada na Subseção anterior apresentou o mesmo comportamento.

A busca torna-se mais precisa quando se utiliza termos associados em estratégias de busca (Guedes, 2022). Desta forma, foi realizada uma busca combinada dos grupos de descritores, utilizando-se de operadores lógicos booleanos (“AND” e “OR”), formando uma estratégia única de busca para pesquisa em todas as bases de dados elencadas.

A busca combinada pressupõe a intercessão de todos os grupos de descritores, indicando que os temas centrais do estudo – Sistemas Fotovoltaicos, Indicadores e Sustentabilidade – devem aparecer em todos os documentos recuperados, conforme representando no diagrama da Figura 18.

Figura 18 – Diagrama representativo da combinação dos temas de interesse da RSL.



Fonte: Autoria própria (2024)

A estratégia de busca deve ser representada por meio de uma linha de comando única, escrita utilizando elementos de sintaxe de tal modo que inclua todos os parâmetros adotados na pesquisa (Guedes, 2022). Desta forma, propicia-se à RSL o caráter reprodutível, ou seja, a mesma linha de comando pode ser utilizada por outros pesquisadores para conferir os resultados encontrados.

No entanto, como cada base de dados possui uma sintaxe de busca diferente, será apresentada a estratégia específica para cada uma das bases consultadas:

- **Scopus:** (TITLE-ABS-KEY (("Photovoltaic" OR "Photovoltaics" OR "Solar Energy")) AND TITLE ("Indicators" OR "Indicator" OR "Indexes" OR "Index") AND TITLE-ABS-KEY ("Sustainability" OR "Sustainable")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2022) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018)) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English") OR LIMIT-TO (LANGUAGE , "Portuguese"))
- **Web of Science:** (TS=(("Photovoltaic" OR "Photovoltaics" OR "Solar Energy")) AND TI=(("Indicators" OR "Indicator" OR "Indexes" OR "Index")) AND TS=(("Sustainability" OR "Sustainable"))) AND (PY==("2018" OR "2019" OR "2020" OR "2021" OR "2022") AND LA==("ENGLISH" OR "PORTUGUESE"))
 - Search in: Web of Science Core Collection
 - Collections: All
 - Exact search: Yes
- **Scielo:** ("Fotovoltaico" OR "Fotovoltaicos" OR "Fotovoltaica" OR "Fotovoltaicas" OR "Energia Solar") AND (ti:("Indicadores" OR "Indicador" OR "Índices" OR "Índice")) AND ("Sustentabilidade" OR "Sustentável" OR "Sustentáveis") AND in:* AND la:("pt" OR "en") AND year_cluster:("2018" OR "2019" OR "2020" OR "2021" OR "2022")
- **BDTD:** (Todos os campos:"Fotovoltaico" OR "Fotovoltaicos" OR "Fotovoltaica" OR "Fotovoltaicas" OR "Energia Solar" E Título:"Indicadores" OR "Indicador" OR "Índices" OR "Índice" E Todos os campos:"Sustentabilidade" OR "Sustentável" OR "Sustentáveis")
 - Selecionar manualmente o período de pesquisa: 2018 até 2022.

Deste modo, a estratégia de busca foi estruturada tendo em mente o alinhamento com o tema de estudo e visando obter tanto precisão quanto revocação satisfatórias. Observa-se nas linhas de comando que os grupos de descritores “A – Sistemas Fotovoltaicos” e “C – Sustentabilidade” foram pesquisados no título, nas palavras-chave e no resumo dos documentos, enquanto o grupo de descritores “B – Indicadores” foi pesquisado somente no título. Essa escolha foi efetuada após diversas simulações, nas quais buscou-se o já citado e almejado equilíbrio entre revocação e precisão, pois quando o grupo de descritores B é pesquisado também nas palavras-chave e no resumo, muitos dos resultados obtidos não tem correlação com o tema de estudo. Além disso, todos os termos foram pesquisados entre aspas, para que o resultado retorne somente artigos com o termo exato.

Uma vez definida a estratégia de busca, reitera-se que a etapa de consulta nas bases de dados foi efetuada em primeira execução em agosto de 2022, com última atualização em julho de 2024, conforme já mencionado, e a quantidade de documentos obtidos em cada base por meio da busca simples pelos grupos de descritores, assim como da busca combinada encontra-se na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados Obtidos na Pesquisa Simples e Combinada em cada Base de Dados

Grupo Pesquisado	Resultados			
	Scielo	BDTD	Scopus	Web of Science
A	29	1.536	125.626	96.134
B	555	2.544	109.563	92.187
C	828	19.499	441.347	341.731
A + B + C	0	2	34	25

Fonte: Autoria própria (2024).

Observa-se, em um primeiro momento, o bom desempenho da estratégia de busca em relação a direcionar e a alinhar a pesquisa ao tema de estudo. De um rol inicial de 676.536 resultados na base Scopus, a estratégia de busca foi capaz de selecionar 34 documentos; o mesmo ocorre com a base Web of Science, na qual de um universo inicial de 530.052 resultados, foram selecionados 25 documentos. A consulta na BDTD obteve 2 resultados, enquanto na Scielo não se obteve nenhum resultado, indicando novamente uma lacuna compatível com a ampliação de pesquisas em âmbito nacional.

Verifica-se ainda que existe uma grande quantidade de materiais que abordam os temas de pesquisa de forma individual. Por exemplo, na base Scopus foram encontrados 125.626 documentos que tratam de sistemas fotovoltaicos, 109.563 que abordam indicadores e 441.347 que discorrem sobre a sustentabilidade, demonstrando a pertinência e a atualidade dos temas.

Por outro lado, como já citado, a quantidade de documentos que tratam dos três temas de forma combinada foi de 34 na base Scopus, 25 na base Web of Science e 2 na BDTD, demonstrando novamente a originalidade do tema pretendido em âmbito nacional.

Desta forma, a etapa de busca da revisão sistemática da literatura resultou inicialmente em 61 documentos que seguiram para etapa de triagem, conforme detalhado na Subseção seguinte.

5.3.4. Triagem e Definição do *Corpus* Inicial de Pesquisa

A etapa de triagem teve por finalidade verificar o alinhamento dos documentos aos objetivos da revisão sistemática da literatura, de modo a definir o rol que comporá o *corpus* inicial de pesquisa.

Cabe neste momento destacar os critérios de inclusão e de exclusão dos documentos já citados nas subseções anteriores:

- Recorte temporal: **últimos 5 anos (2018-2022).**
- Idiomas: **inglês e português.**
- Bases de dados: **Scielo, BDTD, Scopus e Web of Science.**
- **Revisão por pares.**
- Aderência: **devem estar relacionados aos propósitos da pesquisa.**

Primeiramente, foram removidos 19 escritos duplicados, uma vez que um mesmo documento pode fazer parte dos resultados de bases de dados distintas.

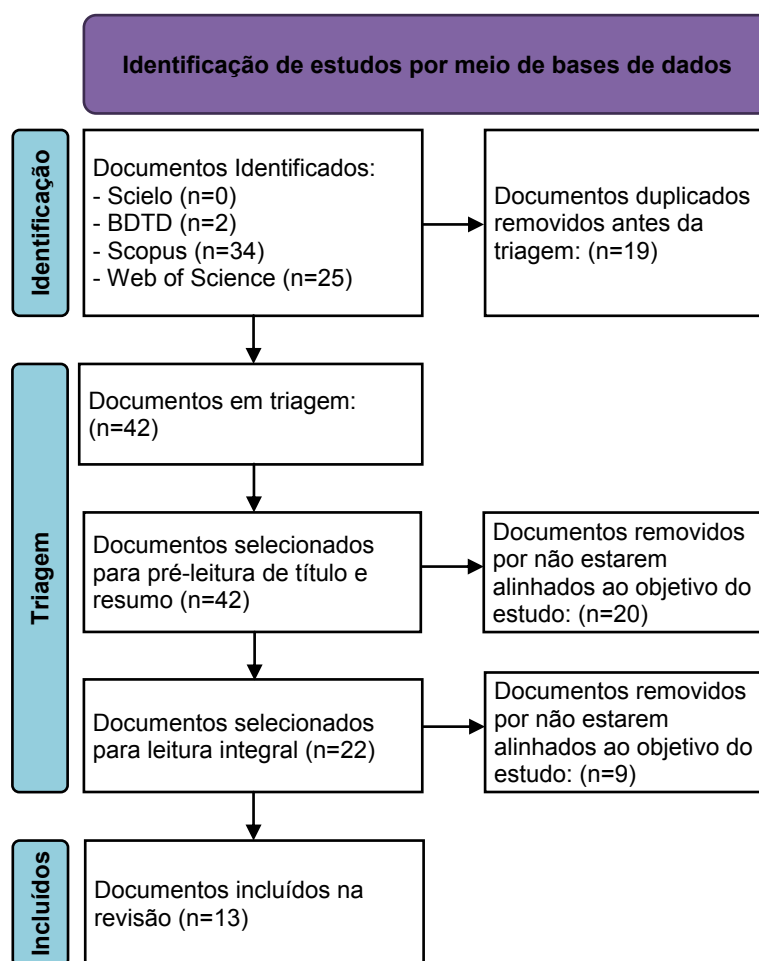
Após essa primeira etapa foi realizada a pré-leitura do título e do resumo do material, de modo que 20 foram removidos por não estarem alinhados ao objetivo do presente estudo. Assim, foram selecionados 22 documentos para leitura integral,

dos quais outros 9 foram eliminados por também não terem alinhamento com o tema do estudo.

Finalmente, foi definido o *corpus* inicial de pesquisa, composto por um rol de 13 documentos que passaram pelos critérios e pelas etapas supracitadas.

O fluxograma de triagem da revisão sistemática da literatura está representado na Figura 19.

Figura 19 – Fluxograma de Triagem da Revisão Sistemática da Literatura.



Fonte: Adaptado de Page et al. (2021).

O rol de 13 documentos que compõem o *corpus* inicial de pesquisa foi submetido à análise sistemática, descrita na Seção seguinte, da qual foram extraídos os indicadores de sustentabilidade aplicados a sistemas fotovoltaicos, tema central deste estudo.

Destaca-se que além do *corpus* inicial da pesquisa composto dos 13 resultados supracitados, o *corpora* da pesquisa contou com 376 documentos no

total, que foram utilizados nos capítulos de revisão de literatura e nas definições metodológicas da pesquisa.

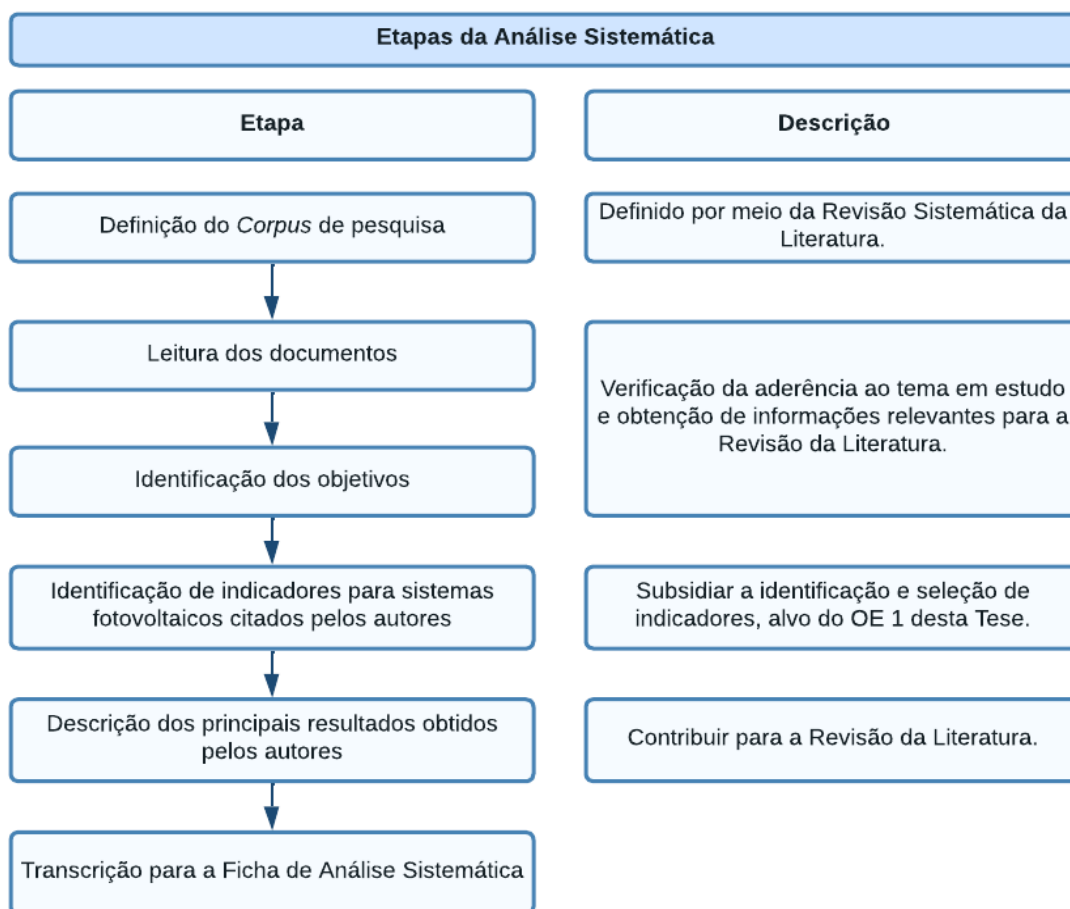
5.4. ANÁLISE SISTEMÁTICA

A partir do *corpus* inicial de pesquisa obtido por meio da revisão sistemática da literatura, efetuou-se a análise sistemática desse material, seguindo os procedimentos adotados por Benelli (2019) e Guedes (2022), que por sua vez se fundamentam em Bardin (2016), Conforto, Amaral e Silva (2011) e Meireles e Cendón (2010), conforme apresentado nas Subseções seguintes.

5.4.1. Etapas Iniciais

A sistematização da análise dos documentos consistiu em seis etapas, iniciando-se pela definição do *corpus* inicial de pesquisa. Em seguida foi efetuada a leitura e a identificação dos objetivos de cada documento, para então serem identificados os indicadores para sistemas fotovoltaicos citados pelos autores do respectivo documento. Finalmente foram descritos os principais resultados obtidos pelos autores e efetuada a transcrição para a Ficha de Análise Sistemática. As etapas encontram-se ilustradas na Figura 20.

Figura 20 – Etapas da Análise Sistemática.



Fonte: Autoria própria (2024).

Uma vez definido o *corpus* inicial de pesquisa, resultado da revisão sistemática da literatura apresentada na Subseção 5.3.4, foi efetuada a leitura dos documentos e a identificação dos objetivos de cada estudo, de modo a se verificar a sua aderência ao tema em estudo e a se obter informações relevantes para a Revisão da Literatura.

Foram identificados, então, indicadores para sistemas fotovoltaicos citados pelos autores, com o propósito de subsidiar a identificação de indicadores, alvo do Objetivo Específico 1 desta Tese.

Contribuindo para a Revisão da Literatura, na quinta etapa da análise sistemática foram descritos os principais resultados obtidos pelos autores de cada um dos documentos que compõem o *corpus* inicial de análise, de modo a identificar os avanços desses estudos no assunto em tela.

Depois de concluídas tais etapas, todas as informações colhidas foram transcritas para a Ficha de Análise Sistemática, apresentada no Quadro 15 no Apêndice A.

O fichamento das 13 publicações selecionadas possibilitou identificar de modo sistemático as principais contribuições de cada documento avaliado para com os objetivos desta Tese, como é possível observar no Quadro 9, que reproduz, a título exemplificativo, o fichamento de um dos documentos analisados.

Quadro 9 – Exemplo da Ficha de Análise Sistemática

Título: <i>Sustainability indicators for renewable energy systems using multicriteria decision-making model and extended SWARA/ARAS hybrid method</i>
Referência: (Ghenai; Albawab; Bettayeb, 2020)
Objetivo: Desenvolver um <i>framework</i> para priorização de tecnologias sustentáveis para sistemas de geração distribuída.
Indicadores Identificados: Área Ocupada [m ² /kWp], Intensidade de Material (construção) [kg/kWp], Emissão de Gases de Efeito Estufa no Ciclo de Vida [Kg CO ₂ -eq/kWh], Custo Unitário de Instalação [R\$/kWp], Custo Nivelado de Energia (LCOE) [R\$/kWh], Potência Nominal do Sistema [kWp], Taxa de Crescimento [%/ano], Fator de Capacidade (FC) [%], Eficiência Energética do Módulo [%], Vida Útil do Sistema [anos].
Principais Resultados: Os sistemas de energia eólica terrestres são classificados em primeiro lugar em relação aos indicadores de sustentabilidade e seus subindicadores, seguidos por células a combustível de óxido sólido, depois células a combustível de ácido fosfórico e, finalmente, por sistemas de energia solar de silício policristalino.

Fonte: Autoria própria (2024).

Também na etapa de transcrição para a Ficha de Análise Sistemática, os indicadores identificados foram padronizados em relação as suas nomenclaturas e unidades de medida. Esse processo foi necessário visto que um mesmo indicador pode ser apresentado com uma nomenclatura e uma unidade de medida distinta em dois documentos.

Uma vez concluída a etapa de Análise Sistemática, foi efetuada a Análise de Conteúdo destes resultados, conforme descrito na Subseção seguinte.

5.4.2. Análise de Conteúdo - Direcionamentos

A Análise de Conteúdo efetuada por meio da sistematização de conteúdos existentes em documentos é uma técnica que se utiliza da “inferência e da interpretação para obter questões relevantes contidas em um conjunto de documentos” (Meireles; Cendón, 2010, p. 78). Segundo Bardin (2016), a Análise de Conteúdo pode ser definida como um conjunto de técnicas de análise que por meio

de procedimentos sistemáticos e objetivos de descrição do conteúdo visam obter indicadores que permitam a inferência de conhecimentos relativos a estes documentos, caracterizando-se, assim, como um método de tratamento da informação contida na mensagem (Meireles; Cendón, 2010).

Ainda segundo Bardin (2016), a análise de conteúdo é composta por três etapas: (i) pré-análise, (ii) exploração do material e (iii) tratamento dos resultados obtidos e interpretação.

A pré-análise é caracterizada pela organização do material disponível para análise, constituída pela: (i) leitura flutuante dos materiais reunidos na pesquisa, (ii) seleção dos documentos que serão analisados, (iii) constituição do *corpus* de análise, (iv) definição dos objetivos da análise de conteúdo e (v) preparação do material (Bardin, 2016).

No presente estudo, a etapa de pré-análise foi executada durante a revisão sistemática da literatura, quando foram selecionados os documentos a compor o *corpus* inicial de análise e, ainda, durante a análise sistemática, quando o *corpus* foi escrutinado sistematicamente e transcrito para a Ficha de Análise Sistemática.

A etapa de exploração do material foi composta pela codificação dos conteúdos, que é “o processo pelo qual os dados brutos são transformados sistematicamente e agregados em unidades, as quais permitem uma descrição exata das características pertinentes do conteúdo” (Bardin, 2016, p. 133).

Nessa etapa foi realizada a categorização, definindo-se as categorias de análise, categorias de contexto e unidades de registro. Segundo Bardin (2016), as categorias de contexto são amplas, temáticas e direcionadas pelos eixos e objetivos da pesquisa, as categorias de análise subdividem as categorias de contexto em partes menores de modo a permitir a análise e as unidades de registro podem ser palavras, temas ou eixos que explicam a categoria de análise.

Para tanto, foi realizada uma análise heurística simples por meio de análise quantitativa de incidência das palavras mais frequentes dos Capítulos 1, 2, 3 e 4, com a utilização da ferramenta TagCrowd (*online*). Desta forma, foi possível consolidar a definição das categorias analíticas, por meio da geração de imagens e da contagem de cada palavra, de forma visual e de fácil compreensão, conforme apresenta-se na Figura 21.

Figura 21 – Resultado da Análise Heurística Simples.



Fonte: Autoria própria (2024).

Assim, a partir das grandes áreas de estudo desta pesquisa, do uso dos descritores, das palavras-chaves, da análise do *corpus* de análise e da análise heurística simples, foi estabelecida a seguinte categorização analítica:

- **Categorias de Contexto:** Indicadores e Sistemas Fotovoltaicos.
- **Categorias de Análise:** Dimensão Econômica, Dimensão Ambiental, Dimensão Recursos, Dimensão Tecnológica e Dimensão Social.
- **Unidades de Registro:** as unidades de registro foram formadas pelos próprios indicadores para sistemas fotovoltaicos levantados durante a análise sistemática.

A terceira etapa da análise de conteúdo abrange o tratamento dos dados, a interpretação dos resultados (assertivas e conclusões) e a inferência (Bardin, 2016).

Cabe destacar neste momento que o método de coleta de dados se deu exclusivamente por meio de Pesquisa Bibliográfica. Mais especificamente, a coleta de dados foi efetuada por meio da própria Revisão Sistemática da Literatura, já descrita na Seção 5.3.

Estabelecidas as Categorias de Contexto e de Análise, apresentam-se na Seção 6.1 do Capítulo 6 – Dados Auferidos e Resultados da Pesquisa – as unidades de registro, ou seja, os indicadores para sistemas fotovoltaicos identificados na

etapa de fichamento dos documentos resultantes da análise sistemática da literatura.

Desta forma, uma vez concluída a etapa de identificação de indicadores aplicáveis a sistemas fotovoltaicos, será apresentada na próxima Seção a descrição da etapa de seleção destes indicadores, alvo do Objetivo Específico 1.

5.5. SELEÇÃO DOS INDICADORES

Sendo uma etapa anterior à consulta ao painel de especialistas, e visando proporcionar robustez ao processo de validação dos indicadores identificados na literatura, foi realizada uma seleção inicial utilizando três critérios distintos: (i) Características desejáveis de um bom indicador; (ii) Atendimento aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e (iii) Atendimento aos Princípios de Bellagio. Cada um dos critérios citados será descrito nas Subseções seguintes.

O primeiro critério avaliou de maneira individual se cada um dos indicadores identificados possui as características desejáveis de um bom indicador (Meadows, 1998; Caldeira, 2018). O segundo critério avaliou de maneira integrada quais as contribuições da Geração Distribuída Fotovoltaica para cada um dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (Organização das Nações Unidas, 2015; Scolari; Strauhs, 2024). O terceiro critério avaliou de maneira integrada o conjunto de indicadores identificados com base nos Princípios de Bellagio, que envolvem as áreas: (i) conteúdo, (ii) processo, (iii) escopo, e (iv) impacto (International Institute For Sustainable Development, 2009; Pintér *et al.*, 2012).

Destaca-se que o objetivo dessa metodologia de análise foi avaliar o tema em estudo sob três diferentes vieses: (i) avaliação individual dos indicadores, (ii) avaliação da tecnologia fotovoltaica, e (iii) avaliação do conjunto de indicadores para sistemas fotovoltaicos.

Assim, salienta-se que o segundo critério adotado – Atendimento aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), a ser abordado na Subseção 5.5.2., avaliou a tecnologia de geração fotovoltaica como um elemento único, posto que os ODS não fazem distinção direta entre as diferentes fontes de geração de energia renovável. Destaca-se que na Seção 2.5, a discussão da literatura evidencia

a interconexão entre os diversos ODS e a importância de avaliação das contribuições da geração FV no alcance desses (Le Blanc, 2015; Organização das Nações Unidas, 2015; Schone; Timofeeva; Heiz, 2022). Deste modo, uma vez verificada a importância da geração distribuída fotovoltaica para o alcance de cada um dos dezessete Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (Scolari; Strauhs, 2024), considerou-se também, igualmente importantes, os indicadores que tratam da geração distribuída fotovoltaica para compor o quadro referencial de indicadores de sustentabilidade.

5.5.1. Seleção pelas Características Desejáveis de um Bom Indicador.

O primeiro critério de seleção foi a comparação individual de cada um dos indicadores com as características desejáveis de um bom indicador, conforme descritas no Quadro 4 na Seção 2.6, fundamentadas em Berliner e Brimson (1988), Caldeira (2018), Callado e Fensterseifer (2010), Meadows (1998), Neely *et al.* (1997) e Tironi *et al.* (1991).

Seguindo as orientações dos autores supracitados, foram consideradas 9 características desejáveis de um bom indicador: (i) Seletivo; (ii) Claro; (iii) Representativo; (iv) Suficiente; (v) Simples; (vi) Baixo Custo; (vii) Estável; (viii) Disponível; e (ix) Comparativo.

Ao comparar cada um dos 39 indicadores identificados com cada uma das 9 características desejáveis adotou-se uma análise binária de *Possui* (✓) ou *Não Possui* (✗) a característica avaliada. Então, o total de resultados *Possui* (✓) de cada indicador foi somado de modo que os resultados dessa análise pudessem ser avaliados de maneira quantitativa. Para a decisão de inclusão ou de exclusão do respectivo indicador foi utilizado o critério de maioria simples, ou seja, um resultado maior do que 50% de características desejáveis foi incluído, conforme abordado por Azzini e Munda (2020). Desse modo foram selecionados, por esse critério, os indicadores que apresentassem pelo menos 5 das 9 características avaliadas. Acrescenta-se que, pelo critério utilizado, todas as características desejáveis de um bom indicador tiveram o mesmo peso na avaliação, não havendo, portanto, características priorizadas em relação a outras.

O resultado do primeiro critério de seleção é apresentado na Seção 6.2 do Capítulo 6 – Dados Auferidos e Resultados da Pesquisa – adiantando-se que dos 39 indicadores previamente identificados, todos foram aprovados pelo primeiro critério de seleção.

Assim, os 39 indicadores que foram aprovados pelo primeiro critério de seleção seguiram para o segundo critério, que consistiu em verificar de que modo a geração distribuída fotovoltaica contribui para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, conforme será descrito na Subseção seguinte.

5.5.2. Seleção pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS.

Como abordado na Seção 2.5, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) representam uma oportunidade para estimular o estudo da sustentabilidade, sendo que estudos em nível local sobre um determinado aspecto ecosocioeconômico são importantes para compreender adequadamente a sustentabilidade sob uma ótica mais ampla e em uma maior escala (Leal Filho *et al.*, 2018).

A Organização das Nações Unidas (2015, p. 2) destaca que “os vínculos e a natureza integrada dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável são de importância crucial para assegurar que o propósito da nova Agenda seja realizado” (Organização das Nações Unidas, 2015, p. 2), evidenciando assim a interconexão entre os diversos ODS e, em decorrência, a importância de avaliação das contribuições dos diferentes tipos de energia sendo, no caso específico desta Tese, a geração FV no alcance dos demais ODS, além do ODS 7, especificamente relacionado às questões de acesso à energia, sobretudo limpa (Organização das Nações Unidas, 2015).

Nesse contexto, diversos estudos se propõem a investigar as interligações entre os ODS (Schone; Timofeeva; Heiz, 2022), a exemplo de Le Blanc (2015), que aplicou técnicas de análise de rede para mapear as ligações entre os diferentes ODS, concluindo que as áreas temáticas com o maior número de interligações com o ODS 7 incluem produção e consumo sustentáveis, desigualdade, fome, pobreza e educação.

Seguindo essa linha, Nilsson, Griggs e Visbeck (2016) desenvolveram a ideia de sinergias e de conflitos entre os ODS, descrevendo diferentes tipos de interações entre os objetivos. Além disso, os autores enfatizam a importância de se avaliar o contexto local, as tecnologias disponíveis e os aspectos de tempo e de espaço nessa análise.

Já Nerini *et al.* (2018) identificaram e examinaram as ligações entre a conjuntura energética e os ODS, concluindo que as interdependências no nível das metas individuais dos ODS são múltiplas e altamente específicas do contexto.

Ainda neste contexto, McCollum *et al.* (2018) avaliaram, por meio de uma revisão da literatura, as interações do ODS 7 com os outros ODS, considerando a natureza e a força das interações identificadas e a robustez das evidências da literatura, concluindo que as interações positivas (sinergias), superam as interações negativas (conflitos) tanto em número quanto em magnitude, entre todos os ODS.

Seguindo as contribuições teóricas dos autores supracitados, Scolari e Strauhs (2024) levantaram, por meio de uma revisão sistemática da literatura, as contribuições da geração distribuída fotovoltaica para o alcance de cada um dos dezessete Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Entre os resultados obtidos, Scolari e Strauhs (2024) identificaram que a geração FV fomenta em algum nível o alcance de todos os ODS, sendo que essa contribuição possui maior ou menor relevância dependendo do ODS considerado, sendo de relevância intrínseca para o alcance do ODS 7 – Energia Limpa e Renovável, do ODS 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis e do ODS 13 – Ação Contra Mudança Global do Clima, que representam os ODS ligados à sustentabilidade energética, às cidades sustentáveis e às questões ambientais.

Ainda relatando os resultados obtidos, Scolari e Strauhs (2024) acrescentam que todos os ODS são sensíveis às possíveis contribuições da geração FV, de modo que, por mais que a contribuição seja indireta e sutil, ela existe e deve ser considerada em estudos correlatos.

Acrescenta-se, conforme já destacado no *caput* da Seção 5.5, que o critério de seleção dos indicadores pelo Atendimento aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), avaliou a tecnologia de geração fotovoltaica de forma geral e não para cada um dos indicadores isoladamente, pois, como já destacado, a literatura da área evidencia a característica inter-relacionada dos diversos ODS e a necessidade de investigação das contribuições da geração FV na busca desses (Le

Blanc, 2015; Organização das Nações Unidas, 2015; Schone; Timofeeva; Heiz, 2022).

Deste modo, uma vez verificada a contribuição da geração FV e consequentemente dos indicadores selecionados para o alcance aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, na Subseção seguinte os indicadores serão selecionados com base nos Princípios de Bellagio.

5.5.3. Seleção pelos Princípios de Bellagio.

Como abordado na Seção 2.7, os Princípios de Bellagio, ou *BellagioSTAMP*, orientam todo o processo de avaliação, incluindo a escolha e o desenho dos indicadores, a sua interpretação e a comunicação do resultado (The Global Development Research Center, 2023). Segundo Pintér *et al.* (2012), não se espera que os Princípios conduzam diretamente a conjuntos de indicadores comuns, mas que ajudem a orientar o *design* e a análise geral do sistema de indicadores. Por esses motivos, adotaram-se os Princípios de Bellagio como o terceiro e último critério utilizado para a seleção dos indicadores identificados.

Seguindo as orientações de Pintér *et al.* (2012), a harmonização da estrutura de análise não é simplesmente uma questão de selecionar estruturas e indicadores comuns, mas de seguir uma abordagem comum de desenvolvimento. Deste modo, avaliou-se de maneira integrada todo o conjunto de indicadores identificado com base no *BellagioSTAMP*.

Embora já citado na Seção 2.7, cabe destacar novamente os oito Princípios de Bellagio considerados nesta análise: (i) Visão orientadora, (ii) Considerações essenciais, (iii) Escopo adequado, (iv) Estrutura e indicadores, (v) Transparência, (vi) Comunicação efetiva, (vii) Ampla participação e (viii) Continuidade e capacidade.

Para cada um dos oito princípios foram definidas diversas questões orientadoras – 34 questões no total, para avaliar de maneira ampla se o conjunto de indicadores cumpre tanto um determinado princípio quanto a totalidade dos princípios.

Semelhante à análise adotada na Seção 5.5.1 – Validação pelas Características Desejáveis de um Bom Indicador, utilizou-se uma análise binária de

Sim ou *Não* em relação a cada uma das 34 questões orientadoras, conforme representado no Quadro 10.

Quadro 10 – Avaliação dos Indicadores por meio dos Princípios de Bellagio.

1 – Visão Orientadora	
1.1 – O conjunto de indicadores tem um objetivo claro?	Sim
Justificativa: Tem o objetivo de avaliar a sustentabilidade de sistemas fotovoltaicos.	
1.2 – O objetivo caminha no sentido de alcançar a sustentabilidade?	Sim
Justificativa: O objetivo é justamente para avaliação da sustentabilidade.	
2 – Considerações Essenciais	
2.1 – Os indicadores consideram a dimensão Ambiental da Sustentabilidade?	Sim
Justificativa: Existem indicadores no conjunto que abordam as questões ambientais.	
2.2 – Os indicadores consideram a dimensão Social da Sustentabilidade?	Sim
Justificativa: Existem indicadores no conjunto que abordam as questões sociais.	
2.3 – Os indicadores consideram a dimensão Econômica da Sustentabilidade?	Sim
Justificativa: Existem 8 indicadores no conjunto que abordam as questões econômicas.	
2.4 – Os Indicadores analisam a existência de ações governamentais e as implicações para tomada de decisões?	Não
Justificativa: Porém, podem apoiar as ações governamentais e tomadas de decisão.	
2.5 – São consideradas as tendências de mudanças a curto e longo prazo?	Sim
Justificativa: Ao se avaliar os indicadores ao longo do tempo é possível traçar tendências.	
2.6 – Trata possíveis riscos, e considera a possibilidade de identificar estes riscos?	Não
Justificativa: Não considera esta tratativa de forma explícita.	
3 – Escopo Adequado	
2.1 – Existem indicadores que pesquisem efeitos de curto prazo?	Sim
Justificativa: Existem 4 indicadores que abordam questões de curto prazo.	
2.2 – Existem indicadores que pesquisem efeitos de longo prazo?	Sim
Justificativa: Existem indicadores que consideram o ciclo de vida do sistema fotovoltaico.	
2.3 – Existem indicadores para trabalhar com ocorrências de mudanças provocadas pela atividade humana?	Não
Justificativa: Somente de forma indireta.	
2.4 – Os Indicadores podem ser aplicados em diferentes locais com diferentes características?	Sim
Justificativa: É possível aplicá-los em locais heterogêneos.	
2.5 – Comporta abrangência geográfica do local para o global?	Sim
Justificativa: É possível aplicá-los em locais menores e então expandir a análise para um recorte geográfico maior.	

(continua)

(continuação do Quadro 10)

4 – Estrutura e Indicadores	
4.1 – Define um domínio ou uma área para atuação?	Sim
Justificativa: Definido nas delimitações de pesquisa deste estudo.	
4.2 – Possui fontes de dados abertos disponíveis, atualizados e confiáveis para a aplicação dos indicadores?	Não
Justificativa: Para alguns indicadores sim, mas para a maioria é necessário trabalho de campo para levantamento.	
4.3 – Possui métodos de medição padronizados?	Sim
Justificativa: Alguns indicadores possuem critérios bem definidos de cálculo na literatura.	
4.4 – Permite a comparação com outros recortes temporais e espaciais?	Sim
Justificativa: Permite a comparação com outros recortes temporais e espaciais, desde que adotados os mesmos critérios de análise.	
4.5 – Permite traçar tendências em relação ao fenômeno analisado?	Sim
Justificativa: Permite traçar tendência, desde que adotados os mesmos critérios de análise.	
4.6 – Possuem normas padronizadas para a sua aplicação	Não
Justificativa: Não existem normas técnicas específicas aplicáveis ao cálculo, existem somente orientações e metodologias de cálculo disponíveis na literatura.	
4.7 – Permite a comparação com metas e referências?	Sim
Justificativa: É possível comparar os indicadores com outros valores de referência disponíveis na literatura da área.	
5 – Transparência	
5.1 – É efetuada a divulgação e a publicação dos resultados?	Sim
Justificativa: A divulgação dos resultados será efetuada em um primeiro momento por meio desta tese de doutorado e na sequência por meio da publicação de artigos sobre o tema.	
5.2 – A divulgação dos dados é aberta e acessível ao público?	Sim
Justificativa: A presente tese, contendo os resultados da pesquisa, é aberta e disponibilizada a comunidade.	
5.3 – A divulgação é ampla, e atinge todos os interessados?	Não
Justificativa: Reconhece-se que o alcance de teses e de artigos científicos fica restrito, muitas vezes, à comunidade científica, e nem sempre chega até aos profissionais da área e ao público geral interessado.	
5.4 – Expõem as escolhas, suposições e incertezas que influenciam nos resultados da avaliação?	Sim
Justificativa: As escolhas, suposições e incertezas em relação a esta pesquisa estão descritas na presente tese.	
5.5 – Divulga as fontes dos dados e dos métodos?	Sim
Justificativa: As fontes de dados e os métodos utilizados estão descritos na presente tese.	

(continua)

(continuação do Quadro 10)

5.6 – Divulga todas as fontes de recursos financeiros, e os possíveis conflitos de interesses?	Sim
Justificativa: As fontes de recursos e possíveis conflitos de interesses são descritos no capítulo introdutório desta tese.	
6 – Comunicação Efetiva	
6.1 – É utilizada uma linguagem clara e simples?	Sim
Justificativa: Por se tratar de uma pesquisa interdisciplinar, buscou-se o uso de uma linguagem que possa ser entendida por leitores das mais diversas áreas.	
6.2 – As informações são apresentadas de uma maneira objetiva?	Sim
Justificativa: Buscou-se apresentar as informações de maneira objetiva, porém, não deixando de descrever todos os passos da pesquisa de maneira detalhada.	
6.3 – Foram utilizadas ferramentas visuais e gráficas para auxiliar na interpretação?	Sim
Justificativa: Na medida do possível foram utilizados gráficos e recursos visuais.	
6.4 – Os dados foram disponibilizados com detalhes?	Sim
Justificativa: Buscou-se descrever os passos da pesquisa para permitir a verificação e a replicabilidade.	
7 – Ampla Participação	
7.1 – É considerada a participação da opinião pública?	Não
Justificativa: Essa consideração de forma direta não está no escopo da pesquisa, no entanto foi validada com um grupo de especialistas da área.	
7.2 – São consideradas outras perspectivas de modo a diminuir o viés da pesquisa?	Sim
Justificativa: Por meio da revisão sistemática da literatura foi possível considerar as perspectivas de diversos pesquisadores de forma multidisciplinar. Além disso, o grupo de indicadores foi submetido a um painel de especialistas da área.	
8 – Continuidade e Capacidade	
8.1 – Os indicadores permitem múltiplas análises e são sensíveis a mudanças?	Sim
Justificativa: Os indicadores podem ser aplicados múltiplas vezes ao longo de um período para avaliar tendências.	
8.2 – São previstos investimentos para manter o aprimoramento e a continuidade da pesquisa?	Não
Justificativa: Não são previstos investimentos nesse sentido, porém a continuidade da pesquisa será efetuada pelo pesquisador e por outros pesquisadores que desejem estender e aprimorar o referido estudo.	

Fonte: Autoria própria (2024), perguntas adaptadas de International Institute for Sustainable Development (2009) e Penteado e Duarte (2014).

Observa-se que as questões orientadoras procuram abranger com amplitude cada um dos oito princípios – *BellagioSTAMP* –, sendo que as questões foram formuladas com base na adaptação dos próprios Princípios de Bellágio (Quadro 5) e das análises de Penteado e Duarte (2014).

Para que os resultados dessa análise pudessem ser avaliados de maneira quantitativa, o total de respostas Sim para cada pergunta foi somado, sendo o resultado desta análise apresentado na Tabela 9 da Seção 6.2 do Capítulo 6 – Dados Auferidos e Resultados da Pesquisa – adiantando-se que das 34 questões orientadores, 26 questões foram respondidas com *Sim* e 8 questões respondidas com *Não*, resultando em um percentual de atendimento aos Princípios de Bellagio de 76%.

Desta forma, concluída a seleção dos indicadores por meio dos critérios definidos nas últimas três Subseções, alvo do Objetivo Específico 1, o Quadro 13 contendo os 39 indicadores selecionados, constante na Seção 6.2 do Capítulo 6, foi submetido a consulta a um painel de especialistas da área, conforme apresentado na Seção seguinte.

5.6. VALIDAÇÃO – CONSULTA A PAINEL DE ESPECIALISTAS

Com o intuito de validar e apontar a relevância dos 39 indicadores levantados por esse estudo na composição de um quadro referencial, estes foram submetidos à consulta a um painel de especialistas da área, efetuada por meio de um questionário *online* desenvolvido e aplicado adaptando-se o Método Delphi às necessidades deste Relato de Tese, conforme será explicitado nas Subseções seguintes.

Destaca-se que antes do início da aplicação do Método Delphi o projeto de pesquisa foi submetido a apreciação do Comitê de Ética em Pesquisa Envolvendo Seres Humanos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (CEP/UTFPR), tendo sido aprovado por este comitê conforme processo CAAE 77802724.0.0000.5547.

5.6.1. Método Delphi

Conforme já descrito no parágrafo introdutório desta Seção, a consulta ao painel de especialistas foi efetuada por meio de um questionário *online* desenvolvido

e aplicado conforme adaptação do Método Delphi, o qual se baseia no princípio da inteligência coletiva em que se tenta alcançar um consenso nas opiniões expressadas individualmente por um grupo de pessoas selecionadas, cuidadosamente, como especialistas qualificados (Estévez; Gallastegui, 2005; Heise *et al.*, 2024; Minayo, 2009; Parisca, 1995; Santoyo, 2011; Shukor; Ng, 2022; Souza, 2016).

Convém destacar inicialmente, que apesar dos aspectos gerais de aplicação do Método Delphi serem abordados na literatura da área, conforme será apresentado sequencialmente, Hasson e Keeney (2011) afirmam que qualquer processo para estabelecer uma diretriz única de aplicação em estudos Delphi pode ser criticado. Se por um lado, continuam Hasson e Keeney (2011), essa característica plástica possa ser vista por críticos como um ponto fraco metodológico, por outro lado é vista por adeptos como um benefício fundamental que proporciona flexibilidade de aplicação. Nesta linha, Mukherjee *et al.* (2015) afirmam que a estrutura da técnica Delphi permite adaptações para atender às necessidades e à realidade da pesquisa. Os estudos de Heise *et al.* (2024), Phichetkunbodee *et al.* (2023), Walters *et al.* (2021) corroboram com essa visão, mencionando a necessidade de adaptação do método para atender às necessidades e às possibilidades da pesquisa em termos de recursos financeiros e de tempo, reduzindo assim, a complexidade, o tempo, o custo e aumentando a confiabilidade da pesquisa.

Munaretto, Corrêa e Cunha (2013, p. 11) complementam, destacando a importância de “reflexões que apontarão técnicas adequadas aos diferentes contextos de pesquisa, cujas restrições de recursos para desenvolvimento de pesquisas são fatores determinantes”, justificando assim “esse tipo de apontamento em detrimento de se estabelecerem procedimentos metodológicos mais amplos e complexos”.

Com essa perspectiva de flexibilidade de aplicação do método Delphi, nesta pesquisa adaptou-se o Método para atender às necessidades e aos objetivos desta, conciliando a confiabilidade de aplicação do método às limitações de recursos financeiros e de tempo disponíveis.

Destarte, segundo Linstone e Turoff (1975, p. 3, tradução nossa), o método Delphi “pode ser caracterizado como um método para estruturar um processo de comunicação em grupo de modo que o processo seja eficaz ao permitir que um

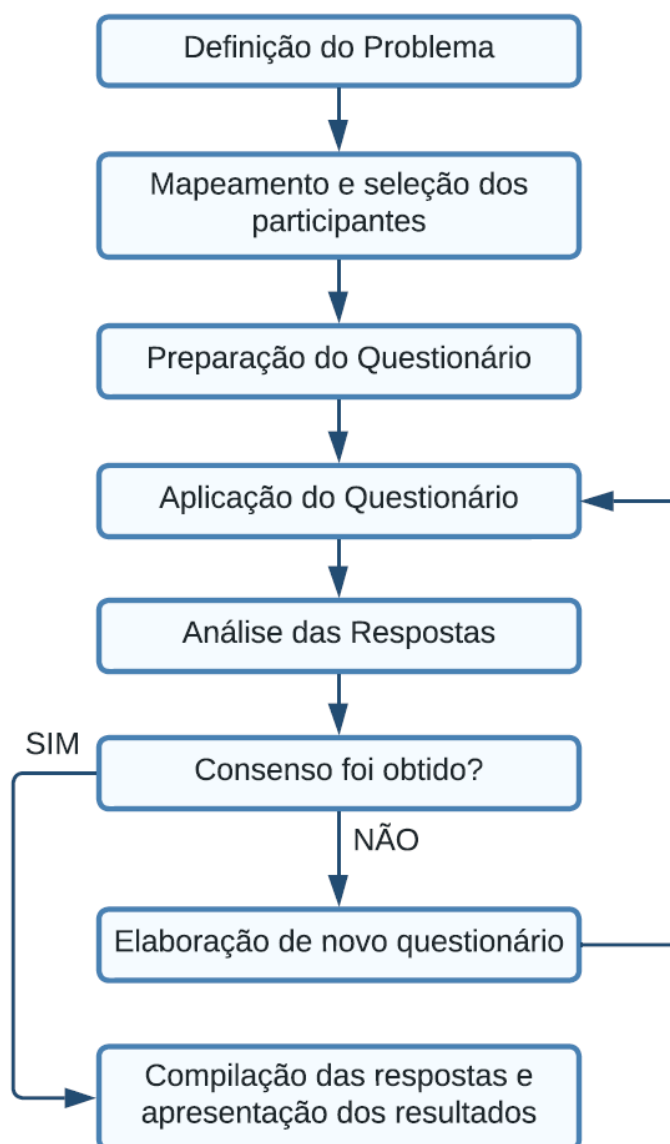
grupo de indivíduos, como um todo, lide com um problema complexo”, definição essa considerada por Echeverría e Hott (1990), Heise *et al.*, (2024), Santoyo (2011) e Tickell e Klassen (2024).

Segundo Antunes (2014), o método Delphi, também conhecido como Métodos Delfos, é utilizado no processo de construção de consenso, o qual, segundo Chávez e Torres (2024), é obtido por meio de análises matemáticas em que se considera o conjunto dos julgamentos individuais, obtendo-se assim uma perspectiva de grupo sobre o assunto discutido. Munaretto, Corrêa e Cunha (2013) alertam, contudo, que a depender da forma como a pesquisa é apresentada ao especialista, existe a possibilidade que se criarem consensos forçados ou artificiais, em que os especialistas são induzidos a expressar uma opinião pré-estabelecida, visão também abordada por Latif *et al.* (2016).

Apesar das limitações inerentes a qualquer método de pesquisa, Linstone e Turoff (1975) afirmam que a pesquisa Delphi constitui ferramenta metodológica aplicável em situações decisórias e diagnósticas, tendo amplo uso nas áreas de Ciências da Saúde, de Ciências Humanas, de Educação e de Administração.

Ao abordar o histórico do surgimento do referido método, Linstone e Turoff (1975) e Antunes (2014, p. 64) descrevem que a técnica foi utilizada primeiramente no início da década de 1950 no Estados Unidos, sob o nome de *Project Delphi*, com o objetivo “de gerar consenso entre especialistas da área militar sobre a temática da defesa nacional” americana, sendo aplicada em seu início predominantemente em projetos industriais e militares. Linstone e Turoff (1975) complementam afirmando que durante a década seguinte (1960) passou a ser utilizada em outras áreas atingindo um crescimento exponencial na década de 1970. Para Antunes (2014, p. 64), o sucesso da aplicabilidade do método pode ser atribuído a sua capacidade de “estruturação de processos de comunicação entre indivíduos e grupos”, de modo a se “estabelecer consenso acerca de um problema complexo”.

Objetivando, portanto, o consenso de respostas entre especialistas de determinada área, Munaretto, Corrêa e Cunha (2013) apresentam as principais etapas a serem seguidas para a realização da pesquisa Delphi, conforme apresentando na Figura 22 e que serão utilizadas neste Relato de Tese.

Figura 22 – Etapas de Aplicação do Método Delphi.

Fonte: Adaptado de Munaretto, Corrêa e Chunha (2013).

Explicitando, segundo Munaretto, Corrêa e Cunha (2013), pesquisa Delphi se inicia com a definição do problema objeto da pesquisa. Na sequência é efetuado o mapeamento e a seleção dos especialistas que exerçam atividades relacionadas ao tema do estudo e seus subtemas, conforme será descrito na Subseção 5.6.2. Sequencialmente é efetuada a preparação e a aplicação do questionário, seguida da análise das respostas. Neste ponto, continuam Munaretto, Corrêa e Cunha (2013), pode haver duas situações: (i) haver consenso entre os especialistas, ou (ii) não haver consenso entre os especialistas. Havendo consenso, cabe destacar, é efetuada a compilação final das respostas e a apresentação dos resultados. Por outro lado, não havendo consenso, prepara-se um novo questionário com os pontos

divergentes – 2º rodada – aplicando-se novamente o questionário sucessivamente, até que o consenso em relação ao assunto em estudo seja obtido.

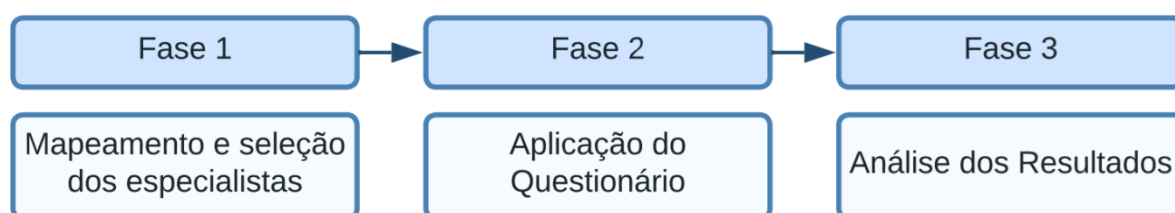
Acrescenta-se que a obtenção do consenso advém da presença de concordância levantada a partir da análise das respostas dos especialistas consultados (Munaretto; Corrêa; Cunha, 2013; Santoyo, 2011), sendo que os critérios utilizados no presente estudo para a avaliação da concordância estão descritos na Subseção 5.6.4.

Dentre as vantagens do método, Flores e Gómez-Limón (2006) afirmam que o Método Delphi elimina a influência de interação entre participantes se mostrando eficaz na redução da pressão do grupo, resolvendo problemas associados a discussões abertas e torna o erro de predição em um tema sempre menor que a média das opiniões individuais dos especialistas. Além disso, por ser caracterizado como um procedimento bem definido e estruturado, sua aplicação oferece um adequado consenso de critérios, de conhecimento e de informação, o que o distingue de qualquer prática individual ou simples incorporação de julgamentos individuais ante um problema determinado (Souza, 2016; Santoyo, 2011).

Carreño (2009) e Santoyo (2011) destacam ainda a característica anônima do método, de maneira que nenhum participante conhece a identidade dos demais componentes do grupo, o que garante que o participante possa defender suas posições com tranquilidade e sem pressão do grupo; e a característica estatística do método, uma vez que a informação apresentada não é apenas um ponto de vista geral, mas também corresponde ao grau de concordância obtido.

O fluxo de aplicação do método Delphi seguiu três fases, adaptando-se as metodologias descritas por Estévez e Gallastegui (2005), Munaretto, Corrêa e Cunha (2013) e Shukor e Ng (2022), conforme representado na Figura 23.

Figura 23 – Fluxo de Aplicação do Método Delphi.



Fonte: Autoria própria (2024).

A primeira fase de aplicação do método corresponde a etapa de mapeamento e seleção dos especialistas, seguindo para a aplicação do questionário e finalizando na análise dos resultados. Estas etapas estão descritas nas Subseções seguintes.

5.6.2. Fase 1 – Mapeamento e Seleção dos Especialistas

Na primeira fase de aplicação do Método Delphi foi efetuado o mapeamento e a seleção dos especialistas participantes no estudo. Segundo Santoyo (2011), as discussões teóricas sobre o termo “especialista” não descrevem critérios objetivos em relação a sua função, seus títulos e seu nível hierárquico. Segundo Durand (1971), Borges (2007), Shukor e Ng (2022) e Tickell e Klassen (2024), entende-se por especialista o indivíduo ou grupo de pessoas capazes de oferecer avaliações conclusivas sobre um problema em questão e fazer recomendações sobre seus aspectos fundamentais com competência. Santoyo (2011) considera ainda que um perito tem necessariamente que responder a uma fonte fidedigna, com domínio sobre o assunto e capacidade de oferecer um julgamento crítico com elevado grau de competência.

Estévez e Gallastegui (2005) destacam que a seleção do grupo de especialistas deve considerar pessoas com reconhecida competência, conhecimento e experiência no assunto, de modo que garanta a confiabilidade dos resultados.

Neste contexto, a população do estudo foi, portanto, a de especialistas de formação multidisciplinar que atuem em universidades como professores ou pesquisadores, ou como gestores em empresas de economia privada, economia mista, autarquias, conselhos e associações, que estejam direta, ou indiretamente, exercendo atividades relacionadas ao tema do estudo e seus subtemas.

A busca, e a seleção dos especialistas candidatos a participantes da pesquisa, foi efetuada no dia 12/06/2024 por meio de busca na Plataforma Lattes, na qual foram pesquisadas as competências e os conhecimentos desejados para o estudo. Foi utilizada a opção Busca Avançada da Plataforma, selecionando-se o filtro Participação Profissional na Grande Área Engenharias, e considerando-se o grande tema Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica, bem como os

subtemas: i) Indicadores de Sustentabilidade, ii) Sistemas Fotovoltaicos, iii) Energia Solar Fotovoltaica, iv) Sustentabilidade Ambiental Urbana e v) Desenvolvimento Sustentável. Foi ainda considerado como Filtro o Item – Preferências, com período de Produção a partir de 2020.

A sintaxe de busca utilizada está representada na Figura 24.

Figura 24 – Sintaxe de Busca pelos Especialistas.

"indicadores" AND ("sustentabilidade" OR "sustentável")
AND ("fotovoltaicos" OR "fotovoltaico" OR "fotovoltaicas"
OR "fotovoltaica" OR "energia solar")

Fonte: Autoria própria (2024).

A pesquisa na Plataforma Lattes retornou 940 resultados de possíveis participantes à pesquisa. Destaca-se que não existe consenso na literatura sobre o número ideal de participantes em uma pesquisa seguindo o Método Delphi, de modo que Delbecq, Van de Ven, e Gustafson (1975), Fink *et al.* (1991), Hasson, Keeney e McKenna (2000), Mukherjee *et al.* (2015) e Vergara (2008) sugerem que o número de especialistas deve variar de acordo com o âmbito do problema e dos recursos disponíveis para a aplicação da técnica. Olabuénaga e Uribarri (1989) corroboram, afirmando que é preferível selecionar um grupo reduzido de especialistas, desde que esteja assegurada a participação de especialistas com opiniões e visões divergentes sobre o tema.

Na tentativa de estipular objetivamente o número de participantes Olabuénaga e Uribarri (1989) afirmam ainda que o número de participantes em uma pesquisa seguindo o Método Delphi deve oscilar entre dez e trinta pessoas, enquanto Landeta (1999) define esse número como entre sete e trinta participantes e Skulmoski, Hartman e Krahm (2007) entre 10 e 15 especialistas. Nessa linha, estudos recentes utilizando o Método Delphi utilizaram um número de participantes de variou de 7 até 26 especialistas (Heise *et al.*, 2024; Shukor; Ng, 2022; Tickell; Klassen, 2024).

Landeta (1999) justifica o número entre sete e trinta participantes afirmando que o erro de cada perito adicionado diminui significativamente até atingir o valor de sete participantes, enquanto a melhoria da previsão é muito pequena após o

trigésimo participante, levando em consideração o aumento dos custos e do trabalho de investigação.

Neste contexto, foram selecionados e convidados 45 especialistas para participação na pesquisa, na expectativa de se obter um número mínimo de 15 participantes efetivos, condizente com a literatura na área. A vinculação profissional e a região de atuação dos 45 convidados estão indicadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Vinculação Profissional e Região de Atuação dos Participantes Convidados

Critério de Análise		Quantidade de Participante
Região de Atuação	Sul	9
	Sudeste	15
	Centro Oeste	9
	Nordeste	6
	Norte	6
	Total	45
Vinculação profissional	Universidades	27
	Empresas	9
	Instituições*	9
	Total	45

* O termo “Instituições” abrange: institutos de pesquisa, órgãos públicos, fundações, conselhos, comissões e correlatos.

Fonte: Autoria própria (2024).

Durante a etapa de seleção dos especialistas, constatou-se que não havia especialistas suficientes para dividir igualmente o número de participantes entre as 5 regiões geográficas de atuação e entre as três vinculações profissionais estabelecidas. Observou-se que a maioria dos resultados obtidos na Plataforma Lattes, como esperado, é de professores de universidades, e entre os profissionais vinculados a empresas e a outras instituições, a maioria é da Região Sudeste. Por este motivo, a Região Sudeste registrou um maior número de participantes, uma vez que além dos professores de universidades, a referida região integrou também a maioria dos profissionais de empresas e de outras instituições.

Após a etapa de mapeamento e de seleção dos especialistas foi efetuada a aplicação do questionário, que consistiu primeiramente na aplicação do questionário

piloto para um grupo controlado de participantes, seguida do envio do *e-mail* de convite para os especialistas convidados, conforme será relatado na Subseção seguinte.

5.6.3. Fase 2 – Aplicação do Questionário

Anteriormente a aplicação definitiva do questionário, foi efetuado um pré-teste a fim de fornecer um *feedback* sobre a aplicabilidade, o tempo de resposta, o entendimento das questões e outras considerações que os participantes do pré-teste julgassem pertinentes.

Destaca-se que antes de responder ao questionário piloto e ao questionário efetivo os participantes tiveram que responder e consentir com o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido – TCLE, conforme orientação do Comitê de Ética em Pesquisa Envolvendo Seres Humanos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (CEP/UTFPR), e representado na íntegra no Apêndice C.

O questionário piloto foi enviado para quatro participantes, com o mesmo perfil dos especialistas selecionados, sendo que todos responderam ao convite e seus dados não foram incluídos na análise final. Não houve nenhum relato de dificuldade em relação ao entendimento das questões e em relação a aplicabilidade do questionário. O tempo de resposta médio registrado foi de 12 minutos.

Por sugestão de um dos participantes do questionário piloto o indicador “Interferência na Paisagem” foi alterado da Dimensão Social para a Dimensão Ecológica.

Uma vez o pré-teste tendo sido concluído sem intercorrências, foi enviado o convite para os especialistas candidatos a participação na pesquisa. O primeiro convite foi enviado por *e-mail* no dia 17 de junho de 2024 para os 45 especialistas selecionados.

O questionário definitivo respondido pelos especialistas foi aplicado de forma virtual e *online*, portanto, utilizando-se a ferramenta Google *Forms*. O questionário foi composto por 40 questões, sendo que nas questões de número 1 até número 39 o especialista deveria indicar em uma escala de 1 até 5, em que 1 representa “Nada Relevante” e 5 representa “Extremamente Relevante”, a sua percepção em relação

a relevância do respectivo indicador para compor um quadro referencial de indicadores de sustentabilidade para sistemas fotovoltaicos. Os 39 indicadores de sustentabilidade apresentados no questionário foram categorizados em 5 dimensões da sustentabilidade (social, ambiental, tecnológica, recursos e econômica), conforme já retratado nas Seções 5.4 e 5.5, perfazendo um total de 195 possibilidades de julgamento. Na questão de número 40 o especialista respondente foi convidado a fazer comentários e sugestões a respeito do tema. A íntegra do questionário aplicado encontra-se no Apêndice D.

Após o primeiro envio, foram obtidos os seguintes retornos:

- Sete respostas completas ao questionário, sendo cinco especialistas vinculados profissionalmente a universidades e dois vinculados a empresas.
- Dois participantes informaram não estar aptos para responder ao questionário, ambos vinculados profissionalmente a empresas.
- Uma resposta automática de *e-mail* informando que o especialista estava em férias.

No dia 25 de julho de 2024 foi enviado um *e-mail* de lembrete para os 35 participantes que ainda não haviam dado nenhum retorno. Também foram enviados mais dois convites para especialistas do catálogo pessoal do pesquisador e atendendo aos mesmos critérios estabelecidos na Subseção 5.6.2, ambos vinculados profissionalmente a empresas, compensando as duas recusas de resposta.

Após o segundo envio, foram obtidas mais 9 respostas completas ao questionário, resultando em 16 resposta estratificadas na Tabela 8. Como a resposta ao questionário era anônima, um dos especialistas respondentes optou por não se identificar, e por este motivo aparece como “Não identificado” na Tabela 8.

Tabela 8 – Vinculação Profissional e Região de Atuação dos Especialistas Respondentes

Critério de Análise		Quantidade de Participante
Região de Atuação	Sul	4
	Sudeste	4
	Centro Oeste	2
	Nordeste	2
	Norte	3
	Não identificado*	1
	Total	16
Vinculação profissional	Universidades	9
	Empresas	5
	Instituições	1
	Não identificado*	1
	Total	16

* Especialistas que optaram por não se identificar.

Fonte: Autoria própria (2024).

De posse das respostas e contribuições dos 16 especialistas efetuou-se a análise dos resultados do questionário, conforme metodologia que se encontra descrita na Subseção seguinte.

5.6.4. Fase 3 – Tratamento dos Dados Coletados

O primeiro método estatístico utilizado para simplificar a leitura e a interpretação dos resultados do questionário foi a representação gráfica da distribuição de frequência absoluta das respostas, o que segundo Levine, Stephan e Szabat (2017, p. 31) retrata “os valores de uma variável numérica [quantidade de respostas] em um conjunto de classes numericamente ordenadas [escala da resposta de 1 a 5]”, conforme ilustrado na Figura 25 – Seção 6.3.

Além da representação gráfica, a distribuição de frequência absoluta e relativa das respostas está representada de forma tabulada na Tabela 15 e na Tabela 16 constantes no Apêndice E.

Para se verificar a concordância dos especialistas em relação às respostas, utilizou-se a metodologia proposta por Borges (2007) e utilizada também por Santoyo (2011) e Souza (2016). O primeiro passo da metodologia de Borges (2007) é o cálculo da Frequência Acumulada Absoluta e da Frequência Acumulada Relativa dos resultados, as quais, segundo Morettin e Bussab (2017, p. 34) indicam “quantos elementos, ou que porcentagem deles, estão abaixo de um certo valor”, sendo obtida pela soma da frequência absoluta de uma determinada classe, com as frequências absolutas das classes anteriores, conforme apresentado na Tabela 17 e na Tabela 18 – Apêndice F.

Sequencialmente, procedeu-se à obtenção do valor percentil correspondente a cada frequência relativa acumulada utilizando a distribuição normal padrão, isto é, o cálculo dos valores padronizados pela inversa da distribuição de probabilidades normal padrão, apresentado na Tabela 19 no Apêndice F. Assim, para cada frequência acumulada, até a classificação 1+2+3+4 – ver Tabela 18 no Apêndice F – obteve-se o quantil da distribuição normal e os pontos de corte para localização dos indicadores estudados conforme o consenso dos especialistas. Deste modo, cada um dos indicadores foi classificado nas cinco categorias de relevância: (i) Nada Relevante, (ii) Pouco Relevante, (iii) Relevante, (iv) Muito Relevante e (v) Extremamente Relevante.

Após a definição dos pontos de corte de classificação e da determinação das respostas de consenso dos especialistas seguindo a metodologia proposta por Borges (2007), calculou-se, também seguindo a metodologia Borges (2007), o Coeficiente de Concordância de Kendall (W), conforme apresentado na Tabela 20. O Coeficiente de Concordância de Kendall é usualmente empregado para refletir o grau de concordância ou de divergência entre os especialistas, variando entre 0 e 1, onde $W=1$ representa total concordância entre os especialistas, $0 < W < 1$ representa alguma concordância, e $W=0$ representa nenhuma concordância (Legendre, 2005, 2022).

Destaca-se que para melhor representação das informações, o nome dos indicadores estão representados na Tabela 17, Tabela 18, Tabela 19 e Tabela 20 constantes no Apêndice F, pelo seu número conforme correspondência com a numeração indicada na Figura 25 – Seção 6.3 e na Tabela 15 – Apêndice E. De igual forma, as indicações de relevância: (i) Nada Relevante, (ii) Pouco Relevante, (iii) Relevante, (iv) Muito Relevante e (v) Extremamente Relevante, estão

representadas pela sua posição em uma escala de 1 até 5, onde 1 representa "Nada Relevante" e 5 representa "Extremamente Relevante" respectivamente.

Complementando, Legendre (2005, 2010, 2022), Marcinkiewicz (2017), Sanderson e Soboroff (2007) e Wadoux e Minasny (2024) abordam as limitações do uso do Coeficiente de Concordância de Kendall, e recomendam a utilização deste em conjunto com outras metodologias de cálculo de concordância, para um resultado mais acurado. Ainda nessa linha, Giannarou e Zervas (2014) afirmam que embora o objetivo principal do Método Delphi seja chegar a um consenso entre os especialistas, não existe uma prática comum para medição, sendo recomendada, igualmente, a utilização conjunta de diversas técnicas e práticas.

Assim, visando proporcionar maior robustez estatística aos resultados utilizou-se uma segunda metodologia de cálculo de consenso proposta por Giannarou e Zervas (2014), Latif *et al.* (2016) e Shukor e Ng (2022), que consiste em determinar o nível de consenso dos especialistas utilizando o desvio padrão e o desvio quartil das respostas, ao passo que a relevância dos indicadores é determinada com base na porcentagem de respostas indicando relevância e na mediana das respostas, conforme representado na Tabela 14 – Seção 6.3. Ainda seguindo a metodologia supracitada, o nível de consenso dos especialistas foi dividido em duas categorias: (i) com consenso e (ii) sem consenso, enquanto a relevância de determinado indicador foi classificada em duas categorias: (i) relevante e (ii) não relevante.

Foi com base nas definições e nos procedimentos metodológicos apresentados neste Capítulo que os dados foram coletados e o estudo, desenvolvido. A revisão sistemática da literatura e a análise sistemática fundamentadas em Caldeira (2018), Dresch, Lacerda e Antunes Jr. (2015), Page *et al.* (2021) e Bardin (2016) possibilitaram a identificação dos indicadores. A literatura sobre indicadores, a exemplo de Callado e Fensterseifer (2010), Meadows (1998), Neely *et al.* (1997), Olabi *et al.* (2023), Pintér *et al.* (2012) e Van Bellen (2002) apoiaram a seleção destes indicadores. Finalmente, a consulta a painel de especialistas fundamentada pelo método Delphi (Estévez; Gallastegui, 2005; Heise *et al.*, 2024; Munaretto, Corrêa e Cunha, 2013; Parisca, 1995; Santoyo, 2011; Shukor; Ng, 2022; Souza, 2016) propiciou a validação dos indicadores selecionados. Assim, a resultante deste processo metodológico é apresentada no Capítulo que se segue.

6 DADOS AUFERIDOS E RESULTADOS DA PESQUISA

Neste Capítulo serão apresentados os dados auferidos e os resultados da pesquisa obtidos por meio da aplicação da metodologia abordada no Capítulo 5.

Primeiramente serão descritos os resultados da análise sistemática da literatura, a qual resultou na identificação de um grupo inicial de 39 indicadores de sustentabilidade. Em seguida serão apresentados os resultados da etapa de seleção e de validação destes indicadores, correspondendo aos Objetivos Específicos 1 e 2. Por último, atendendo ao Objetivo Específico 3, é apresentado o Quadro Referencial final de indicadores de sustentabilidade aplicados a Sistemas Fotovoltaicos.

6.1. RESULTADO DA ANÁLISE SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Iniciando a apresentação dos resultados obtidos neste Relato de Tese, convém resgatar os objetivos macro de pesquisa. Inicialmente pretendeu-se selecionar indicadores para a elaboração de um quadro referencial de Indicadores de Sustentabilidade para sistemas fotovoltaicos – OE1, em seguida os indicadores selecionados foram validados por meio de consulta a painel de especialistas – OE2, finalmente o quadro referencial de indicadores foi reestruturado a partir da validação efetuada.

Assim, partindo-se das Categorias de Contexto e de Análise estabelecidas na Subseção 5.4.2, foram analisadas e avaliadas as unidades de registro, ou seja, os indicadores para sistemas fotovoltaicos identificados na etapa de fichamento dos documentos resultantes da análise sistemática da literatura.

Foram identificadas 97 ocorrências de indicadores para sistemas fotovoltaicos, sendo que os indicadores repetidos foram agrupados em uma mesma unidade de registro, resultando em 39 unidades de registro. A especificação de cada um dos 39 indicadores, e a sua procedência, encontra-se no Quadro 16 – Apêndice B.

As unidades de registro identificadas foram transcritas para um quadro de síntese, no qual, para cada um dos 39 indicadores, foi apresentada: (i) a sua

unidade de medida, (ii) a dimensão da sustentabilidade em que se enquadra, (iii) o número de ocorrências do indicador na revisão sistemática da literatura, (iv) as referências nas quais este indicador é citado e (v) a descrição do referido indicador. O quadro de síntese dos indicadores identificados está representado no Quadro 16 – Apêndice B. A título exemplificativo, reproduz-se a descrição de um indicador identificado – Quadro 11.

Quadro 11 – Exemplo de Síntese dos Indicadores Identificados

Indicador: Eficiência Energética do Módulo	
Unidade: [%]	Dimensão: Tecnológica
Número de Ocorrências na RSL: 3	
Referências: (Ghenai; Albawab; Bettayeb, 2020; Mei; Chen, 2021; Sun <i>et al.</i> , 2019)	
Descrição: Eficiência energética do módulo fotovoltaico.	

Fonte: Autoria própria (2024).

Assim, uma vez apresentado o resultado da etapa de identificação de descritores aplicáveis a sistemas fotovoltaicos, será apresentada na próxima Seção a descrição dos resultados da etapa de seleção destes indicadores, propósito do Objetivo Específico 1 deste Relato de Tese.

6.2. RESULTADO DA SELEÇÃO DOS INDICADORES

Partindo das definições metodológica apresentadas na Seção 5.5 e das características desejáveis de um bom indicador, conforme descritas no Quadro 4 na Seção 2.6, fundamentadas em Berliner e Brimson (1988), Caldeira (2018), Callado e Fensterseifer (2010), Meadows (1998), Neely *et al.* (1997) e Tironi *et al.* (1991), utilizou-se como critério de inclusão do indicador a maioria simples (Azzini; Munda, 2020) da quantidade de características desejáveis apresentadas pelo respectivo indicador, considerando-se validado, por esse critério, o indicador que apresentasse um percentual maior do que 50% de características desejáveis, ou seja, obtivesse pelo menos 5 das 9 características avaliadas. Dos 39 indicadores previamente identificados, todos foram aprovados pelo primeiro critério de seleção, conforme apresentado no Quadro 12.

Quadro 12 – Verificação das Características Desejáveis de Bons Indicadores

Indicador	Característica Desejável									
	Seletivo	Claro	Representativo	Suficiente	Simples	Baixo Custo	Estável	Disponível	Comparativo	Total de ✓
Aceitabilidade Social	✓	✓	✓	x	x	✓	x	x	✓	5
Área Ocupada	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	9
Criação de Empregos	✓	✓	✓	x	x	✓	x	x	✓	5
Custo Nivelado de Energia (LCOE)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	9
Custo Total de Instalação	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓	8
Custo Unitário de Instalação	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	9
Direção do Pannel Fotovoltaico (Azimute)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	9
Eficiência Energética do Módulo	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	9
Eficiência Energética do Inversor	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	9
Emissão de Gases de Efeito Estufa no Ciclo de Vida	✓	✓	✓	x	x	✓	x	x	✓	5
Fator de Capacidade (FC)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	9
Fluxo de Caixa Acumulado	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	9
Inclinação do Pannel Fotovoltaico	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	9
Inovação Tecnológica	✓	x	✓	✓	x	✓	x	x	✓	5
Intensidade de Material (construção)	x	✓	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓	7
Interferência na Paisagem	✓	x	✓	✓	✓	✓	x	x	✓	6
Irradiação Global Horizontal	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	9
Maturidade Tecnológica	✓	x	✓	✓	x	✓	x	x	✓	5
Modularidade	✓	x	✓	✓	x	✓	x	x	✓	5
Operabilidade da Planta	✓	x	✓	✓	x	✓	x	x	✓	5
Poluição Sonora	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	8
Potência Nominal do Sistema	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓	8
Potencial de Acidificação (AP)	x	✓	✓	x	x	✓	✓	x	✓	5
Potencial de Integração com Tecnologias Inteligentes	✓	x	✓	✓	x	✓	x	x	✓	5
Previsibilidade de Geração (curto prazo)	✓	x	✓	✓	x	✓	x	x	✓	5
Previsibilidade do Desempenho (longo prazo)	✓	x	✓	✓	x	✓	x	x	✓	5
Produção de Eletricidade	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	9
Produção de Eletricidade na Vida Útil	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	9
Produtividade (<i>Yield</i>)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	9
Retorno Sobre o Investimento (ROI)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	9
Risco de Segurança	✓	x	✓	✓	x	✓	x	x	✓	5
Risco de Vida	✓	x	✓	✓	x	✓	x	x	✓	5

(continua)

(continuação do Quadro 12)

continuação do Quadro 12)

Indicador	Característica Desejável									
	Seletivo	Claro	Representativo	Suficiente	Simples	Baixo Custo	Estável	Disponível	Comparativo	Total de ✓
Taxa de Crescimento	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	9
Taxa de Degradação dos Módulos	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	9
Taxa de Desempenho (<i>Performance Ratio</i>)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	9
Taxa Interna de Retorno (TIR)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	9
Tempo de Retorno (<i>Payback</i>)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	9
Valor Presente Líquido (VPL)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	9
Vida Útil do Sistema	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	9

Fonte: Autoria própria (2024).

A maior dificuldade encontrada, sobretudo em relação aos indicadores qualitativos, está na falta de disponibilidade de dados e na intangibilidade de avaliação, uma vez que os critérios adotados para alimentar indicadores qualitativos são muitas vezes subjetivos e complexos (Gallopín, 1996; Meadows, 1998; Minayo, 2009). De outra parte, os indicadores quantitativos, que refletem o desempenho financeiro e tecnológico de um sistema fotovoltaico, são os que tiveram o maior número de características de um bom indicador atendidas, pois estes indicadores possuem, em sua expressiva maioria, critérios bem definidos de cálculo (Parizad; Hatziadoniu, 2019; Pawliczek; Zimmermannova, 2018; Scolari, 2019).

Ainda, reforçando tal dificuldade, Mei e Chen (2021) e Zhan e Li (2024) complementam, afirmam que os indicadores quantitativos são mensurados com uma escala numérica padronizada, e que seus dados podem ser obtidos diretamente de publicações relevantes na literatura na área, coletados por meio de dados históricos, calculados diretamente utilizando-se de fórmulas matemáticas, consultados por meio de plataformas de dados abertos ou levantados diretamente por meio de pesquisa de campo. Por outro lado, continuam esses autores, os indicadores qualitativos são alimentados geralmente a partir de julgamentos linguísticos que podem envolver incertezas como a ambiguidade linguística e a aleatoriedade no julgamento, causadas pela percepção e pelo pensamento impreciso do avaliador individual,

considerados a partir do próprio conhecimento sobre o tema; sua experiência e suas qualificações acadêmicas interferem nesse julgamento.

Ainda sobre os indicadores qualitativos, Mei e Chen (2021) e Zhan e Li (2024) acrescentam que para a avaliação desses, é necessária a transformação dos julgamentos linguísticos em dados numéricos que possam ser calculados e comparados, destacando, ainda, a dificuldade desse processo de quantificação, devido às próprias incertezas e aleatoriedades linguísticas já destacas.

Em continuidade, após os 39 indicadores terem sido aprovados pelo primeiro critério de seleção, esses foram avaliados com base nos oito Princípios de Bellagio, apresentados na Seção 2.7, visto que os Princípios orientam todo o processo de avaliação, incluindo a escolha e o desenho dos indicadores, a sua interpretação e a comunicação do resultado (Adewumi *et al.*, 2019; Butkiene *et al.*, 2024; Pintér *et al.*, 2012; The Global Development Research Center, 2023).

Das 34 questões orientadoras, 26 questões foram respondidas com *Sim* e 8 questões respondidas com *Não*, resultando em um percentual de atendimento aos Princípios de Bellagio de 76%, conforme representado na Tabela 9.

Entre os princípios com maior percentual de atendimento estão os de visão orientadora, de escopo adequado, de transparência e de comunicação efetiva. Por outro lado, os princípios de ampla participação e de continuidade e de capacidade foram os que obtiveram um menor percentual de atendimento.

Destaca-se que, diferentemente da avaliação das características desejáveis de um bom indicador, a qual foi efetuada individualmente por indicador, a avaliação com base nos oito Princípios de Bellagio foi efetuada com base no conjunto dos 39 indicadores, devido ao fato de os Princípios de *Bellagio* ajudarem a orientar o *design* e a análise geral do sistema de indicadores (Butkiene *et al.*, 2024).

Tabela 9 – Percentual de Atendimento aos Princípios de Bellagio

Princípio de Bellagio	Respostas		Atendimento ao Critério (% de sim)
	Sim	Não	
1 – Visão Orientadora	2	0	100%
2 – Considerações Essenciais	4	2	67%
3 – Escopo Adequado	4	1	80%
4 – Estrutura e Indicadores	5	2	71%
5 – Transparência	5	1	83%
6 – Comunicação Efetiva	4	0	100%
7 – Ampla Participação	1	1	50%
8 – Continuidade e Capacidade	1	1	50%
Total	26	8	76%

Fonte: Autoria própria (2024).

A etapa de seleção resultou, portanto, em 39 indicadores, divididos nas cinco dimensões propostas por Ghenai, Albawab e Bettayeb (2020), Mei e Chen (2021), Nagarkatti e Kolar (2021) e Zhan e Li (2024): (i) social, (ii) ambiental, (iii) tecnológica, (iv) recursos e (v) econômica, os quais estão representados no Quadro 13, juntamente com a sua respectiva unidade de medida ou qualificação, quando não pertinente aquela.

Quadro 13 – Quadro Referencial dos Indicadores Seleccionados

Indicador Avaliado	Unidade
Dimensão Social	
1 - Aceitabilidade Social	[qualitativo]
2 - Criação de Empregos	[empregos/MW]
3 - Risco de Segurança	[qualitativo]
4 - Risco de Vida	[qualitativo]
Dimensão Ambiental	
5 - Área Ocupada	[m²/kW]
6 - Emissão de Gases de Efeito Estufa no Ciclo de Vida	[Kg CO2-eq/kWh]
7 - Potencial de Acidificação (AP)	[kg SO2-eq]
8 - Poluição Sonora	[dB]
9 - Interferência na Paisagem	[qualitativo]
Dimensão Tecnológica	
10 - Potência Nominal do Sistema	[kWp]
11 - Eficiência Energética do Módulo	[%]
12 - Eficiência Energética do Inversor	[%]
13 - Produtividade (<i>Yield</i>)	[kWh/kWp]
14 - Taxa de Desempenho (<i>Performance Ratio</i>)	[%]
15 - Fator de Capacidade (FC)	[%]
16 - Inclinação do Painel Fotovoltaico	[°]
17 - Direção do Painel Fotovoltaico (Azimute)	[°]
18 - Taxa de Crescimento	[%/ano]
19 - Taxa de Degradação dos Módulos	[%/ano]
20 - Vida Útil do Sistema	[anos]
21 - Inovação Tecnológica	[qualitativo]
22 - Maturidade Tecnológica	[qualitativo]
23 - Modularidade	[qualitativo]
24 - Operabilidade da Planta	[qualitativo]
25 - Potencial de Integração com Tecnologias Inteligentes	[qualitativo]
Dimensão Recursos	
26 - Produção de Eletricidade	[kWh/ano]
27 - Produção de Eletricidade na Vida Útil	[kWh]
28 - Intensidade de Material (construção)	[kg/kWp]
29 - Irradiação Global Horizontal	[Wh/m².dia]
30 - Previsibilidade de Geração (curto prazo)	[qualitativo]
31 - Previsibilidade do Desempenho (longo prazo)	[qualitativo]
Dimensão Econômica	
32 - Custo Total de Instalação	[R\$]
33 - Custo Unitário de Instalação	[R\$/kWp]
34 - Fluxo de Caixa Acumulado	[R\$]
35 - Tempo de Retorno (<i>Payback</i>)	[anos]
36 - Custo Nivelado de Energia (LCOE)	[R\$/kWh]
37 - Retorno Sobre o Investimento (ROI)	[%]
38 - Valor Presente Líquido (VPL)	[R\$]
39 - Taxa Interna de Retorno (TIR)	[%]

Fonte: Autoria própria (2024).

Observou-se que a Dimensão Tecnológica foi a que obteve um maior número de indicadores selecionados – 16 indicadores, seguida das dimensões Econômica e Recursos com 8 e com 6 indicadores respectivamente. A Dimensão Ambiental obteve 5 indicadores selecionados, enquanto a Dimensão Social foi a que registrou o menor número – 4 indicadores. Verificou-se também que dos 39 indicadores, 28 são quantitativos, possuindo unidades de medida definidas, enquanto 11 são qualitativos.

Em relação às contribuições de geração fotovoltaica para o alcance dos ODS, verificou-se, conforme previamente relatado na Subseção 5.5.2, que todos os ODS são fomentados, em algum nível, pela geração fotovoltaica, de modo que, por mais indireta e sutil que seja a contribuição, ela existe e deve ser considerada em estudos correlatos (Scolari; Strauhs, 2024).

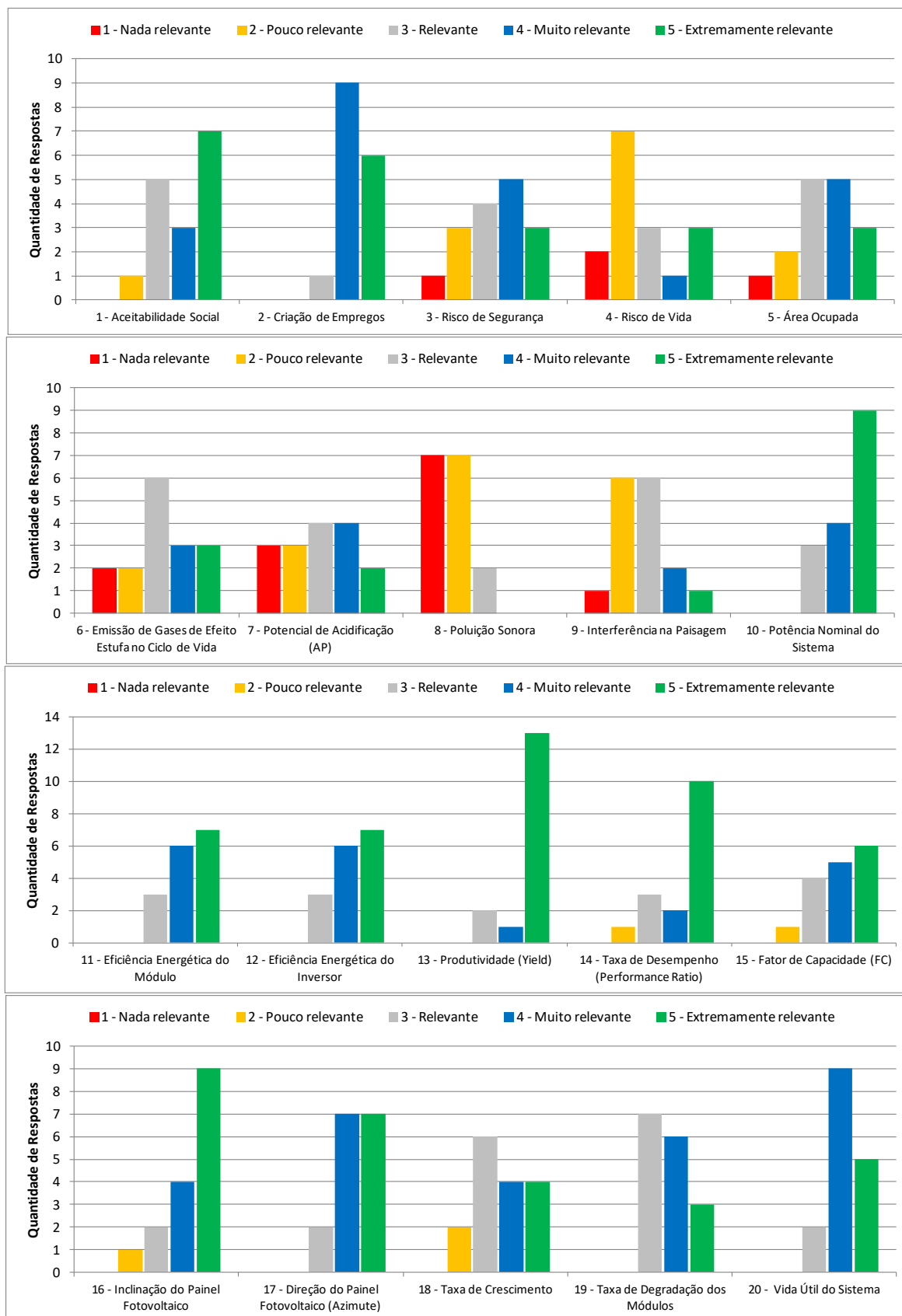
Desta forma, concluída a seleção dos indicadores, escopo do Objetivo Específico 1, estes foram submetidos a consulta a um painel de especialistas da área, cujos resultados são apresentados na Seção seguinte.

6.3. RESULTADO DA CONSULTA A PAINEL DE ESPECIALISTAS

Conforme descrito na Subseção 5.6.3, 16 especialistas participaram da aplicação do Questionário fundamentado no método Delphi, além de dois participantes que informaram não estar aptos para responder ao questionário e uma resposta de *e-mail* automática. No Questionário, os 39 indicadores levantados nas Seções 5.4 e 5.5 foram avaliados individualmente em uma escala de 1 até 5, onde 1 representa "Nada Relevante" e 5 representa "Extremamente Relevante", em relação a percepção do especialista na relevância do respectivo indicador, conforme já apresentado, para compor um quadro referencial de indicadores de sustentabilidade para sistemas fotovoltaicos, resultando em 624 julgamentos.

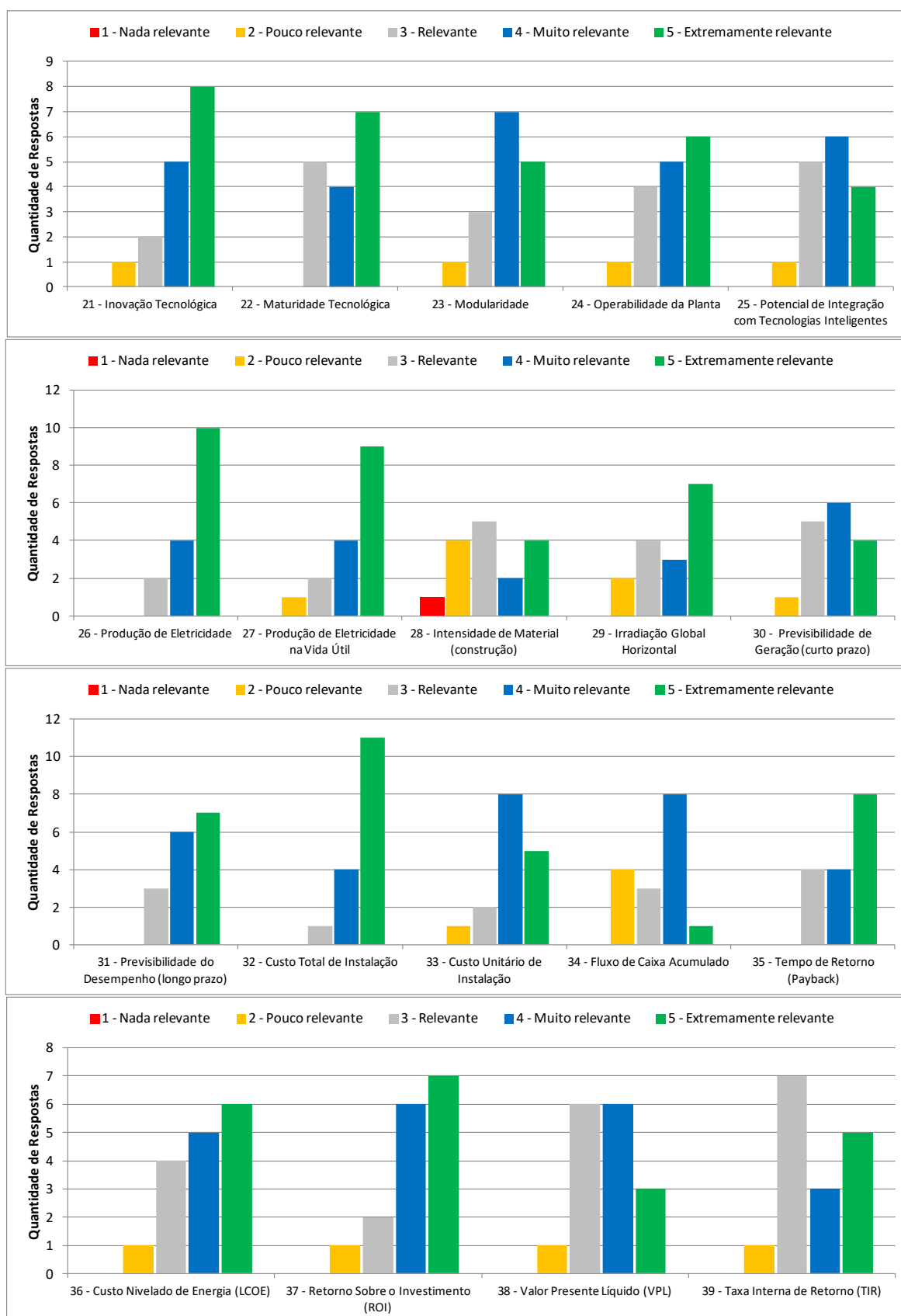
Segundo a metodologia apresentada na Subseção 5.6.4, o primeiro método estatístico utilizado para simplificar a leitura e a interpretação dos resultados do questionário foi a representação gráfica da distribuição de frequência absoluta das respostas, conforme indicado na Figura 25.

Figura 25 – Distribuição de Frequência das Respostas



(continua)

(continuação da Figura 25)



Fonte: Autoria própria (2024).

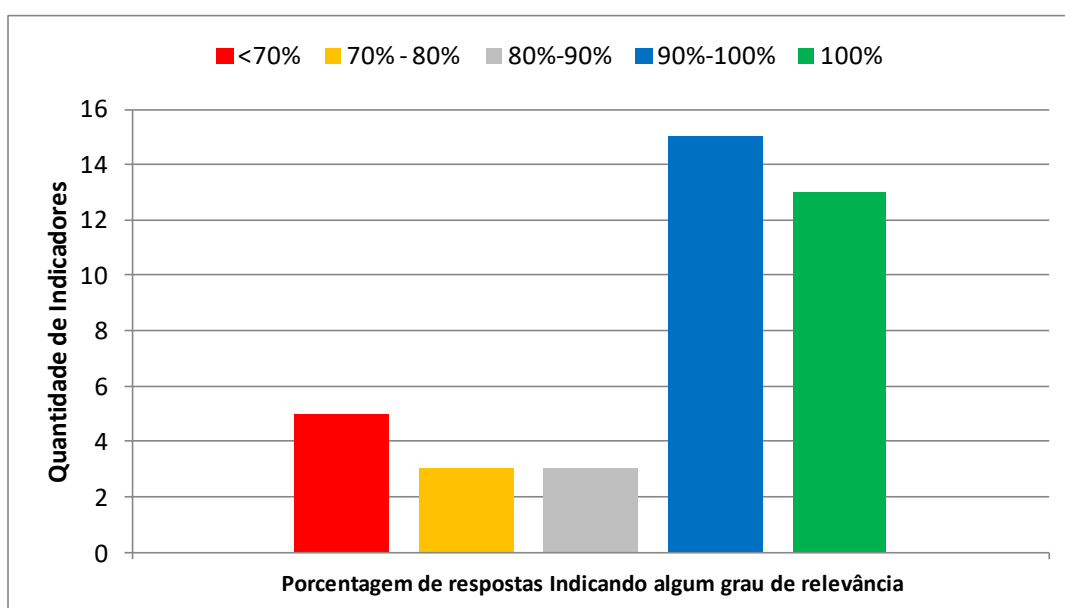
Em uma avaliação geral dos resultados, observou-se a prevalência na avaliação “Relevante”, “Muito Relevante” e “Extremamente Relevante” por parte dos especialistas. Dos 624 julgamentos efetuados, foram obtidos 142 julgamentos “Relevante”, 182 “Muito Relevante” e 225 “Extremamente Relevante”, o que indica que 88% das respostas dadas pelos avaliadores sugeriram algum tipo de relevância do indicador.

Os indicadores da Dimensão Tecnológica foram os que receberam o maior percentual de respostas sugerindo relevância dos indicadores (96%), enquanto os indicadores da Dimensão Ambiental foram os que receberam o maior percentual de respostas sugerindo pouca ou nenhuma relevância (43%).

O indicador Produtividade (*Yield*) foi o indicador que obteve o maior número de respostas “Extremamente Relevante”, obtendo 13 julgamentos nessa classificação. No lado oposto, o indicador Poluição Sonora foi o que recebeu a maior quantidade de respostas “Nada Relevante” e “Pouco Relevante”, obtendo 7 julgamentos em cada uma destas classificações.

Dos 39 indicadores, 13 obtiveram 100% das respostas indicando algum grau de relevância (“Relevante”, “Muito Relevante” e “Extremamente Relevante”), enquanto 15 indicadores obtiveram entre 90% e 100% das respostas indicando algum grau de relevância, conforme ilustrado na Figura 26.

Figura 26 – Quantidade de Indicadores e porcentagem de respostas indicando relevância.



Fonte: Autoria própria (2024).

Por meio da análise da distribuição da frequência das respostas, pôde-se observar que de modo geral os indicadores obtiveram um bom desempenho em relação ao julgamento dos especialistas. Deste modo, para se verificar a concordância dos especialistas em relação às respostas, utilizou-se a metodologia proposta por Borges (2007) e utilizada também por Santoyo (2011) e Souza (2016), cujas etapas foram abordadas na Subseção 5.6.3.

Seguindo as orientações da metodologia supracitada, o cálculo da Frequência Acumulada Absoluta dos resultados é apresentado em recorte na Tabela 10 e na íntegra na Tabela 17 – Apêndice F.

Para melhor representação das informações, o nome dos indicadores estão representados na Tabela 10, Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 14 constantes nessa Subseção e na Tabela 17, Tabela 18 e Tabela 19 constantes no Apêndice F, pelo seu número conforme correspondência com a numeração indicada na Figura 25 e na Tabela 15 constante no Apêndice E. De igual forma, as indicações de relevância: (i) Nada Relevante, (ii) Pouco Relevante, (iii) Relevante, (iv) Muito Relevante e (v) Extremamente Relevante, estão representadas pela sua posição em uma escala de 1 até 5, onde 1 representa "Nada Relevante" e 5 representa "Extremamente Relevante", respectivamente.

As frequências acumuladas apresentadas na Tabela 10 correspondem ao valor acumulado das categorias com base na frequência absoluta observada, de modo que o último valor acumulado tem necessariamente de corresponder à quantidade de especialistas consultados (16).

Tabela 10 – Recorte da Frequência Absoluta Acumulada

Número do Indicador Avaliado	Frequência Absoluta Acumulada das Respostas				
	1	1+2	1+2+3	1+2+3+4	1+2+3+4+5
1	0	1	6	9	16
2	0	0	1	10	16
3	1	4	8	13	16
4	2	9	12	13	16
5	1	3	8	13	16
[...]	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]
36	0	1	5	10	16
37	0	1	3	9	16
38	0	1	7	13	16
39	0	1	8	11	16

Fonte: Autoria própria (2024).

Avançando com a aplicação da metodologia de cálculo de Borges (2007), uma vez calculada a Frequência Acumulada Absoluta calculou-se a Frequência Acumulada Relativa, que representa o percentual de cada Frequência Acumulada Absoluta em relação ao total de 16 participantes, conforme recorte representado na Tabela 11 e íntegra dos valores apresentada na Tabela 18 – Apêndice F.

Tabela 11 – Recorte da Frequência Relativa Acumulada					
Número do Indicador Avaliado	Frequência Relativa Acumulada das Respostas				
	1	1+2	1+2+3	1+2+3+4	1+2+3+4+5
1	0	0,0625	0,375	0,5625	0,999758
2	0	0	0,0625	0,625	0,999758
3	0,0625	0,25	0,5	0,8125	0,999758
4	0,125	0,5625	0,75	0,8125	0,999758
5	0,0625	0,1875	0,5	0,8125	0,999758
[...]	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]
36	0	0,0625	0,3125	0,625	0,999758
37	0	0,0625	0,1875	0,5625	0,999758
38	0	0,0625	0,4375	0,8125	0,999758
39	0	0,0625	0,5	0,6875	0,999758

Fonte: Autoria própria (2024).

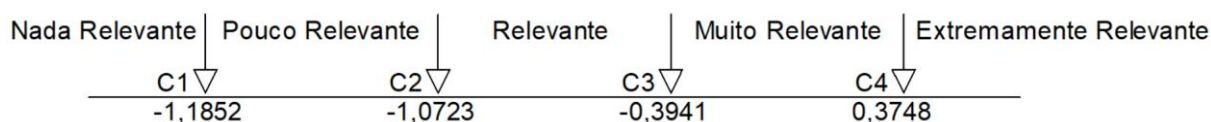
As informações apresentadas na Tabela 11 representam o peso específico de cada frequência absoluta acumulada na amostra de especialistas selecionados, de modo que na sequência procede-se à obtenção do valor percentil correspondente a cada frequência relativa acumulada utilizando a distribuição normal padrão, que é uma distribuição simétrica em forma de sino, sendo um importante modelo para avaliação de variáveis contínuas, conforme recorte apresentado na Tabela 12 e íntegra dos valores apresentada na Tabela 19 – Apêndice F (Levine; Stephan; Szabat, 2017; Morettin; Bussab, 2017).

Tabela 12 – Recorte da Frequências Relativas Acumuladas pela Inversa da Curva Normal

Nº do Indicador Avaliado	Quantis				SOMA	MÉDIA (P)	N-P
	C1	C2	C3	C4			
1		-1,5341	-0,3186	0,1573	-1,6954	-0,5651	0,3678
2			-1,5341	0,3186	-1,2155	-0,6077	0,4104
3	-1,5341	-0,6745	0,0000	0,8871	-1,3215	-0,3304	0,1330
4	-1,1503	0,1573	0,6745	0,8871	0,5686	0,1421	-0,3395
5	-1,5341	-0,8871	0,0000	0,8871	-1,5341	-0,3835	0,1861
[...]	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]
36		-1,5341	-0,4888	0,3186	-1,7043	-0,5681	0,3707
37		-1,5341	-0,8871	0,1573	-2,2640	-0,7547	0,5573
38		-1,5341	-0,1573	0,8871	-0,8043	-0,2681	0,0707
39		-1,5341	0,0000	0,4888	-1,0453	-0,3484	0,1511
PONTOS DE CORTE	-1,1852	-1,0723	-0,3941	0,3748	-38,4909	-----	-----
				N=	-0,1974		

Fonte: Autoria própria (2024).

Seguindo ainda a metodologia de Borges (2007) descrita na Subseção 5.6.3, dos valores apresentados na Tabela 12 foram obtidos os pontos de corte para localização dos indicadores estudados conforme o consenso dos especialistas. Os pontos de corte permitem determinar o grau de relevância de cada indicador avaliado de acordo com os critérios dos especialistas consultados, conforme representado na Figura 27.

Figura 27 – Pontos de Corte para a Classificação dos Indicadores.

Fonte: Adaptado de Santoyo (2011).

Uma vez obtidos os pontos de corte classificou-se cada um dos indicadores nas cinco categorias de relevância: (i) Nada Relevante, (ii) Pouco Relevante, (iii) Relevante, (iv) Muito Relevante e (v) Extremamente Relevante, utilizando como base os valores na coluna “N-P”; representando assim o consenso da resposta dos especialistas, conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 – Relevância dos Indicadores Conforme Consenso dos Especialistas

Indicador Avaliado	Consenso dos Especialistas
Dimensão Social	
1 - Aceitabilidade Social	Muito Relevante
2 - Criação de Empregos	Extremamente Relevante
3 - Risco de Segurança	Muito Relevante
4 - Risco de Vida	Muito Relevante
Dimensão Ambiental	
5 - Área Ocupada	Muito Relevante
6 - Emissão de Gases de Efeito Estufa no Ciclo de Vida	Muito Relevante
7 - Potencial de Acidificação (AP)	Muito Relevante
8 - Poluição Sonora	Nada Relevante
9 - Interferência na Paisagem	Muito Relevante
Dimensão Tecnológica	
10 - Potência Nominal do Sistema	Muito Relevante
11 - Eficiência Energética do Módulo	Muito Relevante
12 - Eficiência Energética do Inversor	Muito Relevante
13 - Produtividade (<i>Yield</i>)	Extremamente Relevante
14 - Taxa de Desempenho (<i>Performance Ratio</i>)	Extremamente Relevante
15 - Fator de Capacidade (FC)	Muito Relevante
16 - Inclinação do Painel Fotovoltaico	Extremamente Relevante
17 - Direção do Painel Fotovoltaico (Azimute)	Muito Relevante
18 - Taxa de Crescimento	Muito Relevante
19 - Taxa de Degradação dos Módulos	Relevante
20 - Vida Útil do Sistema	Muito Relevante
21 - Inovação Tecnológica	Extremamente Relevante
22 - Maturidade Tecnológica	Muito Relevante
23 - Modularidade	Extremamente Relevante
24 - Operabilidade da Planta	Muito Relevante
25 - Potencial de Integração com Tecnologias Inteligentes	Muito Relevante
Dimensão Recursos	
26 - Produção de Eletricidade	Extremamente Relevante
27 - Produção de Eletricidade na Vida Útil	Extremamente Relevante
28 - Intensidade de Material (construção)	Muito Relevante
29 - Irradiação Global Horizontal	Muito Relevante
30 - Previsibilidade de Geração (curto prazo)	Muito Relevante
31 - Previsibilidade do Desempenho (longo prazo)	Muito Relevante
Dimensão Econômica	
32 - Custo Total de Instalação	Extremamente Relevante
33 - Custo Unitário de Instalação	Extremamente Relevante
34 - Fluxo de Caixa Acumulado	Relevante
35 - Tempo de Retorno (<i>Payback</i>)	Muito Relevante
36 - Custo Nivelado de Energia (LCOE)	Muito Relevante
37 - Retorno Sobre o Investimento (ROI)	Extremamente Relevante
38 - Valor Presente Líquido (VPL)	Muito Relevante
39 - Taxa Interna de Retorno (TIR)	Muito Relevante

Fonte: Autoria própria (2024).

Observou-se pela análise do consenso, compreendido neste estudo como advindo da presença de concordância entre os especialistas, e pela classificação dos indicadores nas categorias de relevância que dos 39 indicadores avaliados 11 indicadores foram classificados como “Extremamente Relevantes”, 25 como “Muito Relevantes”, 2 como “Relevantes”, nenhum como “Pouco Relevante” e 1 como “Nada Relevante”, indicando, como já destacado, um bom desempenho dos indicadores frente ao julgamento dos especialistas.

Após a definição dos pontos de corte de classificação e da determinação das respostas de consenso dos especialistas seguindo a metodologia proposta por Borges (2007), calculou-se o Coeficiente de Concordância de Kendall (W), conforme apresentado na Tabela 20. Apesar de o Coeficiente de Concordância de Kendall calculado ter sido relativamente baixo ($W=0,00279$), ele é diferente de zero, o que indica alguma concordância entre os especialistas (Legendre, 2005, 2022).

Conforme já abordado na Subseção 5.6.4, Legendre (2005, 2010, 2022), Marcinkiewicz (2017), Sanderson e Soboroff (2007) e Wadoux e Minasny (2024) abordam as limitações do uso do Coeficiente de Concordância de Kendall, recomendando que o método seja utilizado em conjunto com outras metodologias de cálculo de concordância e destacando que o coeficiente pode não representar a realidade do estudo, assumindo valores próximos de zero mesmo quando existe forte concordância no conjunto de dados. Esse fenômeno ocorre quando existem muitos empates nas avaliações de um mesmo especialista, por exemplo, quando um determinado especialista atribui notas iguais a mais de um indicador; sendo que o empate nas avaliações é especialmente comum em conjuntos de dados onde existem muitos objetos em avaliação – 39 indicadores, e poucas avaliações possíveis para cada objeto – 5 avaliações possíveis (Marcinkiewicz, 2017).

Observou-se que nesta pesquisa esse fenômeno aconteceu com frequência, uma vez que foram avaliados 39 indicadores, e existiam somente 5 possíveis avaliações para cada indicador, ocasionando, portanto, avaliações repetidas; e podendo ser apontado como causa provável do valor relativamente baixo do Coeficiente de Concordância de Kendall calculado.

Legendre (2005, 2022) destaca ainda que limitações na análise de concordância de Kendall também podem ocorrer quando existem menos de 20 especialistas consultados, situação também presente neste estudo, no qual foram consultados 16 especialistas.

Pelos motivos citados, visando proporcionar maior robustez estatística ao resultado, utilizou-se uma segunda metodologia de cálculo da concordância, proposta por Giannarou e Zervas (2014), Latif *et al.* (2016) e Shukor e Ng (2022), descrita na Subseção 5.6.3.

Seguindo a metodologia supracitada o nível de consenso dos especialistas foi dividido em duas categorias: (i) com consenso e (ii) sem consenso, enquanto a relevância de determinado indicador foi classificada em duas categorias: (i) relevante e (ii) não relevante. O nível de consenso dos especialistas foi calculado utilizando o desvio padrão e o desvio quartil das respostas, ao passo que a relevância dos indicadores foi determinada com base na porcentagem de respostas indicando relevância e na mediana das respostas, conforme indicado na Tabela 14.

Tabela 14 – Análise do Consenso e da Relevância dos Indicadores

Nº do Indicador Avaliado	Análise do Consenso			Análise da Relevância			Resultado Final da Análise
	Desvio Padrão	Desvio Quartil	Nível de Consenso	Porcentagem relevante	Mediana	Nível de Relevância	
1	1,00	1,00	Com consenso	94%	4,0	Relevante	Aprovado
2	0,58	0,50	Com consenso	100%	4,0	Relevante	Aprovado
3	1,17	0,63	Com consenso	75%	3,5	Relevante	Aprovado
4	1,30	0,63	Com consenso	44%	2,0	Não Relevante	Reprovado
5	1,12	0,50	Com consenso	81%	3,5	Relevante	Aprovado
6	1,24	0,63	Com consenso	75%	3,0	Não Relevante	Reprovado
7	1,30	1,00	Com consenso	63%	3,0	Não Relevante	Reprovado
8	0,68	0,50	Com consenso	13%	2,0	Não Relevante	Reprovado
9	0,97	0,50	Com consenso	56%	3,0	Não Relevante	Reprovado
10	0,78	0,50	Com consenso	100%	5,0	Relevante	Aprovado
11	0,75	0,50	Com consenso	100%	4,0	Relevante	Aprovado
12	0,75	0,50	Com consenso	100%	4,0	Relevante	Aprovado
13	0,68	0,00	Com consenso	100%	5,0	Relevante	Aprovado
14	0,98	0,63	Com consenso	94%	5,0	Relevante	Aprovado
15	0,94	1,00	Com consenso	94%	4,0	Relevante	Aprovado
16	0,92	0,50	Com consenso	94%	5,0	Relevante	Aprovado
17	0,68	0,50	Com consenso	100%	4,0	Relevante	Aprovado
18	0,99	0,63	Com consenso	88%	3,5	Relevante	Aprovado
19	0,75	0,50	Com consenso	100%	4,0	Relevante	Aprovado
20	0,63	0,50	Com consenso	100%	4,0	Relevante	Aprovado
21	0,90	0,50	Com consenso	94%	4,5	Relevante	Aprovado
22	0,86	0,50	Com consenso	100%	4,0	Relevante	Aprovado
23	0,87	0,63	Com consenso	94%	4,0	Relevante	Aprovado
24	0,94	1,00	Com consenso	94%	4,0	Relevante	Aprovado
25	0,88	0,63	Com consenso	94%	4,0	Relevante	Aprovado
26	0,71	0,50	Com consenso	100%	5,0	Relevante	Aprovado
27	0,92	0,50	Com consenso	94%	5,0	Relevante	Aprovado
28	1,25	1,13	Sem consenso	69%	3,0	Não Relevante	Reprovado
29	1,09	1,00	Com consenso	88%	4,0	Relevante	Aprovado
30	0,88	0,63	Com consenso	94%	4,0	Relevante	Aprovado
31	0,75	0,50	Com consenso	100%	4,0	Relevante	Aprovado
32	0,60	0,50	Com consenso	100%	5,0	Relevante	Aprovado
33	0,83	0,50	Com consenso	94%	4,0	Relevante	Aprovado
34	0,93	0,63	Com consenso	75%	4,0	Relevante	Aprovado
35	0,83	0,63	Com consenso	100%	4,5	Relevante	Aprovado
36	0,94	1,00	Com consenso	94%	4,0	Relevante	Aprovado
37	0,88	0,50	Com consenso	94%	4,0	Relevante	Aprovado
38	0,85	0,50	Com consenso	94%	4,0	Relevante	Aprovado
39	0,97	1,00	Com consenso	94%	3,5	Relevante	Aprovado

Fonte: Autoria própria (2024).

Para esclarecimento, seguindo os critérios de Giannarou e Zervas (2014), Latif *et al.* (2016) e Shukor e Ng (2022) os seguintes valores foram utilizados para determinar o nível de consenso e de relevância dos indicadores:

- Desvio Padrão (DP):
 - $DP \leq 1$ = consenso
 - $DP > 1$ = falta de consenso
- Desvio Quartil (DQ):
 - $QD \leq 1,0$ = consenso
 - $QD > 1$ = sem consenso
- Porcentagem de Respostas Indicando Relevância (R%):
 - $R\% \geq 51\%$ = relevante
 - $R\% < 51\%$ = não relevante
- Mediana (Md):
 - $Md \geq 3,5$ = relevante
 - $Md < 3,5$ = não relevante

Conforme a orientação de Giannarou e Zervas (2014), todos os critérios de consenso e de relevância foram considerados ao mesmo tempo, sendo que um indicador somente foi classificado como “aprovado” ao ser classificado concomitantemente como “com consenso” e como “relevante” em todos os critérios.

Então, dos 39 indicadores selecionados, constatou-se que 1 indicador – Intensidade de Material – não obteve consenso de avaliação por parte dos especialistas, ou seja, os especialistas não chegaram a uma concordância em relação ao grau de relevância do indicador o Item 28, Tabela 14. Assim, foi obtido um grau de consenso total em relação aos indicadores de 97,4%, considerado satisfatório pelos estudos de Giannarou e Zervas (2014), Latif *et al.* (2016) e Shukor e Ng (2022) que indicam uma porcentagem mínima de consenso de 51% a 75%.

Assim, considerando-se que: (i) a primeira rodada de aplicação do questionário retornou nível satisfatório de consenso segundo Giannarou e Zervas (2014), Latif *et al.* (2016) e Shukor e Ng (2022); (ii) a metodologia proposta por Munaretto, Corrêa e Cunha (2013) descreve que havendo consenso entre os especialistas em qualquer rodada de aplicação da técnica parte-se para a etapa de compilação final das respostas e a apresentação dos resultados; (iii) a característica

flexível de aplicação da técnica, descrita por Hasson e Keeney (2011) e Mukherjee *et al.* (2015) permite adaptações para atender às necessidades, à realidade e às possibilidades da pesquisa em termos de recursos financeiros e de tempo; optou-se por efetuar uma única rodada de aplicação do questionário.

Ao se avaliar a relevância dos indicadores, observou-se que 6 indicadores – Risco de Vida, Emissão de Gases de Efeito Estufa, Potencial de Acidificação, Poluição Sonora, Interferência na Paisagem e Intensidade de Material – foram classificados como não relevantes pelos especialistas, sendo que o indicador “Poluição Sonora” já havia sido classificado como “Nada Relevante” conforme a metodologia de Borges (2007).

Ainda avaliando-se a relevância dos indicadores, apesar da adoção do critério de corte de $\geq 51\%$ em relação a porcentagem das respostas para um indicador ser considerado relevante, observou-se que 13 indicadores – 33% do total – obtiveram 100% de avaliação relevante e que 34 indicadores obtiveram um porcentagem de respostas relevantes superior ou igual a 75%, o que representa 87% dos indicadores avaliados.

Ao final dessa análise, dos 39 indicadores em processo de validação, 33 indicadores foram aprovados e integram o quadro final de indicadores – apresentado na Seção 6.4 – o que representa um grau de aprovação de 85%.

Destaca-se que além da classificação dos indicadores em relação ao grau de relevância, os especialistas puderam registrar comentários no formulário com sugestões para a pesquisa. Dos 16 participantes, 7 participantes registraram comentários ao final do questionário.

Além de cumprimentos e de felicitações para o pesquisador pelo estudo, foram sugeridos indicadores abordando *Grid* Zero, Inversor Híbrido, Sistema Fotovoltaico Isolado e Tarifação de Energia, porém, na etapa de delimitação da pesquisa foi definido que este estudo se restringiria a considerar os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica – SFVCR – sem *backup* de energia e enquadrados como micro e minigeração distribuída – MMGD conforme a Resolução Normativa Nº 1.059, de 7 de Fevereiro de 2023 pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2023).

Especialistas também sugeriram os indicadores: “Irradiação Global Incidente no Plano Inclinado” e “Temperatura Ambiente”, que não foram identificados pela Revisão Sistemática da Literatura.

Visando o atendimento aos indicadores “Riscos de Segurança” e “Risco de Vida” foi sugerido também o desenvolvimento de sistemas de proteção para desconexão automática do sistema fotovoltaico em caso de desastres naturais, o que, novamente foge do escopo proposto por este trabalho, portanto tal sugestão não foi incorporada, mas tal desenvolvimento pode ser indicado como um possível desdobramento de pesquisa futura.

Ainda pensando em possíveis desdobramentos futuros deste trabalho, como a modelagem dos indicadores para a criação de um índice de sustentabilidade, levantou-se também a questão de que as dimensões consideradas não possuem o mesmo número de indicadores e cada, e foi sugerido o uso de peso nos diferentes indicadores para compensar essa desigualdade, sugestões essas não incorporadas ao presente estudo, mas relatadas a título de pesquisas futuras.

A aplicação dos indicadores em um sistema fotovoltaico real também foi abordada nos comentários, o que também fica registrado como um possível trabalho futuro.

Assim, finalizada a análise dos resultados do painel de especialistas e concluída a validação dos indicadores, alvo do Objetivo Específico 2, apresenta-se na Seção seguinte o Quadro Referencial final de Indicadores de Sustentabilidade para Sistemas Fotovoltaicos, alvo do Objetivo Específico 3, conforme Proposta Conceitual da Pesquisa apresentada na Figura 13.

6.4. QUADRO REFERENCIAL DE INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Depois de concluídas as etapas de identificação, de seleção e de validação dos indicadores, elaborou-se o Quadro Referencial de Indicadores de Sustentabilidade para Sistemas Fotovoltaicos, o qual é composto pelos 33 indicadores que foram classificados como “Aprovado” na última etapa de validação - Tabela 14.

O Quadro Referencial contém as seguintes informações para cada indicador: (i) nome do indicador, (ii) unidade de medida, (iii) dimensão da sustentabilidade e (iv) descrição do indicador, conforme observa-se no Quadro 14.

Quadro 14 – Quadro Referencial de Indicadores de Sustentabilidade para Sistemas Fotovoltaicos

Indicador: Aceitabilidade Social	
Unidade: [qualitativo]	Dimensão: Social
Descrição: Aceitação da sociedade em relação à tecnologia de geração fotovoltaica.	
Indicador: Criação de Empregos	
Unidade: [empregos/MW]	Dimensão: Social
Descrição: Quantidade de empregos gerada na cadeia produtiva fotovoltaica para cada MW de potência instalada.	
Indicador: Risco de Segurança	
Unidade: [qualitativo]	Dimensão: Social
Descrição: Representa o grau de risco de ferimentos e de acidentes associados ao processo de operação da usina fotovoltaica.	
Indicador: Área Ocupada	
Unidade: [m²/kWp]	Dimensão: Ambiental
Descrição: Área ocupada por cada kWp de potência instalada do sistema fotovoltaico.	
Indicador: Potência Nominal do Sistema	
Unidade: [kWp]	Dimensão: Tecnológica
Descrição: Potência nominal do sistema fotovoltaico. Convencionalmente considera-se o somatório das potências nominais dos módulos fotovoltaicos da usina, representado em kWp.	
Indicador: Eficiência Energética do Módulo	
Unidade: [%]	Dimensão: Tecnológica
Descrição: Eficiência energética do módulo fotovoltaico.	
Indicador: Eficiência Energética do Inversor	
Unidade: [%]	Dimensão: Tecnológica
Descrição: Eficiência energética do inversor do sistema fotovoltaico.	
Indicador: Produtividade (<i>Yield</i>)	
Unidade: [kWh/kWp]	Dimensão: Tecnológica
Descrição: Representa quantos kWh de energia elétrica foram gerados para cada kWp de potência fotovoltaica. Possui melhor representatividade quando vinculada à um ano inteiro de operação, chamado <i>yield</i> anual.	
Indicador: Taxa de Desempenho (<i>Performance Ratio</i>)	
Unidade: [%]	Dimensão: Tecnológica
Descrição: Representa a capacidade real do sistema fotovoltaico de converter a energia solar disponível no plano dos painéis em eletricidade, expressando em termos percentuais a eficiência de transformação da radiação solar em eletricidade pelo sistema.	

(continua)

(continuação do Quadro 14)

Indicador: Fator de Capacidade (FC)	
Unidade: [%]	Dimensão: Tecnológica
Descrição: Representa o percentual da energia efetivamente gerada em relação ao total de energia que seria gerada caso o sistema operasse 24 horas por dia em sua potência nominal. Em outras palavras, representa a porcentagem de tempo em que o sistema está operando em sua capacidade nominal.	
Indicador: Inclinação do Painel Fotovoltaico	
Unidade: [°]	Dimensão: Tecnológica
Descrição: Ângulo formado entre o plano horizontal e o ângulo de instalação do painel fotovoltaico.	
Indicador: Direção do Painel Fotovoltaico (Azimute)	
Unidade: [°]	Dimensão: Tecnológica
Descrição: Ângulo formado entre o norte geográfico e a direção de instalação do painel fotovoltaico.	
Indicador: Taxa de Crescimento	
Unidade: [%/ano]	Dimensão: Tecnológica
Descrição: Taxa de crescimento da geração fotovoltaica em um determinado local avaliado em um determinado período.	
Indicador: Taxa de Degradação dos Módulos	
Unidade: [%/ano]	Dimensão: Tecnológica
Descrição: Taxa anual de degradação do módulo fotovoltaico.	
Indicador: Vida Útil do Sistema	
Unidade: [anos]	Dimensão: Tecnológica
Descrição: Vida útil estimada de um sistema fotovoltaico.	
Indicador: Inovação Tecnológica	
Unidade: [qualitativo]	Dimensão: Tecnológica
Descrição: O grau de inovação da tecnologia fotovoltaica em relação ao desenvolvimento sustentável, às energias renováveis, às perspectivas futuras e à acessibilidade.	
Indicador: Maturidade Tecnológica	
Unidade: [qualitativo]	Dimensão: Tecnológica
Descrição: Representa o grau de conhecimento e maturidade tecnológica nas áreas de conhecimento necessárias para a correta aplicação da tecnologia fotovoltaica.	
Indicador: Modularidade	
Unidade: [qualitativo]	Dimensão: Tecnológica
Descrição: Representa o grau de modularidade da tecnologia, ou seja, a facilidade de ampliação da capacidade da planta fotovoltaica existente por meio de inclusão de novos módulos e inversores.	

(continua)

(continuação do Quadro 14)

Indicador: Operabilidade da Planta	
Unidade: [qualitativo]	Dimensão: Tecnológica
Descrição: Grau de facilidade de operação da planta além da estabilidade de controle do sistema.	
Indicador: Potencial de Integração com Tecnologias Inteligentes	
Unidade: [qualitativo]	Dimensão: Tecnológica
Descrição: Representa o potencial de integração com o uso de tecnologias inteligentes, como sensoriamento inteligente, Internet das Coisas (IoT) e inteligência artificial, para melhorar o desempenho operacional do sistema.	
Indicador: Produção de Eletricidade	
Unidade: [kWh/ano]	Dimensão: Recursos
Descrição: Produção de eletricidade da usina durante um determinado período de tempo.	
Indicador: Produção de Eletricidade na Vida Útil	
Unidade: [kWh]	Dimensão: Recursos
Descrição: Produção de eletricidade da usina durante sua vida útil.	
Indicador: Irradiação Global Horizontal	
Unidade: [Wh/m ² .dia]	Dimensão: Recursos
Descrição: Representa a energia solar total acumulada em um intervalo de tempo que incide sobre uma superfície horizontal.	
Indicador: Previsibilidade de Geração (curto prazo)	
Unidade: [qualitativo]	Dimensão: Recursos
Descrição: Representa o grau de previsibilidade de geração de energia elétrica no curto prazo, como por exemplo, no dia ou no mês presente.	
Indicador: Previsibilidade do Desempenho (longo prazo)	
Unidade: [qualitativo]	Dimensão: Recursos
Descrição: Representa o grau de previsibilidade de desempenho da usina fotovoltaica no longo prazo, como por exemplo, no ano ou na vida útil do sistema.	
Indicador: Custo Total de Instalação	
Unidade: [R\$]	Dimensão: Econômica
Descrição: Somatório de todos os valores associados a instalação da usina fotovoltaica, incluindo projeto, material, execução, entre outros.	
Indicador: Custo Unitário de Instalação	
Unidade: [R\$/kWp]	Dimensão: Econômica
Descrição: Custo por unidade de potência instalada do sistema fotovoltaico.	

(continua)

(continuação do Quadro 14)

Indicador: Fluxo de Caixa Acumulado	
Unidade: [R\$]	Dimensão: Econômica
Descrição: Representa o saldo disponível em caixa em determinado período de análise.	
Indicador: Tempo de Retorno (<i>Payback</i>)	
Unidade: [anos]	Dimensão: Econômica
Descrição: Tempo necessário, em anos, para que um investidor recupere o seu capital inicial investido em um projeto, em uma aplicação financeira ou em um negócio.	
Indicador: Custo Nivelado de Energia (LCOE)	
Unidade: [R\$/kWh]	Dimensão: Econômica
Descrição: Relação entre todos os custos associados à instalação e à operação da usina fotovoltaica e a eletricidade estimada gerada ao longo da vida da planta.	
Indicador: Retorno Sobre o Investimento (ROI)	
Unidade: [%]	Dimensão: Econômica
Descrição: É a relação entre a quantidade de dinheiro ganho (ou perdido) como resultado de um investimento e a quantidade de dinheiro investido.	
Indicador: Valor Presente Líquido (VPL)	
Unidade: [R\$]	Dimensão: Econômica
Descrição: Determina o valor presente de pagamentos futuros descontados a uma taxa de juros apropriada, menos o custo do investimento inicial.	
Indicador: Taxa Interna de Retorno (TIR)	
Unidade: [%]	Dimensão: Econômica
Descrição: Representa a taxa de desconto que um fluxo de caixa deve ter para que seu Valor Presente Líquido (VPL) iguale-se a zero.	

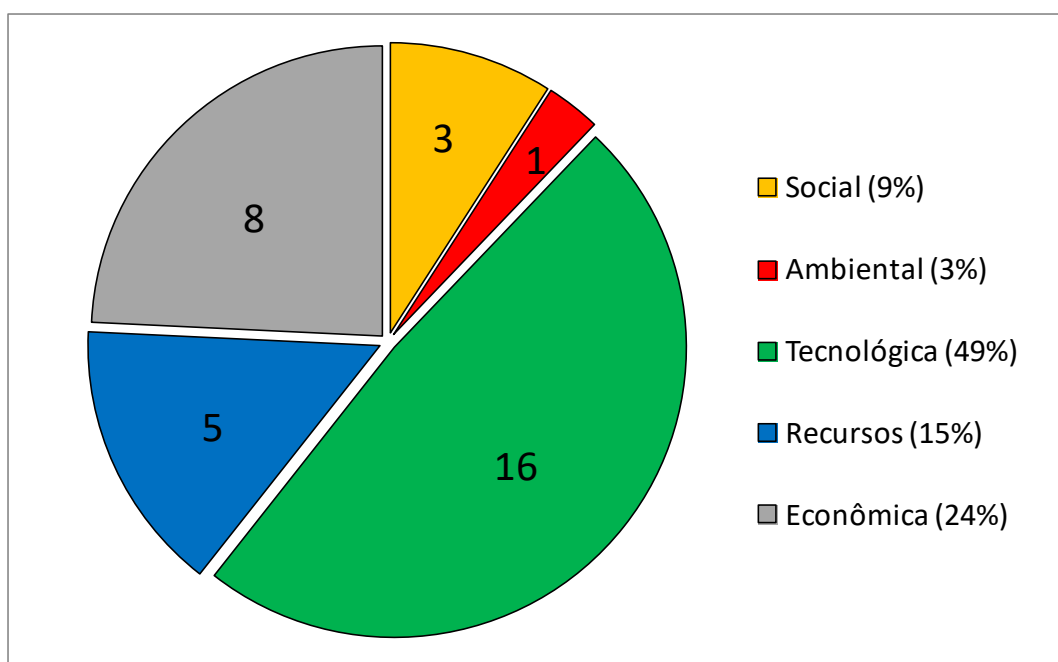
Fonte: Autoria própria (2024).

Destaca-se que a classificação dos 33 indicadores nas cinco dimensões consideradas – Social, Ambiental, Tecnológica, Recursos e Econômica – foi efetuada com base na dimensão na qual um determinado indicador estava classificado nos documentos de origem resultantes da Revisão Sistemática da Literatura (Ghenai; Albawab; Bettayeb, 2020; Mei; Chen, 2021; Nagarkatti; Kolar, 2021; Zhan; Li, 2024). Na impossibilidade de utilizar esse critério, a classificação foi efetuada por meio da percepção do presente autor em relação ao respectivo indicador.

Observou-se que a Dimensão Tecnológica foi a que obteve um maior número de indicadores constantes no Quadro Referencial – 16 indicadores, representando 49% do total, seguida das dimensões Econômica e Recursos com 8

indicadores – 28% – e com 5 indicadores – 15% – respectivamente, conforme representando na Figura 28. A Dimensão Social obteve 3 indicadores selecionados – 9% –, enquanto a Dimensão Ambiental foi a que registrou o menor número – 1 indicador – 3%. Verificou-se também que dos 33 indicadores, 24 são quantitativos, possuindo unidades de medida definidas, enquanto 9 são qualitativos.

Figura 28 – Quantidade de Indicadores por Dimensão.



Fonte: Autoria própria (2024).

Todos os indicadores previamente identificados das dimensões Tecnológica e Econômica – 24 no total – foram validados pelos especialistas e passaram a compor o Quadro Referencial final, sugerindo que estes aspectos já se encontram bem definidos e bem consolidados em relação a geração fotovoltaica, corroborando com o pressuposto levantando na Seção 1.3 deste estudo, de que a prática comum no mercado fotovoltaico seja a avaliação de viabilidade de instalação de um novo empreendimento fotovoltaico principalmente do ponto de vista de sua viabilidade técnica e financeira.

Ainda nesta linha, verificou-se que dos 5 indicadores previamente identificados para a dimensão ambiental, 4 não foram validados pelo painel de especialistas, o que demonstra que a análise ambiental da geração fotovoltaica ainda não se encontra sólida na literatura, levantando uma lacuna de pesquisa futura

compatível com a avaliação ambiental e com a elaboração de indicadores de sustentabilidade ambientais para sistemas fotovoltaicos.

De modo semelhante, foram validados 3 dos 4 indicadores previamente sugeridos para a Dimensão Social, revelando também uma lacuna de pesquisa compatível com a elaboração de estudos voltados para as implicações sociais da geração fotovoltaica em determinada região.

Assim, a distribuição da quantidade de indicadores pelas diferentes dimensões revela, de certa forma, os vieses pelos quais a geração fotovoltaica vem se consolidando: a maior ênfase se dá nas dimensões Tecnológica e Econômica e a menor nas Dimensões Social e Ambiental. Essa discussão é aprofundada na Seção 7.3 – Inferências e Pesquisas Futuras.

Finalizadas a análise e a validação dos dados e a elaboração do quadro referencial de indicadores de sustentabilidade para sistemas fotovoltaicos, apresentam-se as Considerações Finais delineadas no Capítulo 7, retomando-se a pergunta de pesquisa, os objetivos propostos e a análise final do pesquisador.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste Capítulo resgatam-se os principais achados de Tese e responde-se à pergunta de pesquisa e aos objetivos traçados. Sequencialmente, discorre-se sobre as limitações da pesquisa e as sugestões de estudos futuros.

7.1. ATENDIMENTO AOS OBJETIVOS E À PERGUNTA DE PESQUISA

Diante do cenário apresentando no capítulo introdutório deste estudo, a questão norteadora que acompanhou a condução desta pesquisa foi relacionada a **quais indicadores podem ser usados para avaliação da sustentabilidade de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, considerando-se as várias dimensões da sustentabilidade**, entendendo que indicadores são um meio de avaliar o desenvolvimento sustentável em suas diversas dimensões.

A resposta a questão de pesquisa foi possível, pois, foi elaborado um **Quadro Referencial de Indicadores de Sustentabilidade para Sistemas Fotovoltaicos**, composto por 33 indicadores de sustentabilidade, categorizados em cinco dimensões: (i) social, (ii) ambiental, (iii) tecnológica, (iv) recursos e (v) econômica, conforme apresentado no Quadro 14.

Assim, o Objetivo Geral de **Propor um conjunto de indicadores para avaliação da sustentabilidade de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica** foi cumprido por meio da elaboração do Quadro Referencial supracitado – Quadro 14.

Quanto aos Objetivos Específicos traçados, todos foram atendidos, conforme detalhado a seguir:

- **Objetivo Específico 1 – Selecionar indicadores para a elaboração de um quadro referencial de Indicadores de Sustentabilidade para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, considerando-se as variáveis da dimensão da sustentabilidade urbana.** Foi atendido primeiramente mediante a elaboração de uma análise sistemática da literatura – Seção 5.3, onde foram identificados inicialmente 39 indicadores de sustentabilidade para

sistemas fotovoltaicos, conforme resultados descritos na Seção 6.1. Em seguida, é atendido na Seção 6.2 e no Quadro 13, onde os 39 indicadores previamente identificados foram selecionados de acordo com os três critérios estabelecidos: (i) Características desejáveis de um bom indicador; (ii) Atendimento aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e (iii) Atendimento aos Princípios de Bellagio.

- **Objetivo Específico 2 - Validar os Indicadores de Sustentabilidade por meio de uma consulta a painel de especialistas.** Foi atendido por meio de uma consulta a painel de especialistas efetuada utilizando-se de aplicação questionário pelo método Delphi, de modo que dos 39 indicadores selecionados, 33 foram validados pelo método, conforme resultados apresentados na Seção 6.3 e na Tabela 14.
- **Objetivo Específico 3 - Elaborar o Quadro Referencial de Indicadores a partir da validação efetuada.** Atendido por meio do estabelecimento do Quadro Referencial de Indicadores de Sustentabilidade para Sistemas Fotovoltaicos – Quadro 14, composto pelos 33 indicadores de sustentabilidade validados e categorizados em cinco dimensões: (i) social, (ii) ambiental, (iii) tecnológica, (iv) recursos e (v) econômica.

Observa-se que, além do atendimento aos objetivos inerentes à operacionalização desta pesquisa, o presente Relato de Tese apresenta as contribuições relacionadas aos aspectos metodológicos desenvolvidos para a construção desta. A metodologia utilizada pode servir como um guia, ao ser empregada e aprimorada por outros pesquisadores no processo de busca, de seleção, de validação e de construção de quadros referenciais de indicadores de sustentabilidade para outras áreas do conhecimento, favorecendo a replicabilidade dos resultados e evidenciando, novamente, o caráter multidisciplinar da pesquisa.

Assim, consideram-se cumpridos os Objetivos Específicos traçados e respondida a Pergunta de Pesquisa formulada.

7.2. LIMITAÇÕES DA PESQUISA

A pesquisa teve com objeto central a elaboração de um quadro de indicadores de sustentabilidade para avaliação de sistemas fotovoltaicos conectados a rede elétrica. O método de coleta de dados para a seleção dos indicadores se deu exclusivamente por meio de Pesquisa Bibliográfica. Mais especificamente, a coleta de dados foi efetuada por meio da própria Revisão Sistemática da Literatura, descrita na Seção 5.3.

Trata-se, portanto, de um **recorte de análise de sistemas de recuperação** da informação com limitação na quantidade de itens de informação utilizados, o que configura uma limitação da pesquisa, muito embora, a validação dos indicadores recuperados por um painel de especialistas ofereça robustez aos resultados apresentados.

O método de validação adotado – consulta a painel de especialistas por meio de aplicação de questionário desenvolvido e aplicado adaptando-se o Método Delphi – possui as limitações descritas na Subseção 5.6.1, como: (i) a característica plástica do método e a falta de critérios únicos de aplicação, pode ser vista por críticos como um ponto fraco metodológico; (ii) risco de se criarem consensos forçados ou artificiais, em que os especialistas são induzidos a expressar uma opinião pré-estabelecida; e (iii) necessidade de adaptação do método para atender às limitações de recursos financeiros e de tempo disponíveis. Como contraponto, acredita-se que, em decorrência de ter havido uma única etapa, a artificialidade do consenso advindo de duas ou mais etapas, pode ter sido minimizada. Ressalta-se, contudo, o consenso de 97,4% obtido na primeira etapa, resultado peculiar a este estudo.

Outro aspecto que merece ser mencionado é o fato de o painel de especialistas ter rejeitado quatro dos cinco indicadores inicialmente propostos na dimensão ambiental, conforme abordado na Seção 6.4. Duas considerações podem ser levantadas para explicar esse fato: (i) os indicadores apresentados na dimensão ambiental não possuíam qualidade satisfatória para representar o fenômeno em análise, e por isso foram considerados não relevantes pelo painel de especialistas; ou (ii) o perfil médio dos especialistas consultados é caracterizado por profissionais voltados para os aspectos técnicos da geração fotovoltaica, e não necessariamente

para a área das ciências ambientais, fazendo com que suas avaliações priorizassem, mesmo que de forma implícita, o campo de estudo com o qual possuem maior familiaridade. Abre-se aqui uma possibilidade de pesquisa futura, que inclua tanto especialistas da área tecnológica, quanto especialistas da área ambiental, ao ser utilizado o Método Delphi.

De outra parte, a aplicabilidade dos indicadores qualitativos pode ser descrita como uma limitação, pois, como descrito na Seção 6.2, envolvem incertezas em relação a ambiguidade linguística e a aleatoriedade no julgamento, o que interfere na obtenção de dados para estes indicadores. Neste sentido, uma proposição para trabalhos futuros que envolva a criação de métodos para o provisionamento dos indicadores qualitativos está inserida na Seção seguinte.

Complementarmente, o recorte de pesquisa em relação ao objeto de estudo – Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica, sem *backup* de energia e enquadrados como micro e minigeração distribuída – exclui os sistemas fotovoltaicos isolados e híbridos, por exemplo, limitando o campo de aplicação do quadro referencial de indicadores.

Das limitações encontradas nesta pesquisa, abre-se a oportunidade para novos estudos, como se observa a seguir.

7.3. INFERÊNCIAS E PESQUISAS FUTURAS

Como uma primeira inferência este autor pressupõe que o conjunto de indicadores apresentados pode servir como ferramenta de gestão e de apoio aos processos de tomada de decisão no setor fotovoltaico, de modo a contribuir para o avanço desta tecnologia, possibilitando direcionar de maneira mais eficaz políticas públicas urbanas, planejamentos energéticos, programas de incentivo geração fotovoltaica, entre outros, no sentido de tornar o mercado fotovoltaico e, conseqüentemente a geração fotovoltaica como um todo, cada vez mais sustentável em suas diversas dimensões.

Salienta-se que a distribuição dos indicadores pelas cinco dimensões tratadas – Figura 28 – revela, de certa forma, os vieses com os quais a geração fotovoltaica vem se consolidando, conforme brevemente mencionado na Seção 6.4.

A maior quantidade de indicadores da Dimensão Tecnológica reflete, em certa medida, o avanço da tecnologia fotovoltaica, exemplificado com o desenvolvimento de inversores de frequência e de módulos fotovoltaicos mais eficientes, com a elaboração de inversores com menores dimensões, com pesquisas envolvendo novas técnicas produtivas e novos materiais para a produção de módulos fotovoltaicos, com o desenvolvimento de módulos fotovoltaicos com maior resistência mecânica e com menor propensão a acúmulo de sujeira, entre outros avanços.

Registra-se que os índices de mérito para geração fotovoltaica – Produtividade, Taxa de Desempenho e Fator de Capacidade – foram classificados como indicadores da Dimensão Tecnológica. Esses indicadores são parâmetros já bem definidos e consolidados na literatura, tendo por objetivo avaliar e comparar o desempenho de diferentes sistemas fotovoltaicos, refletindo, novamente, a consolidação da geração fotovoltaica como uma tecnologia a ser amplamente utilizada. Assim, observa-se que esse avanço da tecnologia fotovoltaica, se manifestou em um maior número de indicadores.

De modo semelhante, a expressiva quantidade de indicadores da Dimensão Econômica – segundo maior percentual – retrata a importância do viés econômico presente no mercado fotovoltaico e corrobora com o pressuposto levantando na Seção 1.3 deste estudo, de que o processo de decisão de instalação de um sistema fotovoltaico é pautado principalmente por fatores econômicos, sendo o estudo de viabilidade econômica decisivo neste processo. Tanto para sistemas fotovoltaicos residenciais, como para sistemas industriais e comerciais, indicadores econômicos como: Custo Total de Instalação e Tempo de Retorno, são determinantes no processo de decisão de instalação.

Outro aspecto que contribuiu para a prevalência de indicadores da Dimensão Econômica é o fato da Teoria Econômica de *per se* já ser bastante robusta e consolidada na literatura e no mercado em geral. Os indicadores econômicos já são utilizados há décadas em variadas aplicações e são, naturalmente, utilizados para a avaliação econômica de sistemas fotovoltaicos.

Observa-se ainda, que todos os indicadores previamente identificados das dimensões Tecnológica e Econômica – 24 no total – foram validados pelos especialistas e passaram a compor o Quadro Referencial final, sugerindo que estes

aspectos já se encontram bem definidos e bem consolidados em relação à geração fotovoltaica.

No lado oposto, a Dimensão Social e a Ambiental são as que tiveram um menor número de indicadores. As consequências sociais da instalação de sistemas fotovoltaicos não são exploradas intensivamente na literatura e suas decorrências e aspirações podem ser diferentes para perfis de consumidores distintos, como por exemplo, um consumidor que instala um sistema fotovoltaico visando retorno financeiro e um consumidor localizado em uma comunidade isolada que não possui acesso a eletricidade, e instala um sistema fotovoltaico como forma de ascensão à infraestrutura elétrica, o que sugere uma lacuna de pesquisa futura.

Por fim, e de modo contraditório, a Dimensão Ambiental foi a que obteve o menor número de indicadores. Diz-se contraditório pelo fato de a questão ambiental estar sempre muito atrelada a geração fotovoltaica. Apesar da discussão sobre a sustentabilidade ambiental, que tem as fontes de energia renováveis como um de seus pilares, estar presente nos discursos de difusão e de propaganda da geração fotovoltaica, ela não se sobrepôs aos aspectos econômicos, quando foram avaliadas segundo as práticas de mercado.

Da discussão apresentada neste Relato, considera-se que a pesquisa possa contribuir de três diferentes maneiras para o avanço da tecnologia fotovoltaica e para comunidade acadêmica: em uma primeira análise, como inicia-se esta Seção, o conjunto de indicadores apresentados pode servir como ferramenta de gestão e de apoio aos processos de tomada de decisão no setor fotovoltaico em diferentes instâncias.

Uma segunda contribuição está relacionada aos aspectos metodológicos da pesquisa, conforme apresentado na Seção 7.1, podendo servir de guia para que outros pesquisadores possam aprimorá-lo e utilizá-lo em aplicações nesta, ou em outras áreas de conhecimento.

Verifica-se, ainda, uma terceira contribuição da pesquisa, ao revelar os vieses de consolidação da geração fotovoltaica, conforme abordado no início desta Seção, na qual se observa que o mercado fotovoltaico se apoia principalmente nos aspectos tecnológicos e econômicos, abrindo campo para estudos nas áreas sociais e ambientais.

Nesse sentido, conforme as análises efetuadas, sugere-se como possíveis desdobramentos e estudos futuros: (i) aplicação dos indicadores propostos em

sistemas fotovoltaicos existentes, analisando-se aspectos tecnológicos, econômicos, de recursos, ambientais e sociais; (ii) realização de análise de indicadores para outros tipos de sistemas fotovoltaicos, como sistemas isolados e híbridos, por exemplo; (iii) criação de um índice de sustentabilidade para a geração fotovoltaica; (iv) desenvolvimento de tecnologias que aperfeiçoem o desempenho da geração fotovoltaica em relação a um determinado indicador; (v) elaboração de estudos com ênfase na avaliação ambiental e na elaboração de indicadores de sustentabilidade ambientais para sistemas fotovoltaicos; (vi) desenvolvimento de estudos com perfil de especialistas mais heterogêneo, abrangendo desde áreas técnicas da geração fotovoltaica, até especialistas com ênfase em aspectos ambientais; (vii) elaboração de metodologia de análise de indicadores qualitativos, criando-se meios de obtenção de dados, e a posterior transformação dos julgamentos linguísticos em valores numéricos que possam ser calculados e comparados.

Concluindo assim esse Relato de Tese, acrescenta-se que a tecnologia fotovoltaica foi, e está sendo construída, a partir do conjunto de pesquisas e de conhecimentos interdisciplinares desenvolvidos ao longo das últimas décadas. Esta pesquisa é mais uma contribuição nesse sentido, que visa fortalecer e fomentar a geração fotovoltaica e a sustentabilidade energética no ambiente urbano, tendo como foco a consolidação de um espaço ecossocioambiental harmônico para seus habitantes.

REFERÊNCIAS

ABDALAZEEM, Mohamed E.; HASSAN, Hamdy; ASAWA, Takashi; MAHMOUD, Hatem. Review on integrated photovoltaic-green roof solutions on urban and energy-efficient buildings in hot climate. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 82, p. 103919, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103919>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

ACKERMANN, Thomas; ANDERSSON, Goran; SODER, Lennart. Distributed generation: a definition. **Electric Power Systems Research**, Lausanne, v. 57, n. 3, p. 195-204, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(01\)00101-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(01)00101-8). Acesso em: 15 de outubro de 2024.

ACSELRAD, Henri. Discursos da sustentabilidade urbana. **Revista brasileira de estudos urbanos e regionais**, Campinas, n. 1, p. 79-90, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.22296/2317-1529.1999n1p79>. Acesso em: 04 de outubro de 2024.

ACSELRAD, Henri. **A Duração das Cidades: Sustentabilidade e Riscos nas Políticas Urbanas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Lamparina, 2009.

ADEWUMI, Ayomikun S.; ONYANGO, Vincent; MOYO, Dumiso; ALWAER, Husam. A review of selected neighbourhood sustainability assessment frameworks using the Bellagio STAMP. **International Journal of Building Pathology and Adaptation**, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 108-118, 2019. Disponível em: doi.org/10.1108/IJBPA-07-2018-0055. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

AFSHARI, H.; AGNIHOTRI, S.; SEARCY, C.; MEU, Jaber. Social sustainability indicators: A comprehensive review with application in the energy sector. **Sustainable Production and Consumption**, [s. l.], v. 31, p. 263-286, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.02.018>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 482, de 17 de Abril de 2012**. Brasília, 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 687, de 24 de Novembro de 2015**. Brasília, 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 15 de outubro de 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 1.000, de 7 de Dezembro de 2021**. Brasília, 2021. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 1.059, de 7 de Fevereiro de 2023**. Brasília, 2023. Disponível em:

<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.pdf>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Relação de empreendimentos com Geração Distribuída**. 2025a. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiY2VmMmUwN2QtYWFiOS00ZDE3LWI3NDMtZDk0NGI4MGU2NTkxliwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>. Acesso em: 09 de janeiro de 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Sistema de Informações de Geração da ANEEL - SIGA**. 2025b. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNGE3NjVmYjAtNDZkZC00MDY4LTliNTItMTVkZTU4NWYzYzFmliwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>. Acesso em: 09 de janeiro de 2025.

AKANDE, Adeoluwa; CABRAL, Pedro; GOMES, Paulo; CASTELEYN Sven. The Lisbon ranking for smart sustainable cities in Europe. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 44, p. 475-487, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.009>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

ALLANE, Kari; SAARI, Arto. Distributed energy generation and sustainable development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 10, n. 6, p. 539-558, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.11.004>. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

ALBINO, Vito; BERARDI, Umberto. Green Buildings and Organizational Changes in Italian Case Studies. **Business Strategy and the Environment**, Bradford, v. 21, n. 6, p. 387-400, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/bse.1728>. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

ALCOCER, Nuria H.; RUIZ, Víctor R. L.; NAVARRO, José L. A.; PEÑA, Domingo N. The Role of Environmental, Economic, and Social Dimensions of Sustainability in the Quality of Life in Spain. **Applied Research in Quality of Life**, [s. l.], v. 19, p. 1997-2014, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11482-024-10317-w>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

ALGARNI, Ayed A. S.; BHATTACHARYA, Kankar. Disco operation considering DG units and their goodness factors. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 24, n. 4, p. 1831-1840, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2030358>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

ALTUN, Ayse F.; KILIC, Muhsin. Design and performance evaluation based on economics and environmental impact of a PV-wind-diesel and battery standalone power system for various climates in Turkey. **Renewable Energy**, Oxford, v. 157, p. 424-443, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.042>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

AMAZONAS, Mauricio de C. O pluralismo da economia ecológica e a economia política do crescimento e da sustentabilidade. *In*: ENCONTRO DA SOCIEDADE

BRASILEIRA DE ECONOMIA, 8., 2009, Cuiabá. **Boletim [...]**. Brasília: Ecoeco, 2009. p. 5-12.

AMORIM, Andreia S. R. **Sustentabilidade**: entre a utopia, a prática e a estratégia empresarial. Orientadora: Clerilei Aparecida Bier. Dissertação (mestrado), Universidade do Estado de Santa Catarina, Curso de Mestrado Profissional em Administração. Florianópolis, 2009.

ANDRADE, Rui O. B.; TACHIZAWA, Takeshy; CARVALHO, Ana B. **Gestão ambiental**: enfoque estratégico aplicado ao desenvolvimento sustentável. São Paulo: Makron Books, 2000.

ANTUNES, Marcelo M. Técnica Delphi: metodologia para pesquisas em educação no Brasil. **Revista de Educação PUC-Campinas Revista de Educação PUC-Campinas**, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 63-71, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.24220/2318-0870v19n1a2616>. Acesso em: 16 de outubro de 2024.

ARNOTT, James C.; MOSER, Susanne C.; GOODRICH, Kristen A. Evaluation that counts: A review of climate change adaptation indicators & metrics using lessons from effective evaluation and science-practice interaction. **Environmental Science & Policy**, [s. l.], v. 6, p. 383-392, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.06.017>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 11704:2008 - Sistemas Fotovoltaicos - Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 10899:2020 - Energia Solar Fotovoltaica - Terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

AZZINI, Ivano; MUNDA, Giuseppe. A new approach for identifying the Kemeny median ranking. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 281, n. 2, p. 388-401, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.08.033>. Acesso em: 16 de janeiro de 2025.

BAKKES, Jan. Bellagio Sustainability Assessment and Measurement Principles (BellagioSTAMP) – Significance and Examples from International Environmental Outlooks. In: RAGGAMBY, Anneke V.; RUBIK, Frieder. (Orgs.). **Sustainable Development, Evaluation and Policy-Making**. p. 241-260. Massachusetts: Edward Elgar Publishing, 2012.

BAKSHI, Bhavik R.; FIKSEL, Joseph. The quest for sustainability: Challenges for process systems engineering. **AIChE Journal**, Hoboken, v. 49, n. 6, p. 1350-1358, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/aic.690490602>. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

BARDIN, Laurence. **Análise de conteúdo**. Lisboa: ed.70, 2016.

BARIN, Alexandre; POZZATTI, Luiz F.; CANHA, Luciane N.; MACHADO, Ricardo Q.; ABAIDE, Alzenira R.; AREND, Gustavo. Multi-objective analysis of impacts of distributed generation placement on the operational characteristics of networks for distribution system planning. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Oxford, v. 32, n. 10, p. 1157-1164, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2010.06.015>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

BAUWENS, Thomas; GOTCHEV, Boris; HOLSTENKAMP, Lars. What drives the development of community energy in Europe? The case of wind power cooperatives. **Energy Research & Social Science**, Amsterdam, v. 13, p. 136-147, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.12.016>. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

BAYNES, Timothy M.; WIEDMANN, Thomas. General approaches for assessing urban environmental sustainability. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, Amsterdam, v. 4, n. 4, p. 458-464, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.09.003>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

BEBBINGTON, Jan; JEFFREY, Unerman. Achieving the United Nations Sustainable Development Goals: An enabling role for accounting research. **Accounting, Auditing and Accountability Journal**, Bradford, v. 31, n. 1, p. 2-24, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/AAAJ-05-2017-2929>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

BENELLI, Ana Carolina. **Criação de conhecimento em acordos de cooperação interorganizacionais com uso e geração de dados abertos: caso de estudo UTFPR**. Orientadora: Faimara do Rocio Strauhs. Dissertação (mestrado), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de PósGraduação em Tecnologia e Sociedade – PPGTE. Curitiba, 2019. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/4371>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

BERARDI, Umberto. Clarifying the new interpretations of the concept of sustainable building. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 8, p. 72-78, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2013.01.008>. Acesso em: 04 de outubro de 2024.

BERKES, Fikret. Conexões institucionais transescalares. In: VIEIRA, Paulo H. F.; BERKES, Fikret; SEIXAS, Cristiana S. **Gestão integrada e participativa de recursos naturais**: conceitos, métodos e experiências. Florianópolis: Secco/Aped, 2005.

BERLINER, Callie; BRIMSON, James. A. **Cost management for today's advanced manufacturing**: the CAM-I conceptual design. Boston: Harvard Business School, 1988.

BIBRI, Simon E.; KROGSTIE, John. Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 31, p. 183-212, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.02.016>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

BICUDO, Maria A. V. A Pesquisa Interdisciplinar: uma possibilidade de construção do trabalho científico/acadêmico. **Educação Matemática Pesquisa**, São Paulo, v. 10, n. 1, p. 137-150, 2008. Disponível em: <https://revistas.pucsp.br/index.php/emp/article/view/1647>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

BIEDERMANN, Anna M.; LÓPEZ, Natalia M.; SÁENZ, José L. S.; ASIÓN-SUÑER, Laura; PÉREZ, Francisco J. G. Methodological Framework for Integrating Cultural Impact in Sustainability Assessments of Cultural Events. **Sustainability**, [s. l.], v. 16, n. 16, p. 6893, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su16166893>. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

BLOOM, Benjamin S.; ENGELHART, Mas D.; FURST, Edward J.; HILL, Walker H.; KRATHWOHL, David R. **Taxonomy Of Educational Objectives**. Nova Iorque, NY: David McKay Company, 1956.

BODANSKY, Daniel. The Paris Climate Change Agreement: A New Hope?. **The American Journal of International Law**, Cambridge, v. 110, n. 2, p. 288-319, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5305/amerjintelaw.110.2.0288>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

BOEFF, Luís Felipe. Relé de Potência Reversa. In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFRGS, XXV, 2013, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre, 2013.

BONZI, Ramón S. Meio Século de Primavera Silenciosa: um livro que mudou o mundo. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, Curitiba, v. 28, p. 207-215, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/dma.v28i0.31007>. Acesso em: 11 de outubro de 2022.

BORGES, Tomás C. **Respuestas a 16 preguntas sobre el empleo de expertos en la investigación pedagógica**. Lima: Editorial San Marcos, 2007.

BORGES, Fernando H.; TACHIBANA, Wilson K. A evolução da preocupação ambiental e seus reflexos no ambiente dos negócios: uma abordagem histórica. In: ENCONTRO NACIONAL DOS ESTUDANTES DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 15., 2005, Porto Alegre. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABEPRO, 2005. p. 5235-5242.

BÓRIO, Pâmela M. C. **Prosumer: o novo protagonista da comunicação**. Orientadora: Olga Maria Tavares da Silva. Dissertação (mestrado), Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós-Graduação em Comunicação. João Pessoa, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/4490>. Acesso em: 09 de Dezembro de 2022.

BRASIL. Senado Federal. **Relatório da Delegação do Senado Federal Destinada a Participar da Conferência das Nações Unidas sobre Assentamentos Humanos HABITAT-2 Realizada em Instambul (Turquia) Período de 03 a 14 de Junho de 1996**. Brasília, 1996. Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/sdleg-getter/documento?dm=4129750&ts=1594013016199&disposition=inline>. Acesso em: 10 de outubro de 2024.

BRASIL. Governo da República Federativa do Brasil. **iNDC - Contribuição do Brasil às Nações Unidas**. Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), 2016. Disponível em: <https://www.gov.br/mre/pt-br/arquivos/documentos/clima/brasil-indc-portugues.pdf>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

BRIDGE, Gavin; OZKAYNAK, Begum; TURHAN, Ethemcan. Energy infrastructure and the fate of the nation: Introduction to special issue. **Energy Research & Social Science**, [s. l.], v. 41, p. 1-11, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.04.029>. Acesso em: 24 de dezembro de 2024.

BRIZOLA, Jairo; FANTIN, Nádia. Revisão da literatura e revisão sistemática da literatura. **Revista De Educação Do Vale Do Arinos**, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 23-39, 2017. Disponível em: <https://periodicos.unemat.br/index.php/relva/article/view/1738>. Acesso em: 16 de outubro de 2024.

BRUNTON, Ginny; STANSFIELD, Claire; CAIRD, Jenny; THOMAS, James. Finding relevant studies. In: GOUGH, David; OLIVER, Sandy; THOMAS, James (Orgs.). **An Introduction to Systematic Reviews**. p. 107-134. Londres: Sage, 2012.

BUTKIENE, Indre S.; STREIMIKIENE, Dalia; LEKAVICIUS, Vidas; BELEZENTIS, Tomas. Comprehensive analysis of energy security indicators and measurement of their integrity. **Technological Forecasting and Social Change**, [s. l.], v. 200, p. 123167, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.123167>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

BUTTURI, M. A.; LOLLI, F.; BALUGANI, E.; GAMBERINI, R.; RIMINI, B. Distributed renewable energy generation: A critical review based on the three pillars of sustainability. **Proceedings of the Summer School Francesco Turco**, [s. l.], v. 2018, p. 179-185, 2018. Disponível em: <https://iris.unimore.it/handle/11380/1170847>. Acesso em: 10 de outubro de 2024.

CALDEIRA, Jorge. **100 indicadores da gestão: key performance indicators**. São Paulo: Grupo Almedina, 2018.

CALLADO, Aldo L. C.; FENSTERSEIFER, Jaime E. Indicadores de Sustentabilidade: uma abordagem empírica a partir de uma perspectiva de especialidades. In: SIMPÓSIO DE ADMINISTRAÇÃO DA PRODUÇÃO, LOGÍSTICA E OPERAÇÕES INTERNACIONAIS, 13., 2010, São Paulo. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: FGV, 2010.

CAMPOS, Henrique M. V. D. B.. **Geração distribuída de energia solar fotovoltaica na matriz elétrica de Curitiba e região: um estudo de caso**. Orientador: Jair Urbanetz Junior. Dissertação (mestrado), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC. Curitiba, 2016. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/2004>. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

CARDOSO, Josue M. M. **Sistemas BAPVs e BIPVs: avaliação do desempenho da integração e aplicação de módulos fotovoltaicos a elementos construtivos**. Orientadora: Lia Toledo Moreira Mota. Dissertação (mestrado), Universidade

Católica de Campinas, Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura. Campinas, 2019. Disponível em: <https://repositorio.sis.puc-campinas.edu.br/handle/123456789/15147>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

CARREÑO, Marisol J. El método Delphi: cuando dos cabezas piensan más que una en el desarrollo de guías de práctica clínica. **Revista Colombiana de Psiquiatría**, Bogotá, v. 38, n. 1, p. 185-193, 2009. Disponível em: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-74502009000100013. Acesso em: 16 de outubro de 2024.

CARSON, Rachel. **Primavera Silenciosa**. Ed. Melhoramentos, 1969.

CARVALHO, Micaele M.; MAGALHÃES, Aline S.; DOMINGUES, Edson P. Impactos econômicos da ampliação do uso de energia solar residencial em Minas Gerais. **Nova Economia**, [s. l.], v. 29, n. 2, p. 459-485, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-6351/4719>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

CASTRO, Nivalde; DANTAS, Guilherme. **Experiências Internacionais em Geração Distribuída: Motivações, Impactos e Ajustes**. Rio de Janeiro: PUBLIT, 2018.

CENEK, M.; HLAVACEK, D. Building-Integrated Photovoltaics and Urban Environment from the Perspective of Sustainable Architecture. **Earth and Environmental Science**, [s. l.], v. 290, p. 12114, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/290/1/012114>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

CENTRO DE INFORMAÇÕES DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL - UNIC Rio. **Rumo à agenda de desenvolvimento sustentável**. 2021. Disponível em: <https://unicrio.org.br/pos2015/#:~:text=Garantir%20uma%20vida%20com%20dignidade,at%C3%A9%20o%20final%20de%202015>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

CHÁVEZ, Máximo A. R.; TORRES, Tatiana Z. R. El método DELPHI como herramienta de investigación. Una revisión. **LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 3368-3383, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.56712/latam.v5i1.1842>. Acesso em: 16 de outubro de 2024.

CHEN, Guang; CHEN, Bin; DAI, Pan; ZHOU, Hao. A Sustainability-Oriented Multiobjective Optimization Model for Siting and Sizing Distributed Generation Plants in Distribution Systems. **Mathematical Modeling for Resources and Environmental Systems**, [s. l.], v. 2013, p. 291930, 2013. Disponível em: <http://doi.org/10.1155/2013/291930>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

CHEVALIER, Serge; CHOINIERE, R.; BERNIER, L.; SAUVAGEAU, Y.; MASSON, I.; CADIEUX, E. **User Guide to 40 Community Health Indicators**. Ottawa: Community Health Division, Health and Welfare Canada, 1992.

CIEGIS, Remigijus, RAMANAUSKIENE, Jolita, MARTINKUS, Bronislovas. The Concept of Sustainable Development and its Use for Sustainability Scenarios. **Inzinerine Ekonomika-Engineering Economics**, [s. l.], v. 2, n. 62, p. 28-37, 2009. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/228639830_The_Concept_of_Sustainable_Development_and_its_Use_for_Sustainability_Scenarios. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

CIULLA, Alena. Categorização e referência: uma abordagem discursiva. **Cadernos de Estudos Linguísticos**, Campinas, v. 56, n. 2, p. 247-258, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.20396/cel.v56i2.8641477>. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

COIMBRA, José de A. A. Considerações sobre a Interdisciplinaridade. In: PHILIPPI Jr., Arlindo; TUCCI, Carlos E. M.; HOGAN, Daniel J.; NAVEGANTES, Raul (Orgs.). **Interdisciplinaridade em Ciências Ambientais**. p. 52-70. São Paulo: Signus Editora, 2000.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO - CMMAD. **Our Common Future**. 1987. Disponível em: <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>. Acesso em: 04 de outubro de 2024.

CONFERÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - CNUDS. **Declaração Final da Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável (RIO + 20): O Futuro que Queremos**. 2012. Disponível em: <https://riomais20sc.ufsc.br/files/2012/07/CNUDS-vers%C3%A3o-portugu%C3%AAs-COMIT%C3%8A-Pronto1.pdf>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

CONFORTO, Edivandro C.; AMARAL, Daniel C.; SILVA, Sérgio L. Roteiro para Revisão Bibliográfica Sistemática: Aplicação no Desenvolvimento de Produtos e Gerenciamento de Projetos. In: 8º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto - CBGDP, 8., 2011, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: CBGDP, 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/267380020_Roteiro_para_Revisao_Bibliografica_Sistemica_Aplicacao_no_Deenvolvimento_de_Produtos_e_Gerenciamento_de_Projetos. Acesso em: 16 de outubro de 2024.

CONHECIMENTO E SUSTENTABILIDADE ORGANIZACIONAL - CSO. **Espelho do Grupo**. Curitiba, 2024. Disponível em: <http://dgp.cnpq.br/dgp/espelhogrupo/1435>. Acesso em: 10 de outubro de 2024.

CONNOLLY, D.; LUND, H.; MATHIESEN, B. V. Smart Energy Europe: The technical and economic impact of one potential 100% renewable energy scenario for the European Union. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 60, p. 1634-1653, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.02.025>. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - CEBDS. **O que é a COP?**. 2019. Disponível em: <https://cebds.org/o-que-e-a-cop>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

CONVENÇÃO QUADRO SOBRE MUDANÇA DO CLIMA - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Acordo de Paris**. Paris, 2015. Disponível em:

<https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-08/Acordo-de-Paris.pdf>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR - CAPES. **Documento Inicial de Área 2011 – Resumo Executivo - CACiAmb**. 2011.

COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR - CAPES. **Documento de Área – Área 49 – Ciências Ambientais**. 2019a. Disponível em: https://www.gov.br/capes/pt-br/centrais-de-conteudo/C_amb.pdf. Acesso em: 10 de outubro de 2024.

COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR - CAPES. **Documento de Área – Área 45 – Interdisciplinar**. 2019b. Disponível em: <https://www.gov.br/capes/pt-br/centrais-de-conteudo/INTERDISCIPLINAR.pdf>. Acesso em: 10 de outubro de 2024.

COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR - CAPES. **Sobre as Áreas de Avaliação**. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/capes/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/avaliacao/sobre-a-avaliacao/areas-avaliacao/sobre-as-areas-de-avaliacao/sobre-as-areas-de-avaliacao>. Acesso em: 10 de outubro de 2024.

COUTINHO, Dolores P. R.; POMPEU, Adriano M.; OLIVEIRA Jr., Marcos F. Ignacy Sachs's concepts and the contribution to studies in Local Development: a small reflection. **Interações**, Campo Grande, v.17, n. 2, p. 339-346, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.20435/1984042X2016216>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

CRESWELL, John W.; CLARK, Vicki L. **Pesquisa de Métodos Mistos**. Porto Alegre: Bookman, 2014.

DANSEREAU, Pierre. Uma preparação ética para a mudança global: prospecção ecológica e prescrição moral. In: VIEIRA, Paulo F.; RIBEIRO, Maurício A. (Orgs.). **Ecologia humana, ética e educação**. A mensagem de Pierre Dansereau. p. 299-370. Florianópolis: Aped, 1999.

DANTAS, Stefano G.; POMPERMAYER, Fabiano M. **Viabilidade Econômica de Sistemas Fotovoltaicos no Brasil e Possíveis Efeitos no Setor Elétrico**. Rio de Janeiro: Ipea, 2018. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/td_2388.pdf. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

DAYAN, Peterson. **Forma urbana e dispersão espacial da população nas cidades**. Orientador: Rômulo José da Costa Ribeiro. Tese (doutorado), Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Brasília, 2023. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/jspui/handle/10482/49728>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

DELBECQ, André L.; VAN DE VEN, Andrew H.; GUSTAFSON, David H. **Group Techniques for Program Planning: a guide to nominal and Delphi processes**. Glenview: Scott, Foresman and Co., 1975.

DENHOLM, Paul; KULCINSKI, Gerald L. Life cycle energy requirements and greenhouse gas emissions from large scale energy storage systems. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 45, n. 13-14, p. 2153-2172, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.10.014>. Acesso em: 12 de outubro de 2022.

DIAS, Reinaldo. **Gestão ambiental**: responsabilidade social e sustentabilidade. São Paulo: Atlas, 2017.

DINIZ, Eliezer M. Os Resultados da Rio +10. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 15, p. 31-35, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.7154/RDG.2002.0015.0003>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

DLOUHÁ, Jana; POSPÍŠILOVÁ, Marie. Education for Sustainable Development Goals in public debate: The importance of participatory research in reflecting and supporting the consultation process in developing a vision for Czech education. **Journal of Cleaner Production**, Oxford, v. 172, p. 4314-4327, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.145>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

DORNING, Monica A.; DIFFENDORFER, Jay E.; LOSS, Scott R.; BAGSTAD, Kenneth J. Review of indicators for comparing environmental effects across energy sources. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 14, n. 10, p. 103002, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab402d>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel P.; ANTUNES Jr.; José A. V. **Design science research**: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia. Porto Alegre: Bookman, 2015.

DURAND, R. El método Delphi y la perspectiva del hidrógeno. **Revista Metra**, [s. l.], v. 11, 1971.

ECHEVERRÍA, Hernán A.; HOTT, Irene K.. **Métodos y técnicas de investigación prospectiva para la toma de decisiones**. Chile: FUNTURO, 1990.

EDENHOFER, O.; PICHS-MADRUGA, R.; SOKONA, Y.; KADNER, S.; MINX, J. C.; *et al.* Technical Summary. In: EDENHOFER, O.; PICHS-MADRUGA, R.; SOKONA, Y.; FARAHAANI, E.; KADNER, S.; *et al.* (Orgs.). **Climate Change 2014**: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. p. 33-107. Nova Iorque, NY: Cambridge University Press, 2014.

ELKINGTON, John. Towards the Sustainable Corporation: Win-Win-Win Business Strategies for Sustainable Development. **California Management Review**, Berkeley, v. 36, n. 2, p. 90-100. 1994. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/41165746>. Acesso em: 10 de outubro de 2024.

ELKINGTON, John. Partnerships from cannibals with forks: The triple bottom line of 21st-century business. **Environmental Quality Management**, New York, v. 8, n. 1,

p. 37-51, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/tqem.3310080106>. Acesso em: 10 de outubro de 2024.

ELKINGTON, John. Enter the Triple Bottom Line. In: HENRIQUES, Adrian; RICHARDSON, Julie (Orgs.). **The Triple Bottom Line: Does it All Add Up?**. p. 1-16. New York: Earthscan, 2004.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Aspectos Fundamentais do Planejamento Energético**. Rio de Janeiro: EPE, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Fontes de Energia**. 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia>. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Plano Nacional de Energia 2050**. Brasília: MME/EPE: 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanço Energético Nacional 2022: ano base 2021**. Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanço Energético Nacional 2024: ano base 2023**. Rio de Janeiro: EPE, 2024a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-723/BEN2024.pdf>. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2024: ano base 2023**. Rio de Janeiro: EPE, 2024b. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_S%C3%ADntese_2024_PT.pdf. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2034: Caderno de Demanda de Eletricidade**. Rio de Janeiro: EPE, 2024c. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-804/topico-709/PDE%202034_Caderno_Demanda_Eletricidade_Publicacao.pdf. Acesso em: 09 de outubro de 2024.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION - EIA. **International Energy Outlook 2009**. 2009. Disponível em: <http://www.indiaenvironmentportal.org.in/files/international%20energy%20outlook.pdf>. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION - EIA. **International Energy Outlook 2018 Executive Summary**. 2018. Disponível em: https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/executive_summary.pdf. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION - EIA. **Renewable energy explained**. 2022. Disponível em: <https://www.eia.gov/energyexplained/renewable-sources/>. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

ESCANDÓN, Antonio B.; LEÓN, Esteban Z.; CEPEDA, Julio T. Incidence of Photovoltaics in Cities Based on Indicators of Occupancy and Urban Sustainability. **Energies**, [s. l.], v. 12, n. 5, p. 810, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en12050810>. Acesso em: 16 de outubro de 2024.

ESTÉVEZ, María de L. B.; GALLASTEGUI, José J. A. Su implementación en una estrategia didáctica para la enseñanza de las demostraciones geométricas. **Revista Iberoamericana de Educación**, [s. l.], v. 36, n. 7, p. 1-10, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.35362/rie3672962>. Acesso em: 16 de outubro de 2024.

EVANS, Annette; STREZOV, Vladimir; EVANS, Tim J. Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 13, n. 5, p. 1082-1088, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.03.008>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

FACCHINI, Angelo. Distributed energy resources: Planning for the future. **Nature Energy**, London, v. 2, p. 17129, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.129>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

FALAGHI, H.; SINGH, C.; HAGHIFAM, M. R.; RAMEZANI, M. DG integrated multistage distribution system expansion planning. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Oxford, v. 33, n. 8, p. 1489-1497, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2011.06.031>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

FERNANDES, Brena P. M. Ecodesenvolvimento, Desenvolvimento Sustentável e Economia Ecológica: em que sentido representam alternativas ao paradigma de desenvolvimento tradicional?. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, Curitiba, v. 23, p. 109-120, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/dma.v23i0.19246>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

FERNANDES, Valdir; RAUEN, Willian B. Sustainability: an interdisciplinary field. **Journal of Social, Technological and Environmental Science**, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 188-204, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.21664/2238-8869.2016v5i3.p188-204>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

FERNANDES, Valdir; VIEIRA, Afonso. Consumo Responsável. In: ANDREOLI, Cleverson V.; TORRES, Patrícia L. (Orgs.). **Complexidade: redes e conexões do ser sustentável**. p. 553-567. Curitiba, PR: SENAR, 2014.

FERRAZ, Ana Paula D. C. M.; BELHOT, Renato V. Taxonomia de Bloom: revisão teórica e apresentação das adequações do instrumento para definição de objetivos instrucionais. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 17, n. 2, p. 421-431, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-530X2010000200015>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

FINK, Arlene; KOSECOFF, Jacqueline; CHASSIN, Mark; BROOK, Robert H. Consensus methods: characteristics and guidelines for use. **American Journal of Public Health**, [s. l.], v. 74, n. 9, p. 979-983, 1984. Disponível em: <https://doi.org/10.2105/ajph.74.9.979>. Acesso em: 17 de outubro de 2024.

FLORES, José; GÓMEZ-LIMÓN, José A. Planificación multicriterio de explotaciones agrarias en áreas tropicales protegidas. El caso de la zona protectora Guanare-Masparro (Venezuela). **Economía Agraria y Recursos Naturales**, [s. l.], v. 6, n. 11, p. 81-108, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.7201/earn.2006.11.04>. Acesso em: 16 de outubro de 2024.

FONSECA, Juan D.; CAMARGO, Maurício; COMMENGE, Jean-Marc; FALK, Laurent; GIL, Iván D. Trends in design of distributed energy systems using hydrogen as energy vector: A systematic literature review. **International Journal of Hydrogen Energy**, Oxford, v. 44, n. 19, p. 9486-9504, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.177>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

FONSECA, Juan D.; COMMENGE, Jean-Marc; CAMARGO, Mauricio; FALK, Laurent; GIL, Iván D. Multi-criteria optimization for the design and operation of distributed energy systems considering sustainability dimensions. **Energy**, Oxford, v. 214, p. 118989, 2021a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118989>. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

FONSECA, Juan D.; COMMENGE, Jean-Marc; CAMARGO, Mauricio; FALK, Laurent; GIL, Iván D. Sustainability analysis for the design of distributed energy systems: A multi-objective optimization approach. **Applied Energy**, Amsterdam, v. 290, p. 116746, 2021b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116746>. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

FORMOLLI, Matteo; CROCE, Silvia; VETTORATO, Daniele; PAPARELLA, Rossana; SCOGNAMIGLIO, Alessandra; MAININI, Andrea G.; LOBACCARO, Gabriele. Solar Energy in Urban Planning: Lesson Learned and Recommendations from Six Italian Case Studies. **Applied Sciences**, [s. l.], v. 12, n. 6, p. 2950, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app12062950>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

FU, Yang; ZHANG, Xiaoling. Trajectory of urban sustainability concepts: A 35-year bibliometric analysis. **Cities**, London, v. 60, n. A, p. 113-123, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2016.08.003>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

GAGNON, Luc; BÉLANGER, Camille; UCHIYAMA, Yohji. Life-cycle assessment of electricity generation options: The status of research in year 2001. **Energy Policy**, Oxford, v. 30, n. 14, p. 1267-1278, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(02\)00088-5](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00088-5). Acesso em: 12 de outubro de 2024.

GALLOPÍN, Gilberto C. Environmental and sustainability indicators and the concept of situational indicators. A systems approach. **Environmental Modeling and Assessment**, Amsterdam, v. 1, p. 101-117, 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF01874899>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

GALVÃO, Taís F.; PANSANI, Thais S. A.; HARRAD, David. Principais itens para relatar Revisões sistemáticas e Meta-análises: A recomendação PRISMA. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, Brasília, v. 24, n. 2, p. 335-342, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5123/S1679-49742015000200017>. Acesso em: 16 de outubro de 2024.

GARRAÍN, Daniel; HERRERA, Israel; SERRANO, Irene, R.; LECHÓN, Yolanda; HEPBASLI, Arif; ARAZ, Mustafa; BIYIK, Emrah; YAO, Rumming; SHAHRESTANI, Mehdi; ESSAH, Emmanuel; SHAO, Li; RICO, Elena; LECHÓN, Juan L.; OLIVEIRA, Armando C. Sustainability indicators of a naturally ventilated photovoltaic façade system. **Journal of Cleaner Production**, Oxford, v. 266, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121946>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

GAZOLI, Jonas R.; VILLALVA, Marcelo G.; GUERRA, Juarez. Energia solar fotovoltaica - Introdução. **O Setor Elétrico**, [s. l.], v. 81, p. 48-59, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/261175798_Energia_Solar_Fotovoltaica_-_Introducao. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

GHENAI, Chaouki; ALBAWAB, Mona; BETTAYEB, Maamar. Sustainability Indicators for Renewable Energy Systems Using Multicriteria Decision-making Model and Extended SWARA/ARAS Hybrid Method. **Renewable Energy**, Oxford, v. 146, p.580-597, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.157>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

GIANNAROU, Lefkothea; ZERVAS, Efthimios. Using Delphi technique to build consensus in practice. **International Journal of Business Science & Applied Management**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 65-82, 2014. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10419/190657>. Acesso em: 17 de outubro de 2024.

GIBBONS, Michael; LIMOGES, Camille; NOWOTNY, Helga; SCHWARTZMAN, Simon; SCOTT, Peter; TROW, Martin. **The New Production of Knowledge: The Dynamics of Science and Research in Contemporary Societies**. London: Sage, 1994.

GIL, Antônio C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed., São Paulo, SP: Editora Atlas, 2002.

GIL, Antônio C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6. ed., São Paulo, SP: Editora Atlas, 2008.

GOLDEMBERG, José; BARBOSA, Luiz M. A Legislação Ambiental no Brasil e em São Paulo. **Revista Eco 21**, Rio de Janeiro, n. 96. Rio de Janeiro, 2004.

GOMES, Anderson. Matriz Cada Vez Mais Diversificada. **O Setor Elétrico**, v. 95, 2013. Disponível em: <https://www.osetoelettrico.com.br/matriz-cada-vez-mais-diversificada>. Acesso em: 17 de outubro de 2024.

GRIGGS, David; STAFFORD-SMITH, Mark; GAFFNEY, Owen; ROCKSTROM, Johan; OHMAN, Marcus C.; SHYAMSUNDAR, Priya; STEFFEN, Will; GLASER, Gisbert; KANIE, Norichika; NOBLE, Ian. Sustainable development goals for people and planet. **Nature**, London, v. 495, p. 305-307, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/495305a>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

GUEDES, Larissa M. **Alocação de unidades de geração distribuída considerando perdas e aspectos econômicos**. Orientador: Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira. Tese (doutorado), Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Elétrica. Brasília, 2013. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/jspui/handle/10482/14353>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

GUEDES, Josefina, A. S. **Indicadores qualitativos para avaliação do potencial semântico de portais do conhecimento de universidades**. Orientadora: Faimara do Rocio Strauhs. Tese (doutorado), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Sociedade – PPGTE. Curitiba, 2022. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/28149>. Acesso em: 16 de outubro de 2024.

GUGELMIN, Eunice E.; ROCHA, Juliana D.; CARVALHO, Mário E. G.; BERNARDO, Maristela; SILVA, Maurício J.; SANTOS, Newton M. N.; PALMIERI, Roberto H. Agenda 21 Local no Brasil. In: LITTLE, Paul E. (Orgs.). **Políticas Ambientais no Brasil**. p. 89-112. São Paulo: Peirópolis, 2003.

GUIMARÃES, Roberto P.; FONTOURA, Yuna S. dos R. Rio +20 ou Rio -20? Crônica de um Fracasso Anunciado. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. XV, n. 3, p. 19-39, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2012000300003>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

HAJER, Maarten A. Politics on the move: The democratic control of the design of sustainable technologies. **Knowledge and Policy**, [s. l.], v. 8, n. 4, p.26-39, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF02832228>. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

HARDI, Peter; ZDAN, Terrence. **Assessing Sustainable Development: Principles in Practice**. Winnipeg: International Institute for Sustainable Development - IISD, 1997.

HASSAN, Rakibul; DAS, Barun K.; HASAN, Mahmudul. Integrated off-grid hybrid renewable energy system optimization based on economic, environmental, and social indicators for sustainable development. **Energy**, Oxford, v. 250, p. 123823, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123823>. Acesso em: 16 de outubro de 2024.

HASSON, Felicity; KEENEY, Sinead. Enhancing rigour in the Delphi technique research. **Technological Forecasting and Social Change**, [s. l.], v. 78, n. 9, p. 1695-1704, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2011.04.005>. Acesso em: 16 de outubro de 2024.

HASSON, Felicity; KEENEY, Sinead; MCKENNA, Hugh. Research guidelines for the Delphi survey technique. **Journal of Advanced Nursing**, [s. l.], v. 32, n. 4, p. 1008-1015, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2648.2000.t01-1-01567.x>. Acesso em: 17 de outubro de 2024.

HENRIQUES, Justin J. Sustainability assessment and implementation design of distributed energy micro-generation for lighting in Western Kenya. *In*: 2010 IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply, 2010, Waltham, Massachusetts. **Anais [...]**. Waltham, Massachusetts, 2010. p. 443-447. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/CITRES.2010.5619789>. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

HENRIQUES, Justin J.; SCHNORR, William G. Sustainability Assessment and Implementation of a Biogas Digester System in Western Kenya. *In*: 2010 IEEE Green Technologies Conference, 2010, Grapevine, Texas. **Anais [...]**. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/GREEN.2010.5453784>. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

HEVNER, Alan R.; MARCH, Salvatore T.; PARK, Jinsoo; RAM, Sudha. Design science in information systems research. **MIS Quarterly: Management Information Systems**, v. 28, n. 1, p. 75-105, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/25148625>. Acesso em: 17 de outubro de 2024.

HIREMATH, Rahul B.; BALACHANDRA, P.; KUMAR, Bimlesh; BANSODE, Sheelratan S.; MURALI, J. Indicator-based urban sustainability - A review. **Energy for Sustainable Development**, Amsterdam, v. 17, n. 6, p. 555-563, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2013.08.004>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

HEISE, Jannis P.; ACKERSCHOTT, Adriana; SCHWENCK, Christoph; LANG, Daniel J.; WEHRDEN, , Henrik V. Making mutual learning tangible: Mixed-method Delphi as a tool for measuring the convergence of participants' reciprocal understanding in transdisciplinary processes. **Futures**, [s. l.], v. 159, p. 103365, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.futures.2024.103365>. Acesso em: 16 de outubro de 2024.

HOGAN, Daniel J. População e Meio Ambiente: a emergência de um novo campo de estudos. *In*: HOGAN, Daniel J. (Orgs.). **Dinâmica Populacional e Mudança Ambiental: cenários para o desenvolvimento brasileiro**. p. 13-57. Campinas: Unicamp, 2007. Disponível em: http://www.unfpa.org.br/Arquivos/livro_dinamica.pdf. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

HOLLING, Crawford S (Ed.). **Adaptive Environmental Assessment and Management**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 1978. Disponível em: <https://pure.iiasa.ac.at/823>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

HONDO, Hiroki. Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case. **Energy**, Oxford, v. 30, n. 11-12, p. 2042-2056, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.07.020>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

HOPWOOD, Bill; MELLOR, Mary; O'BRIEN, Geoff. Sustainable Development: Mapping Different Approaches. **Sustainable Development**, [s. l.], v. 13, n. 1, p.38-52, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/sd.244>. Acesso em: 04 de outubro de 2024.

HUETING, Roefie; REIJNDERS, Lucas. Broad sustainability contra sustainability: The proper construction of sustainability indicators. **Ecological Economics**, Amsteram, v. 50, n. 3-4, p. 249-260, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.03.031>. Acesso em: 04 de outubro de 2024.

HUGÉ, Jean; WAAS, Tom; DAHDOUNH-GUEBAS, Farid; KOEDAM, Nico; BLOCK, Thomas. A discourse-analytical perspective on sustainability assessment: interpreting sustainable development in practice. **Sustainability Science**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 187-198, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11625-012-0184-2>. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Indicadores de Desenvolvimento Sustentável - Brasil 2015**. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv94254.pdf>. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA AMBIENTAL DA AMAZÔNIA - IPAM. **Qual é o objetivo da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC)?**. 2015. Disponível em: <https://ipam.org.br/entenda/qual-e-o-objetivo-da-convencao-quadro-das-nacoes-unidas-sobre-mudanca-do-clima-unfccc/>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Global Energy & CO2 Status Report**. 2019a. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/23f9eb39-7493-4722-aced-61433cbffe10/Global_Energy_and_CO2_Status_Report_2018.pdf. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Status of Power System Transformation 2019: Power System Flexibility**. 2019b. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/00dd2818-65f1-426c-8756-9cc0409d89a8/Status_of_Power_System_Transformation_2019.pdf. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

INTERNATIONAL INSTITUTE FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT - IISD. **BellagioSTAMP: Sustainability Assessment and Measurement Principles**. 2009. Disponível em: <https://www.iisd.org/system/files/2021-08/bellagio-stamp-brochure.pdf>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY - IRENA. **Global Energy Transformation - A Roadmap to 2050**. 2018. Disponível em: <https://www.irena.org/>

/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Report_GET_2018.pdf.
Acesso em: 14 de outubro de 2024.

IZQUIERDO, Juan J. P. Los Índices de Sostenibilidad Ambiental Urbana como Herramienta para el Desarrollo de las Ciudades. **Arbor**, Madrid, v. 198, n. 803-804, p. a645, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3989/arbor.2022.803-804012>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

JACOBI, Roberto P. O Brasil depois da Rio +10. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 15, p. 19-29, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.7154/RDG.2002.0015.0002>. Acesso em: 11 de Outubro de 2024.

JONG, Eileen; VIJGE, Marjanneke J. From Millennium to Sustainable Development Goals: Evolving discourses and their reflection in policy coherence for development. **Earth System Governance**, [s. l.], v. 7, p. 100087, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.esg.2020.100087>. Acesso em: 04 de outubro de 2024.

KAREKEZI, Stephen; LATA, Kusum; COELHO, Suani T. Traditional Biomass Energy: Improving its Use and Moving to Modern Energy Use. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE FOR RENEWABLE ENERGIES, 2004, Bonn. **Anais [...]**. Bonn: Renewable Energies, 2004.

KLIGERMAN, Débora C.; VIELA, Heliana; CARDOSO, Telma A. O.; COHEN, Simone C.; SOUSA, Denise; ROVERE, Emílio. Sistemas de indicadores de saúde e ambiente em instituições de saúde. **Ciência e Saúde Coletiva**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 199-211, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-81232007000100023>. Acesso em: 08 de novembro de 2024.

KLOPP, Jacqueline M.; PETRETTA, Danielle L. The urban sustainable development goal: Indicators, complexity and the politics of measuring cities. **Cities**, London, v. 63, p. 92-97, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2016.12.019>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

KUANG, Yonghong; ZHANG, Yongjun; ZHOU, Bin; LI, Canbing; CAO, Yijia; LI, Lijuan; ZENG, Long. A review of renewable energy utilization in islands. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 59, p. 504-513, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.014>. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

KUMAR, Abhishek; DENG, Yan; HE, Xiangning; KUMAR, Praveen. A Multi Criteria Decision based rural electrification system. *In*: IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2016, Florence, Italy. **Anais [...]**. Florence, Italy, 2016. p. 4025-4030. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7793640>. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

KUMAR, Nallapaneni M.; CHOPRA, Shauhrat S.; MALVONI, Maria; ELAVARASAN, Rajvikram M.; DAS, Narottam. Solar Cell Technology Selection for a PV Leaf Based on Energy and Sustainability Indicators - A Case of a Multilayered Solar Photovoltaic Tree. **Energies**, [s. l.], v. 13, n. 23, p. 6439, 2020. Disponível em: <http://doi.org/10.3390/en13236439>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

LAJARA, Marco B.; FALCÓ, Javier M.; GARCÍA, Eduardo S.; TUDELA, Luis A. M. Analyzing the Role of Renewable Energy in Meeting the Sustainable Development Goals: A Bibliometric Analysis. **Energies**, [s. l.], v. 16, n. 7, p. 3137, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en16073137>. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

LAMBERT, Rosebud J.; SILVA, Patrícia P. The challenges of determining the employment effects of renewable energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 16, n. 7, p. 4667-4674, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.072>. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

LANDETA, Rodriguez J. **El método Delphi**: una técnica de previsión para La incertidumbre. Barcelona: Ariel, 1999.

LARIVIÈRE, Isabelle; LAFRANCE, Gaetan. Modelling the electricity consumption of cities: effect of urban density. **Ecological Economics**, Guildford, v. 21, n. 1, p. 53-66, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0140-9883\(98\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0140-9883(98)00007-3). Acesso em: 11 de outubro de 2024.

LATIF, Rusnani A.; MOHAMED, Rasidah; DAHLAN, Akehsan H.; NOR, Mohd Z. M. Using Delphi Technique: Making Sense of Consensus in Concept Mapping Structure and Multiple Choice Questions (MCQ). **Education in Medicine Journal**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 89-98, 2016. Disponível em: <http://doi.org/10.5959/eimj.v8i3.421>. Acesso em: 17 de outubro de 2024.

LE BLANC, David. Towards Integration at Last? The Sustainable Development Goals as a Network of Targets. **Sustainable Development**, Chichester, v. 23, p. 176-187, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/sd.1582>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

LEAL FILHO, Walter; AZEITEIRO, Ulisses; ALVES, Fátima; PACE, Paul; MIFSUD, Mark; BRANDLI, Luciana; CAEIRO, Sandra S.; DISTERHEFT, Antje. Reinventing the sustainable development research agenda: the role of the sustainable development goals (SDG). **International Journal of Sustainable Development and World Ecology**, Abingdon, v. 25, n. 2, p. 131-142, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/13504509.2017.1342103>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

LEFF, Enrique. Complexidade, Interdisciplinaridade e Saber Ambiental. In: PHILIPPI Jr., Arlindo; TUCCI, Carlos E. M.; HOGAN, Daniel J.; NAVEGANTES, Raul (Orgs.). **Interdisciplinaridade em Ciências Ambientais**. p. 19-51. São Paulo: Signus Editora, 2000.

LEGENDRE, Pierre. Species associations: the Kendall coefficient of concordance revisited. **Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 226-245, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1198/108571105X46642>. Acesso em: 26 de dezembro de 2024.

LEGENDRE, Pierre. Coefficient of concordance. In: SALKIND, Neil J. (Orgs.). **Encyclopedia of Research Design**. p. 164-169. Los Angeles: SAGE Publications, Inc., 2010.

LEGENDRE, Pierre. Coefficient of concordance. In: FREY, Bruce B. (Orgs.). **The SAGE Encyclopedia of Research Design**. p. 219-222. Thousand Oaks: SAGE Publications, Inc., 2022.

LENZEN, Manfred. Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 49, n. 8, p. 2178-2199, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.01.033>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

LEVINE, David M.; STEPHAN, David F.; SZABAT, Kathryn A. **Estatística - Teoria e Aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

LI, Weiwei; YI, Pingtao. Assessment of city sustainability - Coupling coordinated development among economy, society and environment. **Journal of Cleaner Production**, Oxford, v. 256, n. 120453, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120453>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

LI, Xingzhi; LIM, Ming K.; NI, Du; ZHONG, Bo; XIAO, Shi; HAO, Haitian. Sustainability or continuous damage: A behavior study of prosumers' electricity consumption after installing household distributed energy resources. **Journal of Cleaner Production**, Oxford, v. 264, p. 121471, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121471>. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

LINSTONE, Harold, A.; TUROFF, Murray. **The Delphi Method: techniques and Applications**. Canada: Addison-Wesley, 1975.

LORA, Electo E. S.; HADDAD, Jamil. **Geração distribuída : aspectos tecnológicos, ambientais e institucionais**. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

MAANI, Thomas; CELIK, Ilke; HEBEN, Michael J.; ELLINGSON, Randall J.; APUL, Defne. Environmental impacts of recycling crystalline silicon (c-Si) and cadmium telluride (CDTE) solar panels. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 735, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138827>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

MAGRINI, Alessandra. Política e Gestão Ambiental: conceitos e instrumentos. **Revista Brasileira de Energia**, São Paulo, v. 8, n. 2, 2001. Disponível em: <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/view/151/134>. Acesso em: 04 de outubro de 2024.

MAHMOUDI, Sajjad; HUDA, Nazmul; BEHNIA, Masud. Environmental impacts and economic feasibility of end of life photovoltaic panels in Australia: A comprehensive assessment. **Journal of Cleaner Production**, Oxford, v. 260, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120996>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

MAIA, Andrei G.; PIRES, Paulo S. Uma compreensão da sustentabilidade por meio dos níveis de complexidade das decisões organizacionais. **Revista de Administração Mackenzie**, São Paulo, v. 12, n. 3, p. 177-206, 2001. Disponível em:

<https://doi.org/10.1590/S1678-69712011000300008>. Acesso em: 10 de outubro de 2024.

MAKRAM, Ahmed; MORAD, Mohammed; SAYED, Amr; NAYEL, Mohamed. Assessment of PV Penetration Impacts on Assiut International Airport Long Distribution Feeder Using Multi-Objective Performance Index. *In*: 22ND INTERNATIONAL MIDDLE EAST POWER SYSTEMS CONFERENCE, 2021, Assiut University, Egypt. **Anais [...]**. Assiut: MEPCON, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/MEPCON50283.2021.9686269>. Acesso em: 16 de outubro de 2024.

MALHEIROS, Tadeu F.; PHILIPPI Jr., Arlindo; COUTINHO, Sonia M. V. Agenda 21 Nacional e Indicadores de Desenvolvimento Sustentável: Contexto Brasileiro. **Saúde e Sociedade**, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 7-20, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-12902008000100002>. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

MARCINKIEWICZ, Edyta. Pension systems similarity assessment: An application of Kendall's W to statistical multivariate analysis. **Contemporary Economics**, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 303-314, 2017. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10419/195493>. Acesso em: 26 de dezembro de 2024.

MARCONI, Marina D. A.; LAKATOS, Eva M. **Técnicas de Pesquisa**: planejamento e execução de pesquisas; amostragens e técnicas de pesquisa; elaboração, análise e interpretação de dados. 5 ed., São Paulo, SP: Editora Atlas, 2002.

MARCONI, Marina D. A.; LAKATOS, Eva M. **Fundamentos da Metodologia Científica**. 5 ed., São Paulo, SP: Editora Atlas, 2003.

MARINI, José A.; ROSSI, Luiz A. Sistematização do dimensionamento técnico e econômico de sistemas fotovoltaicos isolados por meio de programa computacional. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 67-75, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162005000100008>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

MARRONI, Paola; FIUME, Federico; LAUDANI, Antonino; MONTELLA, Ilaria; PALERMO, Martina; FULGINEI, Francesco R. Distributed Energy Systems: Constraints and Opportunities in Urban Environments. **Energies**, [s. l.], v. 16, p. 2718, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en16062718>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

MARTENS, Pim. Sustainability: Science or Fiction? **Sustainability: Science, Practice and Policy**, v. 2, n. 1, p. 36-41, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15487733.2006.11907976>. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

MATTAR NETO, Jorge; KRÜGER, Cláudio M.; DZIEDZIC, Maurício. Análise de indicadores ambientais no reservatório do Passaúna. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 205-213, 2009. Disponível em:

<https://doi.org/10.1590/S1413-41522009000200008>. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

MAYER, Martin J.; SZILÁGYI, Artúr; GRÓF, Gyula. Environmental and economic multi-objective optimization of a household level hybrid renewable energy system by genetic algorithm. **Applied Energy**, Amsterdam, v. 269, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115058>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

MCARTHUR, John W.; RASMUSSEN, Krista. Change of pace: Accelerations and advances during the Millennium Development Goal era. **World Development**, Oxford, v. 105, p. 132-143, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2017.12.030>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

MCCOLLUM, David L.; ECHEVERRI, Luis G.; BUSCH, Sebastian; PACHAURI, Shonali; PARKINSON, Simon; ROGELJ, Joeri; KREY, Volker; MINX, Jan C.; NILSSON, Mans; STEVANCE, Anne-Sophie; RIAHI, Keywan. Connecting the sustainable development goals by their energy inter-linkages. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 13, n. 3, p. 033006, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaafe3>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

MCKENNA, R.; BERTSCH, V.; MAINZER, K.; FICHTNER, W. Combining local preferences with multi-criteria decision analysis and linear optimization to develop feasible energy concepts in small communities. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 268, n. 3, p. 1092-1110, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.01.036>. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

MCQUEEN, David; NOACK, Horst. Health promotion indicators: current status, issues and problems. **Health Promotion International**, Oxford, v. 3, n. 1, p. 117-125, 1988. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/heapro/3.1.117>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

MEADOWS, Donella. **Indicators and Information Systems for Sustainable Development**. Hartland Four Corners, VT: The Sustainability Institute, 1998. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/261697104_Indicators_and_information_systems_for_sustainable_development. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

MEADOWS, Donella H.; MEADOWS, Dennis L.; RANDERS, Jorgen; BEHRENS III, William W. **The Limits to Growth: A Report for The Club of Rome's Project on The Predicament of Mankind**. Nova Iorque: Universe Books, 1972.

MEBRATU, Desta. Sustainability and Sustainable Development: Historical and conceptual review. **Environmental Impact Assessment Review**, Nova Iorque, v. 18, n. 6, p. 493-520, 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(98\)00019-5](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(98)00019-5). Acesso em: 11 de outubro de 2024.

MEGA, Voula; PEDERSEN, Jorn. **Urban Sustainability Indicators**. Dublin: Eurofound, 1998.

MEI, Mei; CHEN, Zhihua. Evaluation and selection of sustainable hydrogen production technology with hybrid uncertain sustainability indicators based on rough-fuzzy BWM-DEA. **Renewable Energy**, Oxford, v. 165, n. 1, p. 716-730, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.051>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

MEIRELES, Magali R. G.; CENDÓN, Beatriz V. Evaluating China's urban environmental sustainability with Data Envelopment Analysis. **Aplicação prática dos processos de análise de conteúdo e de análise de citações em artigos relacionados às Redes Neurais Artificiais.**, v. 15, n. 2, p. 77-93, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.5433/1981-8920.2010v15n2p77>. Acesso em: 16 de outubro de 2024.

MELLO, Leonardo F. **Orçamento Participativo e Agenda 21 Local: uma proposta ambiental estratégica para Campinas, SP.** Orientadora: Emilia Rutkowski. Dissertação (mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/257298339_Orcamento_Participativo_e_Agenda_21_Local_uma_proposta_ambiental_estrategica_para_Campinas_SP. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

MELLO, Leonardo, F.; HOGAN, Daniel J. População, Consumo e Meio Ambiente. In: HOGAN, Daniel J. (Orgs.). **Dinâmica Populacional e Mudança Ambiental: cenários para o desenvolvimento brasileiro.** p. 59-72. Campinas: Unicamp, 2007. Disponível em: http://www.unfpa.org.br/Arquivos/livro_dinamica.pdf. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

MILLER, Tyler G.; SPOOLMAN, Scott E. **Ciência Ambiental.** São Paulo: Cengage Learning, 2021.

MINAYO, Maria C. S. Construção de Indicadores Qualitativos para Avaliação de Mudanças. **Revista Brasileira de Educação Médica**, [s. l.], v. 33, n. 1, p. 83-91, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-55022009000500009>. Acesso em: 17 de outubro de 2024.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT). **Livro Azul da 4ª Conferência Nacional de Ciência e Tecnologia e Inovação para o Desenvolvimento Sustentável.** Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010. Disponível em: <http://livroaberto.ibict.br/handle/1/677>. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Energia Solar no Brasil e no Mundo – Ano de Referência 2015.** Brasília: SPE/MME, 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Energia Solar no Brasil e no Mundo – Ano de Referência 2016.** Brasília: SPE/MME, 2017.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Convenção de Viena e Protocolo de Montreal.** 2015. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/protecao-da->

camada-de-ozonio/convencao-de-viena-e-protocolo-de-montreal.html Acesso em: 11 de outubro de 2024.

MOHD, Saidatulakmal; LATIFF, Abdul R. A.; AZHAR, Sharifah N. F. S. Research Impact Assessment on Sustainable Development Goals in Higher Education Institutions: A Qualitative Study. **SAGE Open**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 1-21, 2024. Disponível em: doi.org/10.1177/21582440241281095. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

MOLDAN, Bedrich; JANOUSHOVÁ, Svatava; HÁK, Tomás. How to understand and measure environmental sustainability: Indicators and targets. **Ecological Indicators**, New York, v. 17, p. 4-13, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.04.033>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

MONTIBELLER FILHO, Gilberto. Ecodesenvolvimento e desenvolvimento sustentável; conceitos e princípios. **Textos de Economia**, Florianópolis, v. 4, n. 1, p. 131-142, 1993. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/economia/article/view/6645>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

MOREIRA, Herivelto; CALEFFE, Luiz Gonzaga. **Metodologia para o Professor Pesquisador**. Rio de Janeiro: DP&A, 2006.

MOREIRA, Herivelto; CALEFFE, Luiz Gonzaga. Os Desafios do Ensino da Disciplina de Metodologia da Pesquisa na Pós-Graduação. **Meta: Avaliação**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 9, p. 244-257, 2011. Disponível em: <https://revistas.cesgranrio.org.br/index.php/metaavaliacao/article/view/99>. Acesso em: 10 de outubro de 2024.

MOREIRA, Miguel A. L.; COSTA, Igor P. A.; PEREIRA Jr, Enderson L.; OLIVEIRA, Thaís E. S. *et al.* Deciphering Sustainable Development: A Global Multi-Criteria Analysis Through Sustainability Indicators. **Procedia Computer Science**, [s. l.], v. 242, p. 859-866, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.08.215>. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

MORETTIN, Pedro A.; BUSSAB, Wilton O. **Estatística básica**. São Paulo: Saraiva, 2017.

MORIN, Edgar. **Ciência com consciência**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010.

MORSE, Elizabeth. **Non-Renewable Energy**. 2024. Disponível em: <https://education.nationalgeographic.org/resource/non-renewable-energy>. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

MOVIMENTO NACIONAL ODS. **Aprendendo com os Objetivos do Milênio (ODM)**. 2020. Disponível em: <https://movimentoods.org.br/agenda-2030/>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

MOVIMENTO NACIONAL ODS. **Os 5 ps da Sustentabilidade**. 2022. Disponível em: <https://sp.movimentoods.org.br/os-5-ps-da-sustentabilidade/>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

MUKHERJEE, Nibedita; HUGÉ, Jean; SUTHERLAND, William J.; MCNEILL, Jeffrey; OPSTAL, Maarten V.; DAHDOUNH-GUEBAS, Farid; KOEDAM, Nico. The Delphi technique in ecology and biological conservation: applications and guidelines.

Methods in Ecology and Evolution, [s. l.], v. 6, n. 9, p. 1097-1109, 2015.

Disponível em: <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12387>. Acesso em: 16 de outubro de 2024.

MUNARETTO, Lorimar F.; CORRÊA, Hamilton L.; CUNHA, Júlio A. C.. A study on the characteristics of the Delphi method and focus group as techniques to obtain data in exploratory research. **Revista de Administração da UFSM**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 9-24, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/198346596243>. Acesso em: 16 de outubro de 2024.

NADERIPOUR, Amirreza; ABDUL-MALEK, Zulkurnain; NASRI, Shohreh; NOWDEH, Saber A.; KAMYAB, Hesam; CHELLIAPAN, Shreeshivadasan; MUSTAFA, Mohd W. B.; ZIN, Abdullah M. Novel Designing Framework of Stand-alone and Grid-connected Hybrid Photovoltaic/Wind/Battery Renewable Energy System Considering Reliability, Cost and Emission Indices. **Chemical Engineering Transactions**, Milano, v. 83, p. 565-570, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3303/CET2183095>. Acesso em: 16 de outubro de 2024.

NAGARKATTI, Arun; KOLAR, Ajit K. Life Cycle Based Sustainability Index of Coal Power Plants in India. **International Journal of Sustainable Development and Planning**, Edmonton, Canada, v. 16, n. 2, p. 237-249, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.18280/ijstdp.160204>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

NAKANO, Alvaro. **Simulação de desempenho energético de tecnologias fotovoltaicas em fachada de edifício no município de São Paulo**. Orientador: Racine Tadeu Araújo Prado. Dissertação (mestrado), Universidade de São Paulo. São Paulo, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.3.2017.tde-10082017-112621>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

NARLOCH, Charles; MACHADO, Deusana M. C.; SCHEINER, Teresa. Musealização da natureza e branding parks: espetacularização, mitificação ou sustentabilidade?. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas**, Belém, v. 14, n. 3, p. 981-1001, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1981.81222019000300015>. Acesso em: 08 de novembro de 2024.

NATIONAL GEOGRAPHIC SOCIETY. **Nonrenewable Resources**. 2023. Disponível em: <https://education.nationalgeographic.org/resource/nonrenewable-resources>. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

NATIONAL GEOGRAPHIC SOCIETY. **Renewable Resources**. 2024. Disponível em: <https://education.nationalgeographic.org/resource/renewable-resources>. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

NEELY, Andy; RICHARDS, Huw; MILLS, John; PLATTS, Ken; BOURNE, Mike. Design Performance Measure: a Structure Approach. **International Journal of Operation and Production Management**, Bradford, v.17, n. 11, p. 1131-1152, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/01443579710177888>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

NEGREIROS, Iara; FRANCISCO, Ana C. C.; FENGLER, Felipe H.; FARIA, Gustavo; PINTO, Luciana G. P.; TOLOTTO, Maurício; ROGOSCHEWSKI, Raquel B.; ROMANO, Regiane R.; NETTO, Roberto S. Smart Campus® as a living lab on sustainability indicators monitoring. In: 2020 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2), 2020, Piscataway, New Jersey. **Anais [...]**. Piscataway, New Jersey, 2020. p. 1-5. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ISC251055.2020.9239017>. Acesso em: 16 de outubro de 2024.

NERINI, Francesco F.; TOMEI, Julia; SENG TO, Long; BISAGA, Iwona; PARIKH, Priti; BLACK, Mairi; BORRION, Aiduan; SPATARU, Catalina; CASTAN-BROTO, Vanesa; ANANDARAJAH, Gabriel; MILLIGAN, Ben; MULUGETTA, Jacob. Mapping synergies and trade-offs between energy and the Sustainable Development Goals. **Nature Energy**, London, v. 3, p. 10-15, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41560-017-0036-5>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

NILSSON, Mans; GRIGGS, Dave; VISBECK, Martin. Map the interactions between Sustainable Development Goals. **Nature**, London, v. 534, p. 320-322, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/534320a>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

NONAKA, Ikujiro; KONNO, Noboru. The concept of “ba”: building a foundation for knowledge creation. **California Management Review**, v. 40, n. 3, p. 40-54, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/41165942>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

OFGEM. **Electricity Networks Strategic Framework: Enabling a secure, net zero energy system**. 2022.

<https://assets.publishing.service.gov.uk/media/6690f4220808eaf43b50ce41/electricity-networks-strategic-framework-report.pdf>. Acesso em: 24 de dezembro de 2024.

OLABI, A. G.; ELSAID, Khaled; OBAIDEEN, Khaled; ABDELKAREEM, Mohammad A.; REZK, Hegazy; WILBERFORCE, Tabbi; MAGHRABIE, Hussein M.; SAYED, Enas T. Renewable energy systems: Comparisons, challenges and barriers, sustainability indicators, and the contribution to UN sustainable development goals. **International Journal of Thermofluids**, [s. l.], v. 20, p. 100498, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100498>. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

OLABUÉNAGA, José I. R.; URIBARRI, María A. I. La técnica Delphi. In: _____. **La descodificación de la vida cotidiana: métodos de investigación cualitativa**. p. 171-179. Bilbao: Universidad de Deusto, 1989.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. **Declaração da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano**. Estocolmo, 1972. Disponível

em: <https://documents.un.org/doc/undoc/gen/nl7/300/05/img/nl730005.pdf>. Acesso em: 04 de outubro de 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Agenda 21**. Rio de Janeiro, 1992. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf>. Acesso em: 11 de fevereiro de 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Indicators os Sustainable Development: Guidelines and Methodologies**. 2001. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/indisd-mg2001.pdf>. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. **Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies**. 3 ed. Nova Iorque, NY: 2007. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/guidelines.pdf>. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf>. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. **Roteiro para a Localização dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: Implementação e Acompanhamento no Nível Subnacional**. 2016. Disponível em: <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/br/undp-br-roteiro-localizacao-objetivos-desenvolvimento-2017.pdf>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. **World Urbanization Prospects: The 2018 Revision**. 2019. Disponível em: <https://population.un.org/wup/publications/Files/WUP2018-Report.pdf>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. **World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities**. 2022. Disponível em: https://unhabitat.org/sites/default/files/2022/06/wcr_2022.pdf. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). **Fuel for life: household energy and health**. 2006. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241563161>. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO - OCDE. **OECD Core Set of Indicators for Environmental Performance Reviews: a syn: a synthesis report by the Group on the State of the Environment**. Paris, 1993. Disponível em: [https://one.oecd.org/document/OCDE/GD\(93\)179/en/pdf](https://one.oecd.org/document/OCDE/GD(93)179/en/pdf). Acesso em: 12 de outubro de 2024.

ORZES, Guido; MORETTO, Antonella M.; EBRAHIMPOUR, Maling; SARTOR, Marco; MORO, Mattia; ROSSI, Matteo. United Nations Global Compact: Literature review and theory-based research agenda. **Journal of Cleaner Production**, Oxford, v. 177, p. 633-654, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.230>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

PAGE, Matthew J.; MCKENZIE, Joanne E.; BOSSUYT, Patrick M.; BOUTRON, Isabelle; HOFFMANN, Tammy C.; MULROW, Cynthia D. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, London, v. 372, n. 71, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>. Acesso em: 10 de outubro de 2024.

PARISCA, S. El método Delphi. Gestión tecnológica y competitividad. In: PARISCA, S. (Orgs.). **Estrategia y filosofía para alcanzar la calidad total y el éxito en la gestión impresional**. p. 129-130. La Habana: Academia, 1995.

PARIZAD, Ali; HATZIADONIU, Konstadinos J. Multi-Objective Optimization of PV/Wind/ESS Hybrid Microgrid System Considering Reliability and Cost Indices. In: 2019 North American Power Symposium (NAPS), 2019, Wichita, Kansas. **Anais [...]**. Wichita, Kansas, 2019. p. 1-6. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/NAPS46351.2019.9000396>. Acesso em: 17 de outubro de 2024.

PAWLICZEK, Adam; ZIMMERMANNNOVA, Jarmila. Evaluation of the economic indicators of a company-prosumer using photovoltaics. **Forum Scientiae Oeconomia**, [s. l.], v. 6, n. 4, p. 51-64, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.23762/FSO_VOL6_NO4_4. Acesso em: 16 de outubro de 2024.

PEIXER, Janaína F. B. **A Contribuição Nacionalmente Determinada do Brasil para Cumprimento do Acordo de Paris**: metas e perspectivas futuras. Orientadora: Cristiane Derani. Tese (doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Direito. Florianópolis, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/199009>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

PENTEADO, Ednan J. D. S.; DUARTE, Carla G. Uma avaliação dos Indicadores Ethos a partir dos Princípios de Bellagio. In: XVI ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE (ENGEMA), 16., 2014, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ENGEMA, 2014. p. 1-13. Disponível em: <https://www.engema.org.br/XVIENGEMA/76.pdf>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

PEPERMANS, G.; DRIESEN, J.; HAESELDONCKX, D.; BELMANS, R.; D'HAESELEER, W. Distributed generation: definition, benefits and issues. **Energy Policy**, Oxford, v. 33, n. 6, p. 787-798, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.10.004>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

PEREIRA, Enio B.; MARTINS, Fernando R.; GONÇALVES, André R.; COSTA, Rodrigo S.; LIMA, Francisco, J. L.; RUTHER, Ricardo; ABREU, Samuel L.; TIEPOLO, Gerson M.; PEREIRA, Silvia V.; SOUZA, Jefferson G. **Atlas Brasileiro de**

Energia Solar – 2ª Edição. São José dos Campos: INPE, 2017. Disponível em: http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html. Acesso em 11 de outubro de 2024.

PETEELEAZA, Darius; MATEI, Alexandru; SOROSTINEAN, Radu; GELLERT, Arpad; FIORE, Ugo; ZAMFIRESCU, Bala-Constantin; PALMIERI Francesco Electricity consumption forecasting for sustainable smart cities using machine learning methods. **Internet of Things**, [s. l.], v. 27, p. 101322, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101322>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

PHICHETKUNBODEE, Non; CHANTRAWUTIKORN, Meen; SUNDARANAGA, Chawanat; CHAICHANA, Chatchawan; PHOLPORTON, Kankanit; AYUTTHAYA, Thidarat K. N.; RINCHUMPHU, Damrongsak. Using the Delphi method for selecting energy efficiency indicators in the Thailand context. **Energy Reports**, [s. l.], v. 9, n. 11, p. 408-414, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.09.037>. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

PHILIPPI Jr., Arlindo. A Interdisciplinaridade como Atributo da C&T. In: PHILIPPI Jr., Arlindo; TUCCI, Carlos E. M.; HOGAN, Daniel J.; NAVEGANTES, Raul (Orgs.). **Interdisciplinaridade em Ciências Ambientais**. p. 3-15. São Paulo: Signus Editora, 2000.

PHILIPPI Jr., Arlindo; TUCCI, Carlos E. M.; HOGAN, Daniel J.; NAVEGANTES, Raul. **Interdisciplinaridade em Ciências Ambientais**. São Paulo: Signus Editora, 2000.

PHILIPPI Jr., Arlindo; MALHEIROS, Tadeu F. **Indicadores de Sustentabilidade e Gestão Ambiental**. São Paulo: Manole, 2012.

PHILIPPI Jr., Arlindo; SOBRAL, Maria do C.; FERNANDES, Valdir; SAMPAIO, Carlos A. C. Desenvolvimento sustentável, interdisciplinaridade e Ciências Ambientais. **Revista Brasileira de Pós-Graduação**, Brasília, v. 10, n. 21, p. 509-533, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.21713/2358-2332.2013.v10.423>. Acesso em: 04 de outubro de 2024.

PHILIPPI Jr., Arlindo; ANDREOLI, Cleverson V.; BRUNA, Gilda C.; FERNANDES, Valdir. Histórico e Evolução do Sistema de Gestão Ambiental no Brasil. In: PHILIPPI Jr., Arlindo; ROMÉRO, Marcelo de A.; BRUNA, Gilda C. (Orgs.). **Curso de Gestão Ambiental**. p. 19-50. Barueri, SP: Manole, 2014.

PINHO, João T.; GALDINO, Marco A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL-CRESESB, 2014.

PINTÉR, László; HARDI, Peter; MARTINUZZI, André; HALL, Jon. Bellagio STAMP: Principles for sustainability assessment and measurement. **Ecological Indicators**, New York, v. 17, p. 20-28, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.07.001>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

POLANYI, Michael. **The tacit dimension**. Chicaco: University of Chicago Press, 1966.

POTT, Crisla M.; ESTRELA, Carina C. Histórico Ambiental: Desastres Ambientais e o Despertar de um Novo Pensamento. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 31, n. 89, p. 271-283, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0103-40142017.31890021>. Acesso em: 04 de outubro de 2024.

PRATES, Carlos V. B.; RAFAEL, Matheus C. E.; FREITAS, Miguel A. S.; SOARES, Erick A. S. Analysis of Behavioral Changes Observed in Users of Sustainable Practices. In: LEAL FILHO, Walter; TORTATO, Ubiratã; FRANKENBERGER, Fernanda (Orgs.). **Universities and Sustainable Communities: Meeting the Goals of the Agenda 2030**. p. 203-213. Cham: Springer, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-30306-8_12. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

PREMIER, Alessandro. **Architectural integration of solar energy at the urban scale: Case studies and potentials**. Londres: ROUTLEDGE, 2022.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE - PNUMA. **Global Environment Outlook 3 (GEO-3): Past, Present and Future Perspectives**. Londres, 2002. Disponível em: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8609/GEO-3%20REPORT_English.pdf. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL URBANA - PPGSAU. **Regulamento Interno do Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade Ambiental Urbana**. 2019. Disponível em: http://www.utfpr.edu.br/cursos/coordenacoes/stricto-sensu/ppgsau/documentos/regulamento-interno/@@download/file/regulamento_V1_2019.pdf . Acesso em: 10 de outubro de 2024.

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL URBANA - PPGSAU. **O PPGSAU**. 2024. Disponível em: <http://www.utfpr.edu.br/cursos/coordenacoes/stricto-sensu/ppgsau/sobre>. Acesso em: 10 de outubro de 2024.

RAULI, F.C.; ARAÚJO, F. T.; WIENS, S. Indicadores de desenvolvimento sustentável. In: SILVA, C. L. (Orgs.). **Desenvolvimento sustentável: um modelo analítico integrado e adaptativo**. p. 145-151. Petrópolis, RJ: Vozes, 2006.

RAVETZ, Joe. Integrated assessment for sustainability appraisal in cities and regions. **Environmental Impact Assessment Review**, New York, v. 20, n. 1, p. 31-64, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(99\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(99)00037-2). Acesso em: 17 de outubro de 2024.

REMENYI, Dan; WILLIAMS, Brian; MONEY, Arthur; SWARTZ Etgné. **Doing Research in Business and Management: An Introduction to Process and Method**. SAGE, 1998.

REN21. **Renewable 2021 – Global Status Report**. 2021. Disponível em: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf. Acesso em: 17 de outubro de 2024.

REN21. **Renewable 2022 – Global Status Report**. 2022. Disponível em: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

REN21. **Renewable 2024 – Global Status Report – Energy Supply**. 2024. Disponível em: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2024_Supply.pdf. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

RIO+20. **Sobre a Rio+20**. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: http://www.rio20.gov.br/sobre_a_rio_mais_20.html. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

ROBINSON, John. Squaring the Circle? Some Thoughts on the Idea of Sustainable Development. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 48, n. 4, p. 369-384, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2003.10.017>. Acesso em: 04 de outubro de 2024.

ROE, Emery. **Taking Complexity Seriously: Policy Analysis, Triangulation and Sustainable Development**. Nova Iorque, NY: Springer, 1998.

ROMULO, Chelsie; VENKATARAMAN, Bhawani; CAPLOW, Susan; AJGAONKAR, Shamili; *et al.* Implementing interdisciplinary sustainability education with the food-energy-water (FEW) nexus. **Humanities and Social Sciences Communications**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 928, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1057/s41599-024-03332-7>. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

RONG, Aiyong; LAHDELMA, Risto. Role of polygeneration in sustainable energy system development challenges and opportunities from optimization viewpoints. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 53, p. 363-372, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.060>. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

RUIZ, Jose A. G.; PRADAS, Inmaculada G.; RUIZ, Ana B. The Impact of Renewable Energies on the Spanish Electric System. **International Renewable and Sustainable Energy Conference**, Piscataway, p. 1-7, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2017.8477378>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

RÜTHER, Ricardo. **Edifícios Solares Fotovoltaicos**. 1. ed. Florianópolis: LABSOLAR/UFSC, 2004.

RUTHES, Sidarta; SILVA, Christian L. O uso de estudos prospectivos na análise de políticas públicas: uma análise bibliométrica. *In*: XVI CONGRESSO LATINO-IBEROAMERICANO DE GESTÃO DE TECNOLOGIA, 16., 2015, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: ALTEC, 2015. p. 1-19. Disponível em: <https://repositorio.altecasociacion.org/handle/20.500.13048/1347>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

SACHS, Ignacy. **Espaços, tempos e estratégias do desenvolvimento**. São Paulo: Vértice, 1981.

SACHS, Ignacy. **Ecodesenvolvimento**: crescer sem destruir. São Paulo: Vértice, 1986.

SACHS, Ignacy. Estratégias de transição para o século XXI. In: BURSZTYN, Marcel (Orgs.). **Para pensar o desenvolvimento sustentável**. p. 29-56. São Paulo, SP: Brasiliense, 1993.

SACHS, Ignacy. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: Garamond, 2002.

SACHS, Ignacy. **Desenvolvimento**: incluyente, sustentável, sustentado. Rio de Janeiro: Garamond, 2008.

SACHS, Jeffrey D. From Millennium Development Goals to Sustainable Development Goals. **The Lancet**, Boston, v. 379, n. 9832, p. 2206-2211, 2012. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(12\)60685-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)60685-0). Acesso em: 12 de outubro de 2024.

SALVIA, Amanda L.; LEAL FILHO, Walter; BRANDLI, Luciana L.; GRIEBELER, Juliane S. Assessing research trends related to Sustainable Development Goals: local and global issues. **Journal of Cleaner Production**, Oxford, v. 208, p. 841-849, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.242>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

SAMPIERI, Roberto H.; COLLADO, Carlos F.; LUCIO, María P. B. **Metodologia de Pesquisa**. Porto Alegre: Penso, 2013.

SANDERSON, Mark; SOBOROFF, Ian. Problems with Kendall's Tau. In: Proceedings of the 30th annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval (SIGIR '07), 2007, Amsteram. **Anais [...]**. Amsterdam: SIGIR, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/1277741.1277935>. Acesso em: 26 de dezembro de 2024.

SANTOS, Cristina M. D. C; PIMENTA, Cibele A. D. M.; NOBRE, Moacyr R. C. A estratégia PICO para a construção da pergunta de pesquisa e busca de evidências. **Revista Latino-Americana de Enfermagem**, Ribeirão Preto, v. 15, n. 3, p. 508-511, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-11692007000300023>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

SANTOYO, Alain H. **Bases teórico metodológicas para la valoración económica de bienes y servicios ambientales a partir de técnicas de decision multicritério**. Estudio de caso: Parque Nacional Vinales Pinar del Río, República de Cuba. Tese (doutorado), Universidade de Alicante. Alicante, 2011.

SARTORI, Simone; LATRÔNICO, Fernanda; CAMPOS, Lucila M. S. Sustentabilidade e desenvolvimento sustentável: uma taxonomia no campo da literatura. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 01-22, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2014000100002>. Acesso em: 10 de outubro de 2024.

SCHENINI, Pedro C. **Gestão Empresarial Sócio Ambiental**. Florianópolis: NUPEGEMA, 2005.

SCHMIDT-SCHEELE, Ricarda; HAUSER, Wolfgang; SCHEEL, Oliver; MINN, Fabienne, *et al.* Sustainability assessments of energy scenarios: citizens' preferences for and assessments of sustainability indicators. **Energy, Sustainability and Society**, Heidelberg, v. 12, n. 41, p. 1-23, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13705-022-00366-0>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

SCHMITT, Jairo L.; ROCHA, Cristian Y. M.; GALVINCIO, Josiclêda D.; ALMEIDA, Jarcilene S. Interdisciplinaridade em Ciências Ambientais: Monitoramento Ambiental na Prevenção de Futuras Pandemias. **História Ambiental Latinoamericana y Caribeña**, Anápolis, v. 12, n. 1, p. 322-352, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.32991/2237-2717.2022v12i1.p322-352>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

SCHONE, Nikolas; TIMOFEEVA, Elena; HEINS, Boris. Sustainable Development Goal Indicators as the Foundation for a Holistic Impact Assessment of Access-to-Energy Projects. **Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 1090400, 2022. Disponível em: <http://doi.org/10.13044/j.sdewes.d9.0400>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

SCOLARI, Bruno S.; TONOLO, Édwin A.; PAN, Roberto C. Y.; URBANETZ Jr., Jair. Mapping and Characterization of the Grid-connected Photovoltaic Systems in the City of Curitiba: Preliminary Results. **Brazilian Archives Of Biology And Technology**, Curitiba, v. 61, n. e18000340, p. 1-8, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-4324-smart-2018000340>. Acesso em: 17 de outubro de 2024.

SCOLARI, Bruno S. **Panorama da Inserção da Geração Fotovoltaica Conectada a Rede Aparada pela REN Nº 482/2012 da ANEEL no Brasil, no Paraná e em Curitiba**. Orientador: Jair Urbanetz Junior. Dissertação (mestrado), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGE. Curitiba, 2019. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/4218>. Acesso em: 09 de outubro de 2024.

SERRES, Michel. **O Contrato Natural**. Lisboa: Instituto PIAGET, 1990.

SEYISI, Esonasipho; MANTLANA, Brian; NDHLEVE, Simbarashe. Indicators for monitoring and evaluating climate change adaptation efforts in South Africa. **Jamba: Journal of Disaster Risk Studies**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. a1426, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.4102/jamba.v15i1.1426>. Acesso em: 10 de outubro de 2024.

SHAKER, Richard R. The spatial distribution of development in Europe and its underlying sustainability correlations. **Applied Geography**, Sevenoaks, v. 63, p. 304-314, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.07.009>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

SHAKER, Lina M.; MOHAMMED, Jabbar K.; BASEM, Ali; HALBOS, Raghad J.; MAHDI, Raghad R.; MOHAMMED, Suha A.; FAYAD, Mohammed A.; AL-AMIERY, Ahmed; LAMI, Muwafaq H. A. Comparative analysis of solar cells and hydrogen fuel: A mini-review. **Results in Engineering**, [s. l.], v. 23, p. 102507, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102507>. Acesso em: 09 de outubro de 2024.

SHEN, Li-Yin; OCHOA, Jorge J.; SHAN, Mona N.; ZHANG, Xiaoling. The application of urban sustainability indicators – A comparison between various practices. **Habitat International**, Oxford, v. 35, n. 1, p. 17-29, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2010.03.006>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

SHIVARAMA, Krishna K.; SATHISH, Kumar K. A review on hybrid renewable energy systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 52, p. 907-916, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.187>. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

SILVA, Christian L.; SOUZA-LIMA, José E. **Políticas Públicas e Indicadores para o Desenvolvimento Sustentável**. São Paulo: Saraiva, 2010.

SILVA, Juvancir; RAUEN, William; PARRA, Oscar; URRUTIA, Roberto; TEIXEIRA, Edmilson; FERNANDES, Valdir. Indicadores para Avaliações do Grau de Implementação de Política Nacional de Recursos Hídricos. In: RÍOS, Ricardo B.; HERNÁNDEZ, Jorge R. (Orgs.). **Desarrollo sustentable: Miradas interdisciplinarias de experiencias en Chile y Brasil**. p.33-49. Concepción: Universidad de Concepción, 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/322231764>. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

SILVA, Eduardo T.; MARTINS, Márcio A. F.; FERREIRA, Adonias, M. S.; RODRIGUEZ, Jorge L. M. A Fuzzy Approach to Assess the Perception of a Rural Community Concerning the Impact of Distributed Power Generation on Local Sustainability. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 64, p. e21200486, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2021200486>. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

SIMON, Herbert A. **The Sciences of the Artificial**. Cambridge: MIT Press, 1996.

SINGH, Shantesh K.; SINGH, Shri P. **Nontraditional Security Concerns in India: Issues and Challenges**. Singapore: Palgrave Macmillan Singapore, 2022. Disponível em: doi.org/10.1007/978-981-16-3735-3. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

SINGH, Jagdeep. The role of disciplinary, interdisciplinary, and transdisciplinary education in sustainability science. In: SUNG, Kyungeun; ISHERWOOD, Patrick; MOALOSI, Richie. (Orgs.). **Research Journeys to Net Zero**. p. 23-34. London: Routledge, 2024. Disponível em: doi.org/10.4324/9781003380566-4. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

SKULMOSKI, Gregory J.; HARTMAN, Francis T.; KRAHN, Jennifer. The Delphi method for graduate research. **Journal of Information Technology Education**, [s. l.], v. 23, p. 1-10, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15393101.2024.2316111>. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

/], v. 6, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.28945/199>. Acesso em: 17 de outubro de 2024.

SLAPER, Timothy F.; HALL Tanya J. The Triple Botton Line: What Is It and How Does It Work? **Indiana Business Review**, Indianapolis, v. 86, n. 1, p. 04-08, 2011. Disponível em: <https://www.ibrc.indiana.edu/ibr/2011/spring/article2.html>. Acesso em: 10 de outubro de 2024.

SOBRAL, Maria do C.; SAMPAIO, Carlos A. C.; FERNANDES, Valdir; PHILIPPI Jr., Arlindo. Práticas Interdisciplinares no Campo das Ciências Ambientais. In: PHILIPPI Jr., Arlindo; FERNANDES, Valdir (Orgs.). **Práticas da Interdisciplinaridade no Ensino e Pesquisa**. p. 503-522. Barueri, SP: Manole, 2015.

SOBRAL, Maria C.; CARVALHO, Renata M. C.; MELO, Maiara G. S.; PAZ, Ubirajara F.; ASSIS, Janaina M. O. Planejamento Urbano e Políticas Ambientais para Construção da Sustentabilidade. In: PHILIPPI Jr., Arlindo; BRUNA, Gilda C. (Orgs.). **Gestão Urbana e Sustentabilidade**. p. 673-695. São Paulo: Manole, 2019.

SONG, Yuegang; SHAHZAD, Umer; PARAMATI, Sudharshan R. Impact of energy infrastructure investments on renewable electricity generation in major Asian developing economies. **Australian Economic Papers**, [s. l.], v. 61, n. 1, p. 1-23, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1467-8454.12282>. Acesso em: 24 de dezembro de 2024.

SOTTO, Debora; RIBEIRO, Djonathan G.; ABIKO, Alex K.; SAMPAIO, Carlos A. C.; NAVAS, Carlos A.; MARINS, Karin R. D. C.; SOBRAL, Maria D. C. M.; PHILIPPI Jr., Arlindo; BUCKERIDGE, Marcos S. Sustentabilidade Urbana: Dimensões Conceituais e Instrumentos Legais de Implementação. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 33, n. 97, p. 61-80, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2019.3397.004>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

SOUZA, Andréa. **Proposta de uma matriz de decisão em energia hidrelétrica com o uso do método multicritério, para formulação de políticas públicas no estado do Paraná**. Orientador: Christian Luiz da Silva. Tese (doutorado), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia. Curitiba, 2016. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/1683>. Acesso em: 16 de outubro de 2024.

SOUSA, Maria C. O.; CORAZZA, Rosana I. Do Protocolo de Kyoto ao Acordo de Paris: uma análise das mudanças no regime climático global a partir do estudo da evolução de perfis de emissões de gases de efeito estufa. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, Curitiba, v. 42, p. 52-80, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/dma.v42i0.51298>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

STARKEY, Ken; MADAN, Paula. Bridging the Relevance Gap: Aligning Stakeholders in the Future of Management Research. **British Journal of Management**, Chichester, v. 12, n. S1, p. S3-S26, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1467-8551.12.s1.2>. Acesso em: 16 de outubro de 2024.

SUN, Chenjun; MI, Zengqiang; REN, Hui; JING, Zhipeng; LU, Jinling; WATTS David. Multi-Dimensional Indexes for the Sustainability Evaluation of an Active Distribution Network. **Energies**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 369, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en12030369>. Acesso em: 16 de outubro de 2024.

SHUKOR, Syaimak A.; NG, Geok K. Environmental indicators for sustainability assessment in edible oil processing industry based on Delphi Method. **Cleaner Engineering and Technology**, [s. l.], v. 10, p. 100558, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100558>. Acesso em: 17 de outubro de 2024.

TAG CROWD. Site mantido por Daniel Steinbock (*online*). Disponível em: <https://tagcrowd.com/>. Acesso em: 16 de outubro de 2024.

TAN, Wen-Shan; HASSAN, Mohammad Y.; MAJID, Md S.; RAHMAN, Hasimah, A. Optimal distributed renewable generation planning: A review of different approaches. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 18, p. 626-645, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.039>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

TAO, Yu; LI, Feng; CRITTENDEN, John; LU, Zhongming; OU, Weixin; SONG, Yingshi. Measuring urban environmental sustainability performance in China: A multi-scale comparison among different cities, urban clusters, and geographic regions. **Cities**, London, v. 94, p. 200-210, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.06.014>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

THE GLOBAL DEVELOPMENT RESEARCH CENTER - GDRC. **Bellagio Principles**: Guidelines for the Practical Assessment of Progress Toward Sustainable Development. 2023. Disponível em: <https://www.gdrc.org/sustdev/bellagio-principles.html>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

TICKELL, Rebecca M.; KLASSEN, Robert M. Developing the Teacher mentoring self-efficacy scale (TMSES) using the Delphi method and exploratory factor analysis. **Teaching and Teacher Education**, [s. l.], v. 139, p. 104452, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tate.2023.104452>. Acesso em: 16 de outubro de 2024.

TIEPOLO, Gerson M. **Estudo do Potencial de Geração de Energia Elétrica Através de Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Rede no Estado do Paraná**. Orientador: Osiris Canciglieri Junior. Tese (doutorado), Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas – PPGEPS. Curitiba, 2015.

TIEPOLO, Gerson M.; PEREIRA, Enio B.; URBANETZ Jr.; Jair; PEREIRA, Silva V.; GONÇALVES, André R.; LIMA, Francisco J. L.; COSTA, Rodrigo S.; ALVES, Alisson R. **Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná**. Curitiba: UTFPR, 2017. Disponível em: http://labren.ccst.inpe.br/atlas_PR_2017.html. Acesso em 11 de outubro de 2024.

TIRONI, Luis F.; SILVA, Luiz C. E.; VIANA, Solon M.; MEDICI, André C. **Critérios para geração de indicadores de qualidade e produtividade no setor público**. Brasília: IPEA/MEFP, 1991.

TONIN, Fabianna, S. **Caracterização de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica na cidade de Curitiba**. Orientador: Jair Urbanetz Junior. Dissertação (mestrado), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia – PPGSE. Curitiba, 2017. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/2876>. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

TUNSTALL, D. Developing Environmental Indicators: Definitions, framework and issues. Background Materials for the World Resources Institute. *In*: WORKSHOP ON GLOBAL ENVIRONMENTAL INDICATORS, 1992, Washington, D.C. **Draft Paper [...]**. Washington, D.C.: World Resources Institute, 1992.

TURCU, Catalina. Re-thinking sustainability indicators: Local perspectives of urban sustainability. **Journal of Environmental Planning and Management**, Abingdon, v. 56, n. 5, p. 695-719, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09640568.2012.698984>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

UCHIYAMA, Yohji. Life cycle assessment of renewable energy generation technologies. **Transactions on Electrical and Electronic Engineering**, Hoboken, v. 2, n. 1, p. 44-48, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/tee.20107>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

UPADHYAYA, Jyoti K.; BISWAS, Nihar; TAM, Edwin K. L. Using Qualitative Indicators in Infrastructure Assessment Using the Functionality–Resiliency–Sustainability Framework. **Frontiers in Sustainable Cities**, [s. l.], v. 3, p. 746537, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/frsc.2021.746537>. Acesso em: 17 de outubro de 2024.

URBANETZ Jr., Jair. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Redes de Distribuição Urbanas**: Sua influência na qualidade de energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade. Orientador: Ricardo Rütther. Tese (doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGECC. Florianópolis, 2010.

VALLANCE, Suzanne; PERKINS, Harvey C.; DIXON, Jennifer E. What is social sustainability? A clarification of concepts. **Geoforum**, Oxford, v. 42, n. 3, p. 342-348, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2011.01.002>. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

VAN AKEN, Joan, E. Management Research Based on the Paradigm of the Design Sciences: The Quest for Field-Tested and Grounded Technological Rules. **Journal of Management Studies**, Oxford, v. 41, n. 2, p. 219-246, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1467-6486.2004.00430.x>. Acesso em: 16 de outubro de 2024.

VAN AKEN, Joan, E. Management Research as a Design Science: Articulating the Research Products of Mode 2 Knowledge Production in Management. **British Journal of Management**, Chichester, v. 16, n. 1, p. 19-36, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1467-8551.2005.00437.x>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

VAN AKEN, Joan, E. **The research design for design science research in management**. Eindhoven: [s.n.], 2011.

VAN BELLEN, Hans M. **Indicadores de sustentabilidade: uma análise comparativa**. Orientadora: Sandra Sulamita Nahas Baasch. Tese (doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Florianópolis, 2002. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/84033>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

VASSILIADES, C.; SAVVIDES, A.; BUONOMANO, A. Building integration of active solar energy systems for façades renovation in the urban fabric: Effects on the thermal comfort in outdoor public spaces in Naples and Thessaloniki. **Renewable Energy**, Oxford, v. 190, p. 30-47, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.094>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

VELEVA, Vesela; ELLENBECKER, Michael. A proposal for measuring business sustainability: Addressing shortcomings in existing frameworks. **Greener Management International**, [s. l.], n. 31, p. 101-120, 2000. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/greemanainte.31.101>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

VERGARA, Sylvia C. **Métodos de pesquisa em administração**. São Paulo: Atlas, 2010.

VERMA, Pramit; RAGHUBANSHI, A. S. Urban sustainability indicators: Challenges and opportunities. **Ecological Indicators**, New York, v. 93, p. 282-291, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.007>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

VIEIRA, Paulo H. F. A problemática ambiental e as ciências sociais no Brasil. In: HOGAN, Daniel J.; VIEIRA, Paulo H. F. (Orgs.). **Dilemas socioambientais e desenvolvimento sustentável**. Campinas: Unicamp, 1992.

VILLALVA, Marcelo G.; GAZOLI, Jonas R. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. São Paulo: Érica, 2012.

VYAS, Mahashi; CHOWDHURY, Sumit; VERMA, Abhishek; JAIN, V. K. Solar Photovoltaic Tree: Urban PV power plants to increase power to land occupancy ratio. **Renewable Energy**, Oxford, v. 190, p. 283-293, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.129>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

WADOUX, Alexandre M. J. C.; MINASNY, Budiman. Some limitations of the concordance correlation coefficient to characterise model accuracy. **Ecological**

Informatics, [s. /], v. 83, p. 102820, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102820>. Acesso em: 26 de dezembro de 2024.

WALTERS, D.; KOTZE, D. C.; REBELO, A.; PRETORIUS, L.; JOB, N.; LAGESSE, J. V.; RIDDELL, E.; COWDEN, C. Validation of a rapid wetland ecosystem services assessment technique using the Delphi method. **Ecological Indicators**, [s. /], v. 125, p. 107511, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107511>. Acesso em: 16 de outubro de 2024.

WANG, Feiran; ZHUANG, Lu; CHENG, Shasha; ZHANG, Yue. CHENG, Shulei. Spatiotemporal variation and convergence analysis of China's regional energy security. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. /], v. 189, p. 113923, 2024. Disponível em: doi.org/10.1016/j.rser.2023.113923. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

WEISSER, Daniel. A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies. **Energy**, Oxford, v. 32, n. 9, p. 1543-1559, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.01.008>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

WILLIAMS, Colin C.; MILLINGTON, Andrew C. The diverse and contested meanings of sustainable development. **The Geographical Journal**, [s. /], v. 170, n. 2, p. 99-104, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.0016-7398.2004.00111.x>. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

YU, Man; HALOG, Anthony. Solar Photovoltaic Development in Australia - A Life Cycle Sustainability Assessment Study. **Sustainability**, [s. /], v. 7, n. 2, p. 1213-1247, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su7021213>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

YU, Yan; WEN, Zongguo. Evaluating China's urban environmental sustainability with Data Envelopment Analysis. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 69, n. 9, p. 1748-1755, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.04.006>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

ZEIJL-ROZEMA, Annemarie V.; CORVERS, Ron; KEMP, René; MARTENS, Pim. Governance for Sustainable Development: A Framework. **Sustainable Development**, Chichester, v. 16, n. 6, p. 410-421, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/sd.367>. Acesso em: 07 de outubro de 2024.

ZHAN, Meng; LI, Yan-Lai. Evaluation and selection of sustainable hydrogen production technologies with unknown expert weights based on extended MARCOS under hybrid information. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. /], v. 77, p. 1043-1055, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.199>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

ZHANG, Danning; CHEN, Yang. Evaluation on urban environmental sustainability and coupling coordination among its dimensions: A case study of Shandong Province, China. **Sustainable Cities and Society**, [s. /], v. 75, n. 103351, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103351>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

ZHOU, Ying; YU, Miao; TIAN, Shen; GONG, Chengju. Evaluation of urban environmental sustainability based on the integration of multi-improvement demands: a case study of Liaoning Province, China. **Environment, Development and Sustainability**, [s. l.], v. 26, p. 18761-18783, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03414-7>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

APÊNDICE A

Quadro 15 – Ficha de Análise Sistemática

Título: <i>Sustainability indicators for renewable energy systems using multicriteria decision-making model and extended SWARA/ARAS hybrid method</i>
Referência: (Ghenai; Albawab; Bettayeb, 2020)
Objetivo: Desenvolver um framework para priorização de tecnologias sustentáveis para sistemas de geração distribuída.
Indicadores Identificados: Área Ocupada [m^2/kWp], Intensidade de Material (construção) [kg/kWp], Emissão de Gases de Efeito Estufa no Ciclo de Vida [$\text{Kg CO}_2\text{-eq}/\text{kWh}$], Custo Unitário de Instalação [$\text{R}\$/\text{kWp}$], Custo Nivelado de Energia (LCOE) [$\text{R}\$/\text{kWh}$], Potência Nominal do Sistema [kWp], Taxa de Crescimento [$\%/ano$], Fator de Capacidade (FC) [$\%$], Eficiência Energética do Módulo [$\%$], Vida Útil do Sistema [anos].
Principais Resultados: Os sistemas de energia eólica terrestres são classificados em primeiro lugar em relação aos indicadores de sustentabilidade e seus subindicadores, seguidos por células a combustível de óxido sólido, depois células a combustível de ácido fosfórico e, finalmente, por sistemas de energia solar de silício policristalino.
Título: <i>Evaluation and selection of sustainable hydrogen production technology with hybrid uncertain sustainability indicators based on rough-fuzzy BWM-DEA</i>
Referência: (Mei; Chen, 2021)
Objetivo: Propor um framework integrando um novo sistema de critérios para avaliação e seleção de tecnologias sustentáveis de produção de hidrogênio.
Indicadores Identificados: Custo Total de Instalação [$\text{R}\$$], Emissão de Gases de Efeito Estufa no Ciclo de Vida [$\text{Kg CO}_2\text{-eq}/\text{kWh}$], Potencial de Acidificação (AP) [$\text{kg SO}_2\text{-eq}$], Risco de Segurança [qualitativo], Risco de Vida [qualitativo], Maturidade Tecnológica [qualitativo], Eficiência Energética do Módulo [$\%$], Inovação Tecnológica [qualitativo], Potencial de Integração com Tecnologias Inteligentes [qualitativo], Aceitabilidade Social [qualitativo], Operabilidade da Planta [qualitativo].
Principais Resultados: Os resultados do estudo de caso mostram que os indicadores Eficiência Energética, Custo de Instalação, Risco de Segurança são selecionados como os critérios mais importantes.
Título: <i>Incidence of Photovoltaics in Cities Based on Indicators of Occupancy and Urban Sustainability</i>
Referência: (Escandón; León; Cepeda, 2019)
Objetivo: Avaliar o impacto de uma implementação massiva de sistemas fotovoltaicos em uma área urbana.
Indicadores Identificados: Irradiação Global Horizontal [$\text{Wh}/\text{m}^2.\text{dia}$], Taxa de Desempenho (Performance Ratio) [$\%$], Inclinação do Painel Fotovoltaico [$^\circ$], Direção do Painel Fotovoltaico (Azimute) [$^\circ$], Criação de empregos [empregos/MW].
Principais Resultados: Os resultados mostram que para a solução do problema energético urbano da cidade em estudo é necessário o incentivo do uso de variadas fontes renováveis de energia em aplicações como transporte e aquecimento e a promoção do uso de equipamentos que consomem eletricidade ou combustíveis não fósseis.

(continua)

(continuação do Quadro 15)

Título: <i>Multi-Dimensional Indexes for the Sustainability Evaluation of an Active Distribution Network</i>
Referência: (Sun <i>et al.</i> , 2019)
Objetivo: Propor um sistema de índice multidimensional para avaliar a sustentabilidade de uma rede de distribuição ativa.
Indicadores Identificados: Produtividade (Yield) [kWh/kWp], Custo Nivelado de Energia (LCOE) [R\$/kWh], Tempo de Retorno (<i>Payback</i>) [anos], Vida Útil do Sistema [anos], Emissão de Gases de Efeito Estufa no Ciclo de Vida [Kg CO ₂ -eq/kWh], Área Ocupada [m ² /kWp], Poluição Sonora [dB], Interferência na Paisagem [qualitativo], Potencial de Acidificação (AP) [kg SO ₂ -eq], Criação de Empregos [empregos/MW], Aceitabilidade Social [qualitativo], Eficiência Energética do Módulo [%], Fator de Capacidade (FC) [%], Taxa de Desempenho (Performance Ratio) [%], Previsibilidade do Desempenho (longo prazo) [qualitativo], Previsibilidade de Geração (curto prazo) [qualitativo], Maturidade Tecnológica [qualitativo], Potencial de Integração com Tecnologias Inteligentes [qualitativo], Modularidade [qualitativo].
Principais Resultados: Os resultados da simulação mostram que, para dentro de uma mesma cidade, onde os recursos solares, a população, o nível de renda e o meio ambiente são semelhantes, o nível de sustentabilidade de uma rede de distribuição aumenta à medida em que o nível de integração de geração fotovoltaica distribuída nesta rede aumenta.
Título: <i>Solar Cell Technology Selection for a PV Leaf Based on Energy and Sustainability Indicators - A Case of a Multilayered Solar Photovoltaic Tree</i>
Referência: (Kumar <i>et al.</i> , 2020)
Objetivo: Fornecer a solução mais prática para o desenvolvimento de uma árvore fotovoltaica multicamada.
Indicadores Identificados: Irradiação Global Horizontal [Wh/m ² .dia], Produção de Eletricidade [kWh/ano], Produção de Eletricidade na Vida Útil [kWh], Taxa de Degradação dos Módulos [%/a], Emissão de Gases de Efeito Estufa no Ciclo de Vida [Kg CO ₂ -eq/kWh].
Principais Resultados: As células fotovoltaicas de silício cristalino (c-Si) funcionam melhor quando todos os fatores que afetam o desempenho são levados em consideração. Quando a taxa de degradação é considerada, observa-se que as células de telureto de cádmio (CdTe) apresentam melhor desempenho para aplicações em árvores fotovoltaicas devido às suas taxas de degradação mais baixas. Observou-se que a taxa de degradação da célula fotovoltaica desempenha um papel crucial na identificação da melhor tecnologia fotovoltaica para árvores fotovoltaicas.
Título: <i>Smart Campus as a living lab on sustainability indicators monitoring</i>
Referência: (Negreiros <i>et al.</i> , 2020)
Objetivo: Relatar a experiência de incorporação de monitoramento de dados e de internet das coisas (IoT) nas atividades universitárias, por meio de um sistema de monitoramento contínuo e inteligente.
Indicadores Identificados: Potência Nominal do Sistema [kWp], Produção de Eletricidade [kWh/ano].
Principais Resultados: O impacto positivo do monitoramento dos indicadores dentro do campus universitário analisado pode ser extrapolado para toda a cidade, trazendo ganhos para a gestão da cidade e qualidade de vida para os cidadãos.

(continua)

(continuação do Quadro 15)

Título: <i>Multi-Objective Optimization of PV/Wind/ESS Hybrid Microgrid System Considering Reliability and Cost Indices</i>
Referência: (Parizad; Hatziaioniu, 2019)
Objetivo: Projetar uma configuração ótima de um sistema fotovoltaico híbrido com banco de baterias e com célula de combustível.
Indicadores Identificados: Potência Nominal do Sistema [kWp], Custo Unitário de Instalação [R\$/kWp], Vida Útil do Sistema [anos], Eficiência do Inversor [%], Taxa de Desempenho (Performance Ratio) [%].
Principais Resultados: As falhas em componentes do sistema dependem diretamente das suas confiabilidades. Sistemas maiores resultam em menos interrupções e atendem a carga com maior confiabilidade. O sistema híbrido com banco de baterias se mostrou economicamente melhor do que o sistema híbrido com célula de combustível. Caso a eficiência do eletrolisador seja melhorada, esse sistema híbrido pode ser economicamente competitivo no futuro.
Título: <i>Integrated off-grid hybrid renewable energy system optimization based on economic, environmental, and social indicators for sustainable development</i>
Referência: (Hassan; Das; Hasan, 2022)
Objetivo: Modelagem de um sistema renovável híbrido que seja economicamente, ambientalmente e socialmente sustentável.
Indicadores Identificados: Criação de empregos [empregos/MW], Emissão de Gases de Efeito Estufa no Ciclo de Vida [Kg CO ₂ -eq/kWh], Custo Nivelado de Energia (LCOE) [R\$/kWh], Valor Presente Líquido (VPL) [R\$].
Principais Resultados: O impacto dos sistemas híbridos de energia renovável em uma comunidade local pode ser avaliado pela análise de indicadores sociais e o avanço em direção a uma sociedade desenvolvida pode ser acelerado promovendo a conscientização social e utilizando os benefícios sociais desses sistemas.
Título: <i>Sustainability indicators of a naturally ventilated photovoltaic façade system</i>
Referência: (Garraín et al., 2020)
Objetivo: Realizar uma avaliação da sustentabilidade ambiental, econômica e social de um sistema fotovoltaico integrado a edificação instalado na Turquia.
Indicadores Identificados: Criação de empregos [empregos/MW], Custo Nivelado de Energia (LCOE) [R\$/kWh], Emissão de Gases de Efeito Estufa no Ciclo de Vida [Kg CO ₂ -eq/kWh], Potencial de Acidificação (AP) [kg SO ₂ -eq], Valor Presente Líquido (VPL) [R\$], Vida Útil do Sistema [anos], Taxa de Degradação dos Módulos [%/ano], Área Ocupada [m ² /kWp].
Principais Resultados: Os efeitos socioeconômicos são positivos em termos de produção de bens e serviços, criação de valor agregado e geração de emprego. O aumento dos investimentos nacionais maximiza os efeitos socioeconômicos positivos. Observadas reduções substanciais nas emissões de gases de efeito estufa em comparação com alternativas de combustíveis fósseis para geração de eletricidade. Os maiores impactos são produzidos pelos processos de fabricação fotovoltaica. A eletricidade produzida por um sistema fotovoltaico integrado a edificação ainda é mais cara do que as tecnologias de base fóssil e do que a maioria das outras tecnologias fotovoltaicas.

(continua)

(continuação do Quadro 15)

Título: <i>Evaluation of the economic indicators of a company-prosumer using photovoltaics</i>
Referência: (Pawliczek; Zimmermannova, 2018)
Objetivo: Avaliar os parâmetros econômicos de uma construção com sistema de geração distribuída fotovoltaica.
Indicadores Identificados: Produção de eletricidade [kWh/ano], Potência Nominal do Sistema [kWp], Fluxo de Caixa Acumulado [R\$], Tempo de Retorno (<i>Payback</i>) [anos], Valor Presente Líquido (VPL) [R\$], Taxa Interna de Retorno (TIR) [%].
Principais Resultados: Os indicadores econômicos são altamente sensíveis ao preço da eletricidade comprada da rede. Observado um tempo médio de retorno de nove anos, considerando uma tarifa de eletricidade doméstica, e de quatorze anos para uma tarifa industrial.
Título: <i>Novel Designing Framework of Stand-alone and Grid-connected Hybrid Photovoltaic/Wind/Battery Renewable Energy System Considering Reliability, Cost and Emission Indices</i>
Referência: (Naderipour <i>et al.</i> , 2021)
Objetivo: Efetuar o dimensionamento ideal de um sistema híbrido fotovoltaico, eólico com armazenamento em bateria para minimizar o valor presente líquido.
Indicadores Identificados: Valor Presente Líquido (VPL) [R\$], Irradiação Global Horizontal [Wh/m ² .dia], Inclinação do Pannel Fotovoltaico [°], Potência Nominal do Sistema [kWp].
Principais Resultados: Quando o sistema é instalado de modo conectado à rede, com a compra de energia da rede, o valor presente líquido pode ser reduzido e a confiabilidade pode ser aumentada.
Título: <i>Life Cycle Based Sustainability Index of Coal Power Plants in India</i>
Referência: (Nagarkatti; Kolar, 2021)
Objetivo: Efetuar a estimativa do índice de sustentabilidade de usina a carvão indiana com base na análise de ciclo de vida.
Indicadores Identificados: Área Ocupada [m ² /kWp], Potência Nominal do Sistema [kWp], Taxa de Desempenho (Performance Ratio) [%], Fator de Capacidade (FC) [%], Vida Útil do Sistema [anos], Retorno Sobre o Investimento (ROI) [%], Emissão de Gases de Efeito Estufa no Ciclo de Vida [Kg CO ₂ -eq/kWh], Custo Unitário de Instalação [R\$/kWp], Custo Nivelado de Energia (LCOE) [R\$/kWh], Criação de empregos [empregos/MW].
Principais Resultados: O índice de sustentabilidade calculado das usinas a carvão ficou em último lugar entre as alternativas selecionadas. Nota-se que nenhum sistema de geração de energia é completamente sustentável, sendo a interação de diversas fontes que criará um setor de energia sustentável.

(continua)

(continuação do Quadro 15)

Título: <i>Assessment of PV Penetration Impacts on Assiut International Airport Long Distribution Feeder Using Multi-Objective Performance Index</i>
Referência: (Makram <i>et al.</i> , 2021)
Objetivo: Avaliar o efeito do sistema fotovoltaico conectado a rede elétrica no Aeroporto Internacional Assuit em Assuit, Egito.
Indicadores Identificados: Produtividade (Yield) [kWh/kWp], Taxa de Desempenho (Performance Ratio) [%], Fator de Capacidade (FC) [%], Produção de Eletricidade [kWh/ano], Irradiação Global Horizontal [Wh/m ² .dia].
Principais Resultados: O sistema fotovoltaico avaliado supre 22,06% da necessidade de energia do Aeroporto Internacional de Assiut. Os valores médios mensais da Taxa de Desempenho e do Fator de Capacidade são 80,5% e 21,7% respectivamente. O uso de Sistemas fotovoltaicos em aeroportos é um caminho promissor para a aviação sustentável.

Fonte: Autoria própria (2024).

APÊNDICE B

Quadro 16 – Síntese dos Indicadores Seleccionados

Indicador: Aceitabilidade Social	
Unidade: [qualitativo]	Dimensão: Social
Número de Ocorrências na RSL: 2	
Referências: (Mei; Chen, 2021; Sun <i>et al.</i> , 2019)	
Descrição: Aceitação da sociedade em relação à tecnologia de geração fotovoltaica.	
Indicador: Área Ocupada	
Unidade: [m ² /kWp]	Dimensão: Ambiental
Número de Ocorrências na RSL: 4	
Referências: (Garraín <i>et al.</i> , 2020; Ghenai; Albawab; Bettayeb, 2020; Nagarkatti; Kolar, 2021; Sun <i>et al.</i> , 2019)	
Descrição: Área ocupada por cada kWp de potência instalada do sistema fotovoltaico.	
Indicador: Criação de Empregos	
Unidade: [empregos/MW]	Dimensão: Social
Número de Ocorrências na RSL: 5	
Referências: (Escandón; León; Cepeda, 2019; Garraín <i>et al.</i> , 2020; Hassan; Das; Hasan, 2022; Nagarkatti; Kolar, 2021; Sun <i>et al.</i> , 2019)	
Descrição: Quantidade de empregos gerada na cadeia produtiva fotovoltaica para cada MW de potência instalada.	
Indicador: Custo Nivelado de Energia (LCOE)	
Unidade: [R\$/kWh]	Dimensão: Econômica
Número de Ocorrências na RSL: 5	
Referências: (Garraín <i>et al.</i> , 2020; Ghenai; Albawab; Bettayeb, 2020; Hassan; Das; Hasan, 2022; Nagarkatti; Kolar, 2021; Sun <i>et al.</i> , 2019)	
Descrição: Relação entre todos os custos associados à instalação e à operação da usina fotovoltaica e a eletricidade estimada gerada ao longo da vida da planta.	
Indicador: Custo Total de Instalação	
Unidade: [R\$]	Dimensão: Econômica
Número de Ocorrências na RSL: 1	
Referências: (Mei; Chen, 2021)	
Descrição: Somatório de todos os valores associados a instalação da usina fotovoltaica, incluindo projeto, material, execução, entre outros.	

(continua)

(continuação do Quadro 16)

Indicador: Custo Unitário de Instalação	
Unidade: [R\$/kWp]	Dimensão: Econômica
Número de Ocorrências na RSL: 3	
Referências: (Ghenai; Albawab; Bettayeb, 2020; Nagarkatti; Kolar, 2021; Parizad; Hatziadoniu, 2019)	
Descrição: Custo por unidade de potência instalada do sistema fotovoltaico.	
Indicador: Direção do Painei Fotovoltaico (Azimute)	
Unidade: [°]	Dimensão: Tecnológica
Número de Ocorrências na RSL: 1	
Referências: (Escandón; León; Cepeda, 2019)	
Descrição: Ângulo formado entre o norte geográfico e a direção de instalação do painel fotovoltaico.	
Indicador: Eficiência Energética do Módulo	
Unidade: [%]	Dimensão: Tecnológica
Número de Ocorrências na RSL: 3	
Referências: (Ghenai; Albawab; Bettayeb, 2020; Mei; Chen, 2021; Sun <i>et al.</i> , 2019)	
Descrição: Eficiência energética do módulo fotovoltaico.	
Indicador: Eficiência Energética do Inversor	
Unidade: [%]	Dimensão: Tecnológica
Número de Ocorrências na RSL: 1	
Referências: (Parizad; Hatziadoniu, 2019)	
Descrição: Eficiência energética do inversor do sistema fotovoltaico.	
Indicador: Emissão de Gases de Efeito Estufa no Ciclo de Vida	
Unidade: [Kg CO ₂ -eq/kWh]	Dimensão: Ambiental
Número de Ocorrências na RSL: 7	
Referências: (Garraín <i>et al.</i> , 2020; Ghenai; Albawab; Bettayeb, 2020; Hassan; Das; Hasan, 2022; Kumar <i>et al.</i> , 2020; Mei; Chen, 2021; Nagarkatti; Kolar, 2021; Sun <i>et al.</i> , 2019)	
Descrição: Relação entre a Emissão de Gases de Efeito Estufa considerando todo o ciclo de vida da usina fotovoltaica e a energia total gerada ou prevista durante a vida útil da usina.	

(continua)

(continuação do Quadro 16)

Indicador: Fator de Capacidade (FC)	
Unidade: [%]	Dimensão: Tecnológica
Número de Ocorrências na RSL: 4	
Referências: (Ghenai; Albawab; Bettayeb, 2020; Makram <i>et al.</i> , 2021; Nagarkatti; Kolar, 2021; Sun <i>et al.</i> , 2019)	
Descrição: Representa o percentual da energia efetivamente gerada em relação ao total de energia que seria gerada caso o sistema operasse 24 horas por dia em sua potência nominal. Em outras palavras, representa a porcentagem de tempo em que o sistema está operando em sua capacidade nominal.	
Indicador: Fluxo de Caixa Acumulado	
Unidade: [R\$]	Dimensão: Econômica
Número de Ocorrências na RSL: 1	
Referências: (Pawliczek; Zimmermannova, 2018)	
Descrição: Representa o saldo disponível em caixa em determinado período de análise.	
Indicador: Inclinação do Painel Fotovoltaico	
Unidade: [°]	Dimensão: Tecnológica
Número de Ocorrências na RSL: 2	
Referências: (Escandón; León; Cepeda, 2019; Naderipour <i>et al.</i> , 2021)	
Descrição: Ângulo formado entre o plano horizontal e o ângulo de instalação do painel fotovoltaico.	
Indicador: Inovação Tecnológica	
Unidade: [qualitativo]	Dimensão: Tecnológica
Número de Ocorrências na RSL: 1	
Referências: (Mei; Chen, 2021)	
Descrição: O grau de inovação da tecnologia fotovoltaica em relação ao desenvolvimento sustentável, às energias renováveis, às perspectivas futuras e à acessibilidade.	
Indicador: Intensidade de Material (construção)	
Unidade: [kg/kWp]	Dimensão: Recursos
Número de Ocorrências na RSL: 1	
Referências: (Ghenai; Albawab; Bettayeb, 2020)	
Descrição: A quantidade de material (em kg) necessária para construir um determinado sistema fotovoltaico por unidade de potência nominal (kWp).	

(continua)

(continuação do Quadro 16)

Indicador: Interferência na Paisagem	
Unidade: [qualitativo]	Dimensão: Ecológica
Número de Ocorrências na RSL: 1	
Referências: (Sun <i>et al.</i> , 2019)	
Descrição: Representa o grau de interferência visual de um determinado sistema fotovoltaico na paisagem do entorno onde este sistema está instalado.	
Indicador: Irradiação Global Horizontal	
Unidade: [Wh/m ² .dia]	Dimensão: Recursos
Número de Ocorrências na RSL: 4	
Referências: (Escandón; León; Cepeda, 2019; Kumar <i>et al.</i> , 2020; Makram <i>et al.</i> , 2021; Naderipour <i>et al.</i> , 2021)	
Descrição: Representa a energia solar total acumulada em um intervalo de tempo que incide sobre uma superfície horizontal.	
Indicador: Maturidade Tecnológica	
Unidade: [qualitativo]	Dimensão: Tecnológica
Número de Ocorrências na RSL: 2	
Referências: (Mei; Chen, 2021; Sun <i>et al.</i> , 2019)	
Descrição: Representa o grau de conhecimento e maturidade tecnológica nas áreas de conhecimento necessárias para a correta aplicação da tecnologia fotovoltaica.	
Indicador: Modularidade	
Unidade: [qualitativo]	Dimensão: Tecnológica
Número de Ocorrências na RSL: 1	
Referências: (Sun <i>et al.</i> , 2019)	
Descrição: Representa o grau de modularidade da tecnologia, ou seja, a facilidade de ampliação da capacidade da planta fotovoltaica existente por meio de inclusão de novos módulos e inversores.	
Indicador: Operabilidade da Planta	
Unidade: [qualitativo]	Dimensão: Tecnológica
Número de Ocorrências na RSL: 1	
Referências: (Mei; Chen, 2021)	
Descrição: Grau de facilidade de operação da planta além da estabilidade de controle do sistema.	

(continua)

(continuação do Quadro 16)

Indicador: Poluição Sonora	
Unidade: [dB]	Dimensão: Ambiental
Número de Ocorrências na RSL: 1	
Referências: (Sun <i>et al.</i> , 2019)	
Descrição: Intensidade do ruído sonoro gerado pela usina fotovoltaica.	
Indicador: Potência Nominal do Sistema	
Unidade: [kWp]	Dimensão: Tecnológica
Número de Ocorrências na RSL: 6	
Referências: (Ghenai; Albawab; Bettayeb, 2020; Naderipour <i>et al.</i> , 2021; Nagarkatti; Kolar, 2021; Negreiros <i>et al.</i> , 2020; Parizad; Hatziaioniu, 2019; Pawliczek; Zimmermannova, 2018)	
Descrição: Potência nominal do sistema fotovoltaico. Convencionalmente considera-se o somatório das potências nominais dos módulos fotovoltaicos da usina, representado em kWp.	
Indicador: Potencial de Acidificação (AP)	
Unidade: [kg SO ₂ -eq]	Dimensão: Ambiental
Número de Ocorrências na RSL: 3	
Referências: (Garraín <i>et al.</i> , 2020; Mei; Chen, 2021; Sun <i>et al.</i> , 2019)	
Descrição: Quantidade de ácidos depositados no solo e na água relacionados a fabricação, operação e descarte do sistema fotovoltaico, representado em quantidade equivalente de SO ₂ .	
Indicador: Potencial de Integração com Tecnologias Inteligentes	
Unidade: [qualitativo]	Dimensão: Tecnológica
Número de Ocorrências na RSL: 2	
Referências: (Mei; Chen, 2021; Sun <i>et al.</i> , 2019)	
Descrição: Representa o potencial de integração com o uso de tecnologias inteligentes, como sensoriamento inteligente, Internet das Coisas (IoT) e inteligência artificial, para melhorar o desempenho operacional do sistema.	
Indicador: Previsibilidade de Geração (curto prazo)	
Unidade: [qualitativo]	Dimensão: Recursos
Número de Ocorrências na RSL: 1	
Referências: (Sun <i>et al.</i> , 2019)	
Descrição: Representa o grau de previsibilidade de geração de energia elétrica no curto prazo, como por exemplo, no dia ou no mês presente.	

(continua)

(continuação do Quadro 16)

Indicador: Previsibilidade do Desempenho (longo prazo)	
Unidade: [qualitativo]	Dimensão: Recursos
Número de Ocorrências na RSL: 1	
Referências: (Sun <i>et al.</i> , 2019)	
Descrição: Representa o grau de previsibilidade de desempenho da usina fotovoltaica no longo prazo, como por exemplo, no ano ou na vida útil do sistema.	
Indicador: Produção de Eletricidade	
Unidade: [kWh/ano]	Dimensão: Recursos
Número de Ocorrências na RSL: 4	
Referências: (Makram <i>et al.</i> , 2021; Negreiros <i>et al.</i> , 2020; Pawliczek; Zimmermannova, 2018; Kumar <i>et al.</i> , 2020)	
Descrição: Produção de eletricidade da usina durante um determinado período de tempo.	
Indicador: Produção de Eletricidade na Vida Útil	
Unidade: [kWh]	Dimensão: Recursos
Número de Ocorrências na RSL: 1	
Referências: (Kumar <i>et al.</i> , 2020)	
Descrição: Produção de eletricidade da usina durante sua vida útil.	
Indicador: Produtividade (<i>Yield</i>)	
Unidade: [kWh/kWp]	Dimensão: Tecnológica
Número de Ocorrências na RSL: 2	
Referências: (Makram <i>et al.</i> , 2021; Sun <i>et al.</i> , 2019)	
Descrição: Representa quantos kWh de energia elétrica foram gerados para cada kWp de potência fotovoltaica. Possui melhor representatividade quando vinculada à um ano inteiro de operação, chamado <i>yield</i> anual.	
Indicador: Retorno Sobre o Investimento (ROI)	
Unidade: [%]	Dimensão: Econômica
Número de Ocorrências na RSL: 1	
Referências: (Nagarkatti; Kolar, 2021)	
Descrição: É a relação entre a quantidade de dinheiro ganho (ou perdido) como resultado de um investimento e a quantidade de dinheiro investido.	
Indicador: Risco de Segurança	
Unidade: [qualitativo]	Dimensão: Social
Número de Ocorrências na RSL: 1	
Referências: (Mei; Chen, 2021)	
Descrição: Representa o grau de risco de ferimentos e de acidentes associados ao processo de operação da usina fotovoltaica.	

(continua)

(continuação do Quadro 16)

Indicador: Risco de Vida	
Unidade: [qualitativo]	Dimensão: Social
Número de Ocorrências na RSL: 1	
Referências: (Mei; Chen, 2021)	
Descrição: Representa o grau risco de danos à saúde dos trabalhadores e das comunidades locais devido à emissão de gases tóxicos, de águas residuais e de elementos tóxicos.	
Indicador: Taxa de Crescimento	
Unidade: [%/ano]	Dimensão: Tecnológica
Número de Ocorrências na RSL: 1	
Referências: (Ghenai; Albawab; Bettayeb, 2020)	
Descrição: Taxa de crescimento da geração fotovoltaica em um determinado local avaliado em um determinado período.	
Indicador: Taxa de Degradação dos Módulos	
Unidade: [%/ano]	Dimensão: Tecnológica
Número de Ocorrências na RSL: 1	
Referências: (Garraín <i>et al.</i> , 2020; Kumar <i>et al.</i> , 2020)	
Descrição: Taxa anual de degradação do módulo fotovoltaico.	
Indicador: Taxa de Desempenho (<i>Performance Ratio</i>)	
Unidade: [%]	Dimensão: Tecnológica
Número de Ocorrências na RSL: 5	
Referências: (Escandón; León; Cepeda, 2019; Makram <i>et al.</i> , 2021; Nagarkatti; Kolar, 2021; Parizad; Hatziaioniu, 2019; Sun <i>et al.</i> , 2019)	
Descrição: Representa a capacidade real do sistema fotovoltaico de converter a energia solar disponível no plano dos painéis em eletricidade, expressando em termos percentuais a eficiência de transformação da radiação solar em eletricidade pelo sistema.	
Indicador: Taxa Interna de Retorno (TIR)	
Unidade: [%]	Dimensão: Econômica
Número de Ocorrências na RSL: 1	
Referências: (Pawliczek; Zimmermannova, 2018)	
Descrição: Representa a taxa de desconto que um fluxo de caixa deve ter para que seu Valor Presente Líquido (VPL) iguale-se a zero.	
Indicador: Tempo de Retorno (<i>Payback</i>)	
Unidade: [anos]	Dimensão: Econômica
Número de Ocorrências na RSL: 2	
Referências: (Pawliczek; Zimmermannova, 2018; Sun <i>et al.</i> , 2019)	
Descrição: Tempo necessário, em anos, para que um investidor recupere o seu capital inicial investido em um projeto, em uma aplicação financeira ou em um negócio.	

(continua)

(continuação do Quadro 16)

Indicador: Valor Presente Líquido (VPL)	
Unidade: [R\$]	Dimensão: Econômica
Número de Ocorrências na RSL: 4	
Referências: (Garraín <i>et al.</i> , 2020; Hassan; Das; Hasan, 2022; Naderipour <i>et al.</i> , 2021; Pawliczek; Zimmermannova, 2018)	
Descrição: Determina o valor presente de pagamentos futuros descontados a uma taxa de juros apropriada, menos o custo do investimento inicial.	
Indicador: Vida Útil do Sistema	
Unidade: [anos]	Dimensão: Tecnológica
Número de Ocorrências na RSL: 5	
Referências: (Garraín <i>et al.</i> , 2020; Ghenai; Albawab; Bettayeb, 2020; Nagarkatti; Kolar, 2021; Parizad; Hatziaioniu, 2019; Sun <i>et al.</i> , 2019)	
Descrição: Vida útil estimada de um sistema fotovoltaico.	

Fonte: Autoria própria (2024).

APÊNDICE C

Figura 29 – Termo de Consentimento Livre e Esclarecido – TCLE.

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO - TCLE

Título da Pesquisa: Indicadores de Sustentabilidade para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica

Dados do Pesquisador responsável pela pesquisa:

Nome: Faimara do Rocio Strauhs

Endereço: Rua Deputado Heitor de Alencar Furtado, 5000 - Bloco EC - Bairro Campo

Comprido - CEP: 81280-340 Curitiba - Paraná - Brasil.

Contato: faimara@utfpr.edu.br

Dados do assistente de pesquisa:

Nome: Bruno Sabino Scolari

Endereço: Rua Deputado Heitor de Alencar Furtado, 5000 - Bloco EC - Bairro Campo

Comprido - CEP: 81280-340 Curitiba - Paraná - Brasil.

Contato: brunoengutfpr@gmail.com

Local de realização da pesquisa: O questionário online deve ser respondido em um local seguro e adequado, definido pelo participante da pesquisa.

A) INFORMAÇÕES AO PARTICIPANTE

1. Apresentação da Pesquisa

Gostaríamos de convidá-lo(a) a fazer parte desta pesquisa respondendo a um questionário online sobre Indicadores de Sustentabilidade para Sistemas Fotovoltaicos. O questionário faz parte da etapa de validação da tese de doutorado intitulada: INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA, que está sendo desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade Ambiental Urbana - PPGSAU da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR.

Os 39 indicadores de sustentabilidade apresentados neste formulário foram obtidos por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura e categorizados em 5 dimensões da sustentabilidade (social, ambiental, tecnológica, de recursos e econômica); sendo que nesta etapa de validação, o respondente deve indicar, para cada indicador apresentado, a sua percepção em relação a relevância do respectivo indicador para compor um quadro referencial de indicadores de sustentabilidade para sistemas fotovoltaicos.

O questionário é composto por 40 questões e as respostas serão apresentadas em uma escala de 1 até 5, onde 1 representa "Nada Relevante" e 5 representa "Extremamente Relevante". Caso necessite de alguma informação adicional ou esclarecimentos, por gentileza entre em contato com o assistente de pesquisa.

2. Objetivo Geral

Propor indicadores para avaliação da sustentabilidade de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

3. Participação na pesquisa

Caso aceite este convite, o questionário será preenchido na forma online.

(continua)

(continuação da Figura 29)

4. Confidencialidade

As informações serão registradas de forma a garantir a confidencialidade das respostas e preservar a identidade dos participantes. Desta forma, garantimos que não serão divulgadas informações pessoais e/ou que possam indicar quem são os respondentes desta pesquisa.

5. Riscos e benefícios

a) Riscos: a coleta de dados realizada por meio de questionário online pode envolver riscos associados a constrangimentos e/ou incômodos aos (as) participantes. Neste caso, qualquer respondente que considerar inapropriada alguma pergunta do questionário pode optar por não a responder, sem qualquer tipo de prejuízo. Recomenda-se que o participante responda ao questionário em local seguro e adequado.

b) Benefícios: ao participar da pesquisa, o participante tem como um possível benefício direto a possibilidade de receber os resultados desta pesquisa, os quais serão compartilhados com os participantes que assim o desejarem, após a conclusão do estudo. Possíveis benefícios indiretos estão em contribuir para o avanço do conhecimento na área de Sistemas Fotovoltaicos - SFV, o que auxiliará o avanço desta tecnologia e as tomadas de decisão no setor, possibilitando direcionar de maneira mais eficaz políticas públicas urbanas, planejamentos energéticos, programas de incentivo a instalação de SFV, entre outros, no sentido de tornar os SFV e, consequentemente a geração fotovoltaica como um todo, cada vez mais sustentável em suas diversas dimensões.

6. Critérios de inclusão e exclusão para a coleta de dados a partir dos questionários online

a) Inclusão: a seleção dos especialistas candidatos a participantes da pesquisa será efetuada por meio de busca na Plataforma Lattes, na qual serão pesquisadas as competências e os conhecimentos desejados para o estudo. A busca utilizará a opção Busca Avançada da Plataforma, selecionando-se o filtro Participação Profissional na Grande Área Engenharias, e considerando-se o grande tema Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica, bem como os subtemas: i) Indicadores de Sustentabilidade, ii) Sistemas Fotovoltaicos, iii) Energia Solar Fotovoltaica, iv) Sustentabilidade Ambiental Urbana e v) Desenvolvimento Sustentável. Será ainda considerado como Filtro o Item – Preferências, com período de Produção a partir de 2020. Serão convidados para a participação na pesquisa profissionais maiores de 18 anos, de formação multidisciplinar que atuam em universidades como professores ou pesquisadores, gestores em empresas de economia privada, economia mista, autarquias, conselhos e associações, que estão direta e indiretamente exercendo atividades relacionadas ao tema do estudo e seus subtema, conforme supramencionado. Destaca-se que os participantes especialistas responderão a pesquisa em seu próprio nome, e não em nome que qualquer instituição a qual eles pertençam. Além disso, destaca-se que não haverá distinção do gênero dos participantes e que todos os participantes deverão possuir mais de 18 anos, conforme já mencionado.

b) Exclusão: como os especialistas candidatos a participante da pesquisa serão escolhidos individualmente conforme descrito nos “Critérios de Inclusão”, os critérios de exclusão se resumem aos participantes os quais não for possível obter o endereço de e-mail, aos que não responderem ao questionário até 15/06/2024, aos que responderem menos de 50% das questões - 19 respostas ou menos - e aos que desejarem a qualquer momento a retirada do consentimento de utilização dos dados do participante da pesquisa.

7. Direito de sair da pesquisa e a esclarecimentos durante o processo:

(continua)

(continuação da Figura 29)

O(a) participante tem o direito de deixar o estudo a qualquer momento sem penalização, e a receber esclarecimentos sobre o estudo em qualquer etapa da pesquisa. Além disso, os/as respondentes podem se recusar a participar da pesquisa, ou retirar o seu consentimento a qualquer momento, sem penalização.

Acrescenta-se também que o participante pode receber os resultados deste estudo, se assim desejar. Para isso, haverá um campo no final deste Termo onde o participante pode manifestar a sua vontade em receber ou em não receber os resultados do estudo.

8. Ressarcimento e indenização:

Esta pesquisa não acarretará custos aos respondentes, além de não envolver recursos financeiros e/ou financiamentos para o seu desenvolvimento. Assim, ao concordar em participar deste estudo, os participantes compreendem que não receberão nenhum tipo de compensação financeira. Quanto a indenização ela será realizada conforme os critérios legais da Resolução CNS 466/2012 e na Resolução CNS 510/2016.

9. Esclarecimentos sobre o Comitê de Ética em Pesquisa

O Comitê de Ética em Pesquisa Envolvendo Seres Humanos (CEP) é constituído por uma equipe de profissionais com formação multidisciplinar que está trabalhando para assegurar o respeito aos seus direitos como participante de pesquisa. Ele tem por objetivo avaliar se a pesquisa foi planejada e se será executada de forma ética. Se você considerar que a pesquisa não está sendo realizada da forma como você foi informado ou que você está sendo prejudicado de alguma forma, entre em contato com o Comitê de Ética em Pesquisa Envolvendo Seres Humanos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (CEP/UTFPR). Endereço: Avenida Sete de Setembro, 3165, bloco L sala 07 (pátio central), térreo. Curitiba-PR, Telefone: (41) 3310-4494, e-mail: coep@utfpr.edu.br

OBS.: Por se tratar de um estudo realizado online, os/as participantes da pesquisa devem salvar uma cópia digital ou imprimir este documento, para que tenham registro da sua participação no estudo e acesso a todas as informações referentes ao projeto. Você pode fazer isso clicando na opção "Imprimir > Salvar em PDF" do seu navegador.

Salientamos ainda que os resultados deste estudo, após tabulados e analisados, poderão ser consultados pelos(as) participantes ao final da pesquisa. Você pode assinalar o campo a seguir, para receber o resultados desta pesquisa, caso seja de seu interesse:

- ☐ Sim, quero receber os resultados da pesquisa
- ☐ Não quero receber os resultados da pesquisa

(continua)

(continuação da Figura 29)

Se você respondeu "sim" para a pergunta anterior, por gentileza informar o seu e-mail para que possamos lhe enviar os resultados.

(somente os pesquisadores terão acesso ao seu endereço de e-mail)

Sua resposta

B) CONSENTIMENTO: *

Eu declaro ter conhecimento das informações contidas neste documento e ter recebido respostas claras às minhas questões a propósito da minha participação na pesquisa. Adicionalmente, declaro ter compreendido o objetivo, a natureza, os riscos, benefícios, ressarcimento e indenização relacionados a este estudo. Após reflexão e um tempo razoável, eu decidi, livre e voluntariamente, participar deste estudo. Estou consciente que posso deixar o projeto a qualquer momento, sem nenhum prejuízo.

☐ Li e concordo com o TCLE e desejo responder o Questionário

Eu, Bruno Sabino Scolari, declaro ter apresentado o estudo, explicado seus objetivos, natureza, riscos e benefícios e ter respondido da melhor forma possível às questões formuladas.

Nome completo do pesquisador: Bruno Sabino Scolari

Para todas as questões relativas ao estudo ou para se retirar do mesmo, poderão se comunicar com o pesquisador Bruno Sabino Scolari pelo e-mail:

brunoengutfpr@gmail.com.

Contato do Comitê de Ética em Pesquisa que envolve seres humanos para denúncia, recurso ou reclamações do participante pesquisado: Comitê de Ética em Pesquisa Envolvendo Seres Humanos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (CEP/UTFPR). Endereço: Avenida Sete de Setembro, 3165, bloco L sala 07 (pátio central), térreo. Curitiba-PR, Telefone: (41) 3310-4494, e-mail: coep@utfpr.edu.br

Próxima

Limpar formulário

Fonte: Autoria própria (2024).

APÊNDICE D

Figura 30 – Questionário Enviado para o Painel de Especialistas

1. Indicadores de dimensão Social

Considerando os seguintes indicadores da Dimensão Social:

1 - Aceitabilidade Social

Unidade: [qualitativo]

Descrição: Aceitação da sociedade em relação à tecnologia de geração fotovoltaica.

2 - Criação de Empregos

Unidade: [empregos/MW]

Descrição: Quantidade de empregos gerada na cadeia produtiva fotovoltaica para cada MW de potência instalada.

3 - Interferência na Paisagem

Unidade: [qualitativo]

Descrição: Representa o grau de interferência visual de um determinado sistema fotovoltaico na paisagem do entorno onde este sistema está instalado.

4 - Risco de Segurança

Unidade: [qualitativo]

Descrição: Representa o grau de risco de ferimentos e de acidentes associados ao processo de operação da usina fotovoltaica.

5 - Risco de Vida

Unidade: [qualitativo]

Descrição: Representa o grau de risco de danos à saúde dos trabalhadores e das comunidades locais devido à emissão de gases tóxicos, de águas residuais e de elementos tóxicos.

Selecione a sua percepção em relação a relevância de cada indicador apresentado:

	1 - Nada relevante	2 - Pouco relevante	3 - Relevante	4 - Muito relevante	5 - Extremamente relevante
1 - Aceitabilidade Social	☐	☐	☐	☐	☐
2 - Criação de Empregos	☐	☐	☐	☐	☐
3 - Interferência na Paisagem	☐	☐	☐	☐	☐
4 - Risco de Segurança	☐	☐	☐	☐	☐
5 - Risco de Vida	☐	☐	☐	☐	☐

[Voltar](#)

[Próxima](#)

[Limpar formulário](#)

(continua)

(continuação da Figura 30)

2. Indicadores de dimensão Ambiental

Considerando os seguintes indicadores da Dimensão Ambiental:

6 - Área Ocupada

Unidade: [m²/kWp]

Descrição: Área ocupada por cada kWp de potência instalada do sistema fotovoltaico.

7 - Emissão de Gases de Efeito Estufa no Ciclo de Vida

Unidade: [Kg CO₂-eq/kWh]

Descrição: Relação entre a Emissão de Gases de Efeito Estufa considerando todo o ciclo de vida da usina fotovoltaica e a energia total gerada ou prevista durante a vida útil da usina.

8 - Potencial de Acidificação (AP)

Unidade: [kg SO₂-eq]

Descrição: Quantidade de ácidos depositados no solo e na água relacionados a fabricação, operação e descarte do sistema fotovoltaico, representado em quantidade equivalente de SO₂.

9 - Poluição Sonora

Unidade: [dB]

Descrição: Intensidade do ruído sonoro gerado pela usina fotovoltaica.

Selecione a sua percepção em relação a relevância da cada indicador apresentado:

	1 - Nada relevante	2 - Pouco relevante	3 - Relevante	4 - Muito relevante	5 - Extremamente relevante
6 - Área Ocupada	☐	☐	☐	☐	☐
7 - Emissão de Gases de Efeito Estufa no Ciclo de Vida	☐	☐	☐	☐	☐
8 - Potencial de Acidificação (AP)	☐	☐	☐	☐	☐
9 - Poluição Sonora	☐	☐	☐	☐	☐

[Voltar](#)

[Próxima](#)

[Limpar formulário](#)

(continua)

(continuação da Figura 30)

3. Indicadores de dimensão Tecnológica

Considerando os seguintes indicadores da Dimensão Tecnológica:

10 - Potência Nominal do Sistema

Unidade: [kWp]

Descrição: Potência nominal do sistema fotovoltaico. Convencionalmente considera-se o somatório das potências nominais dos módulos fotovoltaicos da usina, representado em kWp.

11 - Eficiência Energética do Módulo

Unidade: [%]

Descrição: Eficiência energética do módulo fotovoltaico.

12 - Eficiência Energética do Inversor

Unidade: [%]

Descrição: Eficiência energética do inversor do sistema fotovoltaico.

13 - Produtividade (*Yield*)

Unidade: [kWh/kWp]

Descrição: Representa quantos kWh de energia elétrica foram gerados para cada kWp de potência fotovoltaica. Possui melhor representatividade quando vinculada a um ano inteiro de operação, chamado *yield* anual.

14 - Taxa de Desempenho (*Performance Ratio*)

Unidade: [%]

Descrição: Representa a capacidade real do sistema fotovoltaico de converter a energia solar disponível no plano dos painéis em eletricidade, expressando em termos percentuais a eficiência de transformação da radiação solar em eletricidade pelo sistema.

15 - Fator de Capacidade (FC)

Unidade: [%]

Descrição: Representa o percentual da energia efetivamente gerada em relação ao total de energia que seria gerada caso o sistema operasse 24 horas por dia em sua potência nominal. Em outras palavras, representa a porcentagem de tempo em que o sistema está operando em sua capacidade nominal.

16 - Inclinação do Pannel Fotovoltaico

Unidade: [°]

Descrição: Ângulo formado entre o plano horizontal e o ângulo de instalação do pannel fotovoltaico.

17 - Direção do Pannel Fotovoltaico (Azimute)

Unidade: [°]

Descrição: Ângulo formado entre o norte geográfico e a direção de instalação do pannel fotovoltaico.

18 - Taxa de Crescimento

Unidade: [%/ano]

Descrição: Taxa de crescimento da geração fotovoltaica em um determinado local avaliado em um determinado período.

(continua)

(continuação da Figura 30)

19 - Taxa de Degradação dos Módulos

Unidade: [%/ano]

Descrição: Taxa anual de degradação do módulo fotovoltaico.

20 - Vida Útil do Sistema

Unidade: [anos]

Descrição: Vida útil estimada de um sistema fotovoltaico.

21 - Inovação Tecnológica

Unidade: [qualitativo]

Descrição: O grau de inovação da tecnologia fotovoltaica em relação ao desenvolvimento sustentável, às energias renováveis, às perspectivas futuras e à acessibilidade.

22 - Maturidade Tecnológica

Unidade: [qualitativo]

Descrição: Representa o grau de conhecimento e maturidade tecnológica nas áreas de conhecimento necessárias para a correta aplicação da tecnologia fotovoltaica.

23 - Modularidade

Unidade: [qualitativo]

Descrição: Representa o grau de modularidade da tecnologia, ou seja, a facilidade de ampliação da capacidade da planta fotovoltaica existente por meio de inclusão de novos módulos e inversores.

24 - Operabilidade da Planta

Unidade: [qualitativo]

Descrição: Grau de facilidade de operação da planta além da estabilidade de controle do sistema.

25 - Potencial de Integração com Tecnologias Inteligentes

Unidade: [qualitativo]

Descrição: Representa o potencial de integração com o uso de tecnologias inteligentes, como sensoriamento inteligente, Internet das Coisas (IoT) e inteligência artificial, para melhorar o desempenho operacional do sistema.

Selecione a sua percepção em relação a relevância da cada indicador apresentado:

	1 - Nada relevante	2 - Pouco relevante	3 - Relevante	4 - Muito relevante	5 - Extremamente relevante
10 - Potência Nominal do Sistema	☐	☐	☐	☐	☐
11 - Eficiência Energética do Módulo	☐	☐	☐	☐	☐
12 - Eficiência Energética do Inversor	☐	☐	☐	☐	☐

(continua)

(continuação da Figura 30)

19 - Taxa de Degradação dos Módulos

Unidade: [%/ano]

Descrição: Taxa anual de degradação do módulo fotovoltaico.

20 - Vida Útil do Sistema

Unidade: [anos]

Descrição: Vida útil estimada de um sistema fotovoltaico.

21 - Inovação Tecnológica

Unidade: [qualitativo]

Descrição: O grau de inovação da tecnologia fotovoltaica em relação ao desenvolvimento sustentável, às energias renováveis, às perspectivas futuras e à acessibilidade.

22 - Maturidade Tecnológica

Unidade: [qualitativo]

Descrição: Representa o grau de conhecimento e maturidade tecnológica nas áreas de conhecimento necessárias para a correta aplicação da tecnologia fotovoltaica.

23 - Modularidade

Unidade: [qualitativo]

Descrição: Representa o grau de modularidade da tecnologia, ou seja, a facilidade de ampliação da capacidade da planta fotovoltaica existente por meio de inclusão de novos módulos e inversores.

24 - Operabilidade da Planta

Unidade: [qualitativo]

Descrição: Grau de facilidade de operação da planta além da estabilidade de controle do sistema.

25 - Potencial de Integração com Tecnologias Inteligentes

Unidade: [qualitativo]

Descrição: Representa o potencial de integração com o uso de tecnologias inteligentes, como sensoriamento inteligente, Internet das Coisas (IoT) e inteligência artificial, para melhorar o desempenho operacional do sistema.

Selecione a sua percepção em relação a relevância da cada indicador apresentado:

	1 - Nada relevante	2 - Pouco relevante	3 - Relevante	4 - Muito relevante	5 - Extremamente relevante
10 - Potência Nominal do Sistema	☐	☐	☐	☐	☐
11 - Eficiência Energética do Módulo	☐	☐	☐	☐	☐
12 - Eficiência Energética do Inversor	☐	☐	☐	☐	☐

(continua)

(continuação da Figura 30)

13 - Produtividade (Yield)	☐	☐	☐	☐	☐
14 - Taxa de Desempenho (Performance Ratio)	☐	☐	☐	☐	☐
15 - Fator de Capacidade (FC)	☐	☐	☐	☐	☐
16 - Inclinação do Painei Fotovoltaico	☐	☐	☐	☐	☐
17 - Direção do Painei Fotovoltaico (Azimute)	☐	☐	☐	☐	☐
18 - Taxa de Crescimento	☐	☐	☐	☐	☐
19 - Taxa de Degradação dos Módulos	☐	☐	☐	☐	☐
20 - Vida Útil do Sistema	☐	☐	☐	☐	☐
21 - Inovação Tecnológica	☐	☐	☐	☐	☐
22 - Maturidade Tecnológica	☐	☐	☐	☐	☐
23 - Modularidade	☐	☐	☐	☐	☐
24 - Operabilidade da Planta	☐	☐	☐	☐	☐
25 - Potencial de Integração com Tecnologias Inteligentes	☐	☐	☐	☐	☐

Voltar
Próxima
Limpar formulário

(continua)

(continuação da Figura 30)

4. Indicadores de dimensão de Recursos

Considerando os seguintes indicadores da Dimensão de Recursos:

26 - Produção de Eletricidade

Unidade: [kWh/ano]

Descrição: Produção de eletricidade da usina durante um determinado período de tempo.

27 - Produção de Eletricidade na Vida Útil

Unidade: [kWh]

Descrição: Produção de eletricidade da usina durante sua vida útil.

28 - Intensidade de Material (construção)

Unidade: [kg/kWp]

Descrição: A quantidade de material (em kg) necessária para construir um determinado sistema fotovoltaico por unidade de potência nominal (kWp).

29 - Irradiação Global Horizontal

Unidade: [Wh/m².dia]

Descrição: Representa a energia solar total acumulada em um intervalo de tempo que incide sobre uma superfície horizontal.

30 - Previsibilidade de Geração (curto prazo)

Unidade: [qualitativo]

Descrição: Representa o grau de previsibilidade de geração de energia elétrica no curto prazo, como por exemplo, no dia ou no mês presente.

31 - Previsibilidade do Desempenho (longo prazo)

Unidade: [qualitativo]

Descrição: Representa o grau de previsibilidade de desempenho da usina fotovoltaica no longo prazo, como por exemplo, no ano ou na vida útil do sistema.

Selecione a sua percepção em relação a relevância da cada indicador apresentado:

	1 - Nada relevante	2 - Pouco relevante	3 - Relevante	4 - Muito relevante	5 - Extremamente relevante
26 - Produção de Eletricidade	☐	☐	☐	☐	☐
27 - Produção de Eletricidade na Vida Útil	☐	☐	☐	☐	☐
28 - Intensidade de Material (construção)	☐	☐	☐	☐	☐
29 - Irradiação Global	☐	☐	☐	☐	☐

(continua)

(continuação da Figura 30)

30 -

Previsibilidade
de Geração
(curto prazo)

☐☐☐☐☐

31 -

Previsibilidade
do
Desempenho
(longo prazo)

☐☐☐☐☐

Voltar

Próxima

Limpar formulário

(continua)

(continuação da Figura 30)

5. Indicadores de dimensão Econômica

Considerando os seguintes indicadores da Dimensão Econômica:

32 - Custo Total de Instalação

Unidade: [R\$]

Descrição: Somatório de todos os valores associados a instalação da usina fotovoltaica, incluindo projeto, material, execução, entre outros.

33 - Custo Unitário de Instalação

Unidade: [R\$/kWp]

Descrição: Custo por unidade de potência instalada do sistema fotovoltaico.

34 - Fluxo de Caixa Acumulado

Unidade: [R\$]

Descrição: Representa o saldo disponível em caixa em determinado período de análise.

35 - Tempo de Retorno (*Payback*)

Unidade: [anos]

Descrição: Tempo necessário, em anos, para que um investidor recupere o seu capital inicial investido em um projeto, em uma aplicação financeira ou em um negócio.

36 - Custo Nivelado de Energia (LCOE)

Unidade: [R\$/kWh]

Descrição: Relação entre todos os custos associados à instalação e à operação da usina fotovoltaica e a eletricidade estimada gerada ao longo da vida da planta.

37 - Retorno Sobre o Investimento (ROI)

Unidade: [%]

Descrição: É a relação entre a quantidade de dinheiro ganho (ou perdido) como resultado de um investimento e a quantidade de dinheiro investido.

38 - Valor Presente Líquido (VPL)

Unidade: [R\$]

Descrição: Determina o valor presente de pagamentos futuros descontados a uma taxa de juros apropriada, menos o custo do investimento inicial.

39 - Taxa Interna de Retorno (TIR)

Unidade: [%]

Descrição: Representa a taxa de desconto que um fluxo de caixa deve ter para que seu Valor Presente Líquido (VPL) iguale-se a zero.

Selecione a sua percepção em relação a relevância da cada indicador apresentado:

	1 - Nada relevante	2 - Pouco relevante	3 - Relevante	4 - Muito relevante	5 - Extremamente relevante
32 - Custo Total de Instalação	☐	☐	☐	☐	☐

(continua)

(continuação da Figura 30)

33 - Custo Unitário de Instalação	☐	☐	☐	☐	☐
34 - Fluxo de Caixa Acumulado	☐	☐	☐	☐	☐
35 - Tempo de Retorno (Payback)	☐	☐	☐	☐	☐
36 - Custo Nivelado de Energia (LCOE)	☐	☐	☐	☐	☐
37 - Retorno Sobre o Investimento (ROI)	☐	☐	☐	☐	☐
38 - Valor Presente Líquido (VPL)	☐	☐	☐	☐	☐
39 - Taxa Interna de Retorno (TIR)	☐	☐	☐	☐	☐

6. Fim do Questionário

Comentários para o pesquisador:
Obs.: Favor não incluir dados pessoais.

Sua resposta

Voltar

Enviar

Limpar formulário

APÊNDICE E

Tabela 15 – Distribuição de Frequência Absoluta dos Resultados do Questionário

Indicador Avaliado	Número de Respostas na Escala					
	1	2	3	4	5	Total
Dimensão Social						
1 - Aceitabilidade Social	0	1	5	3	7	16
2 - Criação de Empregos	0	0	1	9	6	16
3 - Risco de Segurança	1	3	4	5	3	16
4 - Risco de Vida	2	7	3	1	3	16
Total Parcial	3	11	13	18	19	64
Dimensão Ambiental						
5 - Área Ocupada	1	2	5	5	3	16
6 - Emissão de Gases de Efeito Estufa no Ciclo de Vida	2	2	6	3	3	16
7 - Potencial de Acidificação (AP)	3	3	4	4	2	16
8 - Poluição Sonora	7	7	2	0	0	16
9 - Interferência na Paisagem	1	6	6	2	1	16
Total Parcial	14	20	23	14	9	80
Dimensão Tecnológica						
10 - Potência Nominal do Sistema	0	0	3	4	9	16
11 - Eficiência Energética do Módulo	0	0	3	6	7	16
12 - Eficiência Energética do Inversor	0	0	3	6	7	16
13 - Produtividade (<i>Yield</i>)	0	0	2	1	13	16
14 - Taxa de Desempenho (<i>Performance Ratio</i>)	0	1	3	2	10	16
15 - Fator de Capacidade (FC)	0	1	4	5	6	16
16 - Inclinação do Pannel Fotovoltaico	0	1	2	4	9	16
17 - Direção do Pannel Fotovoltaico (Azimute)	0	0	2	7	7	16
18 - Taxa de Crescimento	0	2	6	4	4	16
19 - Taxa de Degradação dos Módulos	0	0	7	6	3	16
20 - Vida Útil do Sistema	0	0	2	9	5	16
21 - Inovação Tecnológica	0	1	2	5	8	16
22 - Maturidade Tecnológica	0	0	5	4	7	16
23 - Modularidade	0	1	3	7	5	16
24 - Operabilidade da Planta	0	1	4	5	6	16
25 - Potencial de Integração com Tecnologias Inteligentes	0	1	5	6	4	16
Total Parcial	0	9	56	81	110	256

(continua)

(continuação da Tabela 15)

Dimensão Recursos						
26 - Produção de Eletricidade	0	0	2	4	10	16
27 - Produção de Eletricidade na Vida Útil	0	1	2	4	9	16
28 - Intensidade de Material (construção)	1	4	5	2	4	16
29 - Irradiação Global Horizontal	0	2	4	3	7	16
30 - Previsibilidade de Geração (curto prazo)	0	1	5	6	4	16
31 - Previsibilidade do Desempenho (longo prazo)	0	0	3	6	7	16
Total Parcial	1	8	21	25	41	96
Dimensão Econômica						
32 - Custo Total de Instalação	0	0	1	4	11	16
33 - Custo Unitário de Instalação	0	1	2	8	5	16
34 - Fluxo de Caixa Acumulado	0	4	3	8	1	16
35 - Tempo de Retorno (<i>Payback</i>)	0	0	4	4	8	16
36 - Custo Nivelado de Energia (LCOE)	0	1	4	5	6	16
37 - Retorno Sobre o Investimento (ROI)	0	1	2	6	7	16
38 - Valor Presente Líquido (VPL)	0	1	6	6	3	16
39 - Taxa Interna de Retorno (TIR)	0	1	7	3	5	16
Total Parcial	0	9	29	44	46	128
Total	18	57	142	182	225	624

Fonte: Autoria própria (2024).

Tabela 16 – Distribuição de Frequência Relativa dos Resultados do Questionário

Indicador Avaliado	Número de Respostas					
	1	2	3	4	5	Total
Dimensão Social						
1 - Aceitabilidade Social	0%	6%	31%	19%	44%	100%
2 - Criação de Empregos	0%	0%	6%	56%	38%	100%
3 - Risco de Segurança	6%	19%	25%	31%	19%	100%
4 - Risco de Vida	13%	44%	19%	6%	19%	100%
Total Parcial	5%	17%	20%	28%	30%	100%
Dimensão Ambiental						
5 - Área Ocupada	6%	13%	31%	31%	19%	100%
6 - Emissão de Gases de Efeito Estufa no Ciclo de Vida	13%	13%	38%	19%	19%	100%
7 - Potencial de Acidificação (AP)	19%	19%	25%	25%	13%	100%
8 - Poluição Sonora	44%	44%	13%	0%	0%	100%
9 - Interferência na Paisagem	6%	38%	38%	13%	6%	100%
Total Parcial	18%	25%	29%	18%	11%	100%
Dimensão Tecnológica						
10 - Potência Nominal do Sistema	0%	0%	19%	25%	56%	100%
11 - Eficiência Energética do Módulo	0%	0%	19%	38%	44%	100%
12 - Eficiência Energética do Inversor	0%	0%	19%	38%	44%	100%
13 - Produtividade (<i>Yield</i>)	0%	0%	13%	6%	81%	100%
14 - Taxa de Desempenho (<i>Performance Ratio</i>)	0%	6%	19%	13%	63%	100%
15 - Fator de Capacidade (FC)	0%	6%	25%	31%	38%	100%
16 - Inclinação do Pannel Fotovoltaico	0%	6%	13%	25%	56%	100%
17 - Direção do Pannel Fotovoltaico (Azimute)	0%	0%	13%	44%	44%	100%
18 - Taxa de Crescimento	0%	13%	38%	25%	25%	100%
19 - Taxa de Degradação dos Módulos	0%	0%	44%	38%	19%	100%
20 - Vida Útil do Sistema	0%	0%	13%	56%	31%	100%
21 - Inovação Tecnológica	0%	6%	13%	31%	50%	100%
22 - Maturidade Tecnológica	0%	0%	31%	25%	44%	100%
23 - Modularidade	0%	6%	19%	44%	31%	100%
24 - Operabilidade da Planta	0%	6%	25%	31%	38%	100%
25 - Potencial de Integração com Tecnologias Inteligentes	0%	6%	31%	38%	25%	100%
Total Parcial	0%	4%	22%	32%	43%	100%

(continua)

(continuação da Tabela 16)

Dimensão Recursos						
26 - Produção de Eletricidade	0%	0%	13%	25%	63%	100%
27 - Produção de Eletricidade na Vida Útil	0%	6%	13%	25%	56%	100%
28 - Intensidade de Material (construção)	6%	25%	31%	13%	25%	100%
29 - Irradiação Global Horizontal	0%	13%	25%	19%	44%	100%
30 - Previsibilidade de Geração (curto prazo)	0%	6%	31%	38%	25%	100%
31 - Previsibilidade do Desempenho (longo prazo)	0%	0%	19%	38%	44%	100%
Total Parcial	1%	8%	22%	26%	43%	100%
Dimensão Econômica						
32 - Custo Total de Instalação	0%	0%	6%	25%	69%	100%
33 - Custo Unitário de Instalação	0%	6%	13%	50%	31%	100%
34 - Fluxo de Caixa Acumulado	0%	25%	19%	50%	6%	100%
35 - Tempo de Retorno (<i>Payback</i>)	0%	0%	25%	25%	50%	100%
36 - Custo Nivelado de Energia (LCOE)	0%	6%	25%	31%	38%	100%
37 - Retorno Sobre o Investimento (ROI)	0%	6%	13%	38%	44%	100%
38 - Valor Presente Líquido (VPL)	0%	6%	38%	38%	19%	100%
39 - Taxa Interna de Retorno (TIR)	0%	6%	44%	19%	31%	100%
Total Parcial	0%	7%	23%	34%	36%	100%
Total	3%	9%	23%	29%	36%	100%

Fonte: Autoria própria (2024).

APÊNDICE F

Tabela 17 – Frequência Acumulada Absoluta

Número do Indicador Avaliado	Frequência Acumulada Absoluta das Respostas				
	1	1+2	1+2+3	1+2+3+4	1+2+3+4+5
1	0	1	6	9	16
2	0	0	1	10	16
3	1	4	8	13	16
4	2	9	12	13	16
5	1	3	8	13	16
6	2	4	10	13	16
7	3	6	10	14	16
8	7	14	16		
9	1	7	13	15	16
10	0	0	3	7	16
11	0	0	3	9	16
12	0	0	3	9	16
13	0	0	2	3	16
14	0	1	4	6	16
15	0	1	5	10	16
16	0	1	3	7	16
17	0	0	2	9	16
18	0	2	8	12	16
19	0	0	7	13	16
20	0	0	2	11	16
21	0	1	3	8	16
22	0	0	5	9	16
23	0	1	4	11	16
24	0	1	5	10	16
25	0	1	6	12	16
26	0	0	2	6	16
27	0	1	3	7	16
28	1	5	10	12	16
29	0	2	6	9	16
30	0	1	6	12	16
31	0	0	3	9	16
32	0	0	1	5	16
33	0	1	3	11	16
34	0	4	7	15	16
35	0	0	4	8	16
36	0	1	5	10	16
37	0	1	3	9	16
38	0	1	7	13	16
39	0	1	8	11	16

Fonte: Autoria própria (2024).

Tabela 18 – Frequência Acumulada Relativa

Número do Indicador Avaliado	Frequência Acumulada Relativa das Respostas				
	1	1+2	1+2+3	1+2+3+4	1+2+3+4+5
1	0	0,0625	0,375	0,5625	0,999758
2	0	0	0,0625	0,625	0,999758
3	0,0625	0,25	0,5	0,8125	0,999758
4	0,125	0,5625	0,75	0,8125	0,999758
5	0,0625	0,1875	0,5	0,8125	0,999758
6	0,125	0,25	0,625	0,8125	0,999758
7	0,1875	0,375	0,625	0,875	0,999758
8	0,4375	0,875	0,999758	0	0
9	0,0625	0,4375	0,8125	0,9375	0,999758
10	0	0	0,1875	0,4375	0,999758
11	0	0	0,1875	0,5625	0,999758
12	0	0	0,1875	0,5625	0,999758
13	0	0	0,125	0,1875	0,999758
14	0	0,0625	0,25	0,375	0,999758
15	0	0,0625	0,3125	0,625	0,999758
16	0	0,0625	0,1875	0,4375	0,999758
17	0	0	0,125	0,5625	0,999758
18	0	0,125	0,5	0,75	0,999758
19	0	0	0,4375	0,8125	0,999758
20	0	0	0,125	0,6875	0,999758
21	0	0,0625	0,1875	0,5	0,999758
22	0	0	0,3125	0,5625	0,999758
23	0	0,0625	0,25	0,6875	0,999758
24	0	0,0625	0,3125	0,625	0,999758
25	0	0,0625	0,375	0,75	0,999758
26	0	0	0,125	0,375	0,999758
27	0	0,0625	0,1875	0,4375	0,999758
28	0,0625	0,3125	0,625	0,75	0,999758
29	0	0,125	0,375	0,5625	0,999758
30	0	0,0625	0,375	0,75	0,999758
31	0	0	0,1875	0,5625	0,999758
32	0	0	0,0625	0,3125	0,999758
33	0	0,0625	0,1875	0,6875	0,999758
34	0	0,25	0,4375	0,9375	0,999758
35	0	0	0,25	0,5	0,999758
36	0	0,0625	0,3125	0,625	0,999758
37	0	0,0625	0,1875	0,5625	0,999758
38	0	0,0625	0,4375	0,8125	0,999758
39	0	0,0625	0,5	0,6875	0,999758

Fonte: Autoria própria (2024).

Tabela 19 – Frequências Relativas Acumuladas pela Inversa da Curva Normal

Nº do Indicador Avaliado	Quantis				SOMA	MÉDIA (P)	N-P
	C1	C2	C3	C4			
1		-1,5341	-0,3186	0,1573	-1,6954	-0,5651	0,3678
2			-1,5341	0,3186	-1,2155	-0,6077	0,4104
3	-1,5341	-0,6745	0,0000	0,8871	-1,3215	-0,3304	0,1330
4	-1,1503	0,1573	0,6745	0,8871	0,5686	0,1421	-0,3395
5	-1,5341	-0,8871	0,0000	0,8871	-1,5341	-0,3835	0,1861
6	-1,1503	-0,6745	0,3186	0,8871	-0,6191	-0,1548	-0,0426
7	-0,8871	-0,3186	0,3186	1,1503	0,2632	0,0658	-0,2632
8	-0,1573	1,1503	3,4900		4,4830	1,4943	-1,6917
9	-1,5341	-0,1573	0,8871	1,5341	0,7298	0,1825	-0,3798
10			-0,8871	-0,1573	-1,0445	-0,5222	0,3248
11			-0,8871	0,1573	-0,7298	-0,3649	0,1675
12			-0,8871	0,1573	-0,7298	-0,3649	0,1675
13			-1,1503	-0,8871	-2,0375	-1,0187	0,8214
14		-1,5341	-0,6745	-0,3186	-2,5272	-0,8424	0,6450
15		-1,5341	-0,4888	0,3186	-1,7043	-0,5681	0,3707
16		-1,5341	-0,8871	-0,1573	-2,5786	-0,8595	0,6621
17			-1,1503	0,1573	-0,9930	-0,4965	0,2991
18		-1,1503	0,0000	0,6745	-0,4759	-0,1586	-0,0388
19			-0,1573	0,8871	0,7298	0,3649	-0,5623
20			-1,1503	0,4888	-0,6616	-0,3308	0,1334
21		-1,5341	-0,8871	0,0000	-2,4213	-0,8071	0,6097
22			-0,4888	0,1573	-0,3315	-0,1657	-0,0317
23		-1,5341	-0,6745	0,4888	-1,7198	-0,5733	0,3759
24		-1,5341	-0,4888	0,3186	-1,7043	-0,5681	0,3707
25		-1,5341	-0,3186	0,6745	-1,1783	-0,3928	0,1954
26			-1,1503	-0,3186	-1,4690	-0,7345	0,5371
27		-1,5341	-0,8871	-0,1573	-2,5786	-0,8595	0,6621
28	-1,5341	-0,4888	0,3186	0,6745	-1,0298	-0,2574	0,0601
29		-1,1503	-0,3186	0,1573	-1,3117	-0,4372	0,2398
30		-1,5341	-0,3186	0,6745	-1,1783	-0,3928	0,1954
31			-0,8871	0,1573	-0,7298	-0,3649	0,1675
32			-1,5341	-0,4888	-2,0229	-1,0114	0,8141
33		-1,5341	-0,8871	0,4888	-1,9325	-0,6442	0,4468
34		-0,6745	-0,1573	1,5341	0,7023	0,2341	-0,4315
35			-0,6745	0,0000	-0,6745	-0,3372	0,1399
36		-1,5341	-0,4888	0,3186	-1,7043	-0,5681	0,3707
37		-1,5341	-0,8871	0,1573	-2,2640	-0,7547	0,5573
38		-1,5341	-0,1573	0,8871	-0,8043	-0,2681	0,0707
39		-1,5341	0,0000	0,4888	-1,0453	-0,3484	0,1511
PONTOS DE CORTE	-1,1852	-1,0723	-0,3941	0,3748	-38,4909	-----	-----
				N=	-0,1974		

Fonte: Autoria própria (2024).

Tabela 20 – Cálculo do Coeficiente de Kendall

Nº do Indicador Avaliado	Soma das Respostas
1	64
2	69
3	54
4	44
5	55
6	51
7	47
8	27
9	44
10	70
11	68
12	68
13	75
14	69
15	64
16	69
17	69
18	58
19	60
20	67
21	68
22	66
23	64
24	64
25	61
26	72
27	69
28	52
29	63
30	61
31	68
32	74
33	65
34	54
35	68
36	64
37	67
38	59
39	60
Média das Somas	61,82
Variância das Somas	90,45
Coeficiente de Concordância Kendall (W)	0,00279

Fonte: Autoria própria (2024).

ÍNDICE ONOMÁSTICO

A

- Abdalazeem, 2022 93
- Ackermann; Anderson; Soder, 2001 87
- Acselrad, 1999 14, 36, 45
- Adewumi *et al.*, 2019 64, 65, 68, 154
- Afshari *et al.* (2022) 63
- Agência Nacional de Energia Elétrica
(2023) 38
- Agência Nacional de Energia Elétrica,
2015 89
- Agência Nacional de Energia Elétrica,
2023 83, 90
- Agência Nacional de Energia Elétrica,
2024a 79
- Akande *et al.* (2019) 49
- Akande *et al.*, 2019 49
- Alanne e Saari (2006) 72
- Albino; Berardi, 2012 15
- Alcocer *et al.* (2024) 55
- Algarni; Bhattacharya, 2009 88
- Altun; Kilic, 2020 22
- Amazonas, 2009 55
- Amorim, 2009 51
- Amorin (2009) 52
- Andrade; Tachizawa; Carvalho, 2000 44
- Antunes (2014) 139
- Arnott, Moser, Goodrich, 2016 60
- Associação Brasileira de Normas
Técnicas, 2008 82
- Associação Brasileira de Normas
Técnicas, 2020 81, 82
- Bakshi e Fiksel (2003) 71
- Bardin (2016) 35, 124, 126, 127, 149
- Bardin, 2016 127, 128
- Barin *et al.*; 2010 87
- Bauwens; Gotchev; Holstenkamp, 2016 72
- Baynes e Wiedmann (2012) 50
- Bebbington e Unerman (2018) 59
- Benelli (2019) 124
- Berardi (2013) 15
- Berardi, 2013 15, 37, 51
- Berkes (2005) 19, 37
- Berliner e Brimson (1988). 20, 38, 62, 130,
151
- Berliner; Brimson, 1988 61
- Bibri e Krogstie (2017) 20
- Bibri; Krogstie, 2017 18, 49
- Bicudo (2008) 41
- Biedermann *et al.*, 2024 16
- Bloom *et al.* (1956) 23
- Bloom *et al.*, 1956 23
- Bodansky, 2016 48
- Boeff, 2013 72, 87
- Borges (2007) 142, 148, 161, 162, 163,
169
- Borges e Tachibana (2005) 14
- Borges; Tachibana, 2005 14, 15, 37, 44, 45
- Bório, 2014 91
- Brasil, 1996 47
- Brasil, 2016 48
- Brizola e Fantin (2017) 113
- Brunton *et al.*, 2012 113
- Butkiene *et al.* (2024) 68
- Butkiene *et al.*, 2024 64, 65, 66, 68, 154
- Butturi *et al.* (2018) 27, 72
- Butturi *et al.*, 2018 70, 91

B

Bakkes, 2012 64, 65, 66

C

- Caldeira (2018).....20, 62, 130, 149, 151
- Caldeira, 2018 61, 129
- Callado e Fensterseifer (2010) . 20, 38, 62, 130, 149, 151
- Callado; Fensterseifer, 2010 61, 62
- Campos, 2016 82, 83
- CAPES (2011)..... 31
- Cardoso (2019) 93
- Cardoso, 2019..... 93, 94
- Carreño (2009) 141
- Carson, 1962..... 43
- Carvalho; Magalhães; Domingues, 2019..... 22
- Castro e Dantas (2018) 87
- Cenek; Hlavacek, 2019 92, 93, 101
- Centro de Informações das Nações Unidas no Brasil, 2021..... 19, 37
- Ciegis, Ramanauskiene e Martinkus (2009) 52, 53
- Coimbra (2000) 41
- Comissão Mundial Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, 1987 .. 14, 15, 37, 45, 52
- Conforto, Amaral e Silva (2011) 124
- Connolly; Lund; Mathiesen, 2016 18, 73
- Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável, 2019.. 46
- Convenção Quadro Sobre Mudança do Clima, 2015 48, 70
- Coutinho, Pompeu e Oliveira Jr. (2016). 53
- Coutinho; Pompeu; Oliveira Jr, 2009 53
- Creswell e Clark (2014) 38, 105
- Creswell; Clark, 201434, 35, 100, 105
- Dayan, 2023 49
- Delbecq, Van de Ven, e Gustafson (1975) 143
- Denholm e Kulcinski (2004)..... 63
- Dias (2017)..... 53
- Diniz (2002) 47
- Diniz, 2002 47
- Dlouhá; Pospíšilová, 2018 57
- Dorning *et al.* (2019)..... 63
- Dresch, Lacerda e Antunes Jr. (2015).. 34, 35, 38, 107, 111, 113, 114, 149
- Dresch, Lacerda e Antunes Jr. (2022) 108, 112
- Dresch; Lacerda; Antunes Jr., 2015 ... 107, 110, 113, 115
- Durand (1971) 142

E

- e Strauhs (2024)..... 132
- Echeverría e Hott (1990) 139
- Edenhofer *et al.*, 2014 92
- Elkington; 2004..... 53
- Empresa de Pesquisa Energética (2024b) 18
- Empresa de Pesquisa Energética (2024b). 21
- Empresa de Pesquisa Energética, 2015 25, 103
- Empresa de Pesquisa Energética, 2019 74
- Empresa de Pesquisa Energética, 2020 21, 25, 26
- Empresa de Pesquisa Energética, 2024 92
- Empresa de Pesquisa Energética, 2024a 18, 20, 77, 78, 84
- Empresa de Pesquisa Energética, 2024b 77

D

- Dansereau (1999) 19, 37
- Dantas; Pompermayer, 2018..... 22

Energy Information Administration (2009)	71
Energy Information Administration (2018)	70
Energy Information Administration, 2022	73
Escandón; León; Cepeda, 2019	224, 230, 231, 232, 235
Estévez e Gallastegui (2005)	141, 142
Estévez; Gallastegui, 2005	138, 149
Evans, Strezov e Evans (2009)	63

F

Facchini, 2017	91
Falaghi <i>et al.</i> , 2011	87
Fernandes e Rauhen (2016)	19, 37
Fernandes e Vieira (2014)	13
Fernandes; Vieira, 2014	14
Fernandez, 2011	51
Ferraz; Belhot, 2010	23
Fink <i>et al.</i> (1991)	143
Flores e Gómez-Limón (2006)	141
Fonseca <i>et al.</i> (2021a)	87
Fonseca <i>et al.</i> (2021b)	71, 72, 87
Fonseca <i>et al.</i> , 2021a	72
Fonseca <i>et al.</i> , 2021b	70, 71, 88
Fonseca <i>et al.</i> ; 2019	88
Fontoura; Guimarães, 2012	47
Formolli <i>et al.</i> (2022)	92, 94, 95
Formolli <i>et al.</i> , 2022	92, 96
Fu e Zhang (2017)	20, 38, 49
Fu; Zhang, 2017	49

G

Gagnon, Bélanger e Uchiyama (2002)	63
Gallopín (1996)	20, 38, 60, 61
Gallopín, 1996	153

Garraín <i>et al.</i> , 2020	226, 229, 230, 233, 235, 236
Gazoli; Villalva; Guerra, 2012	81
Ghenai, Albawab e Bettayeb (2020)	19, 37, 55, 63, 155
Ghenai; Albawab; Bettayeb, 2020	21, 126, 151, 224, 229, 230, 231, 233, 235, 236
Giannarou e Zervas (2014)	149, 166, 168
Gibbons <i>et al.</i> (1994)	107, 108
Gibbons <i>et al.</i> , 1994	107, 108
Gil, 2002	105, 108
Goldemberg; Barbosa, 2004	43
Gomes (2013)	17, 73
Griggs <i>et al.</i> , 2013	56, 57
Guedes (2022)	124
Guedes, 2013	88
Guedes, 2022	119, 120
Guertin e Bernhard (2005)	38
Gugelmin <i>et al.</i> (2003)	46
Gugelmin <i>et al.</i> , 2003	46
Guimarães; Fontoura, 2012	47

H

Hajer, 1995	15
Hardi; Zdan; 1997	64
Hassan; Das; Hasan, 2022	226, 229, 230, 236
Hasson e Keeney (2011)	138, 169
Hasson, Keeney e McKenna (2000)	143
Heise <i>et al.</i> (2024)	138
Heise <i>et al.</i> , (2024)	139
Heise <i>et al.</i> , 2024	138, 143, 149
Henriques (2010)	71, 73
Henriques e Schnorr (2010)	71
Henriques, 2010	71
Hiremath <i>et al.</i> (2013)	20
Hiremath <i>et al.</i> , 2013	18, 49

Hogan (2007)	43
Hogan, 2007	43
Holling (1978)	20, 38
Holling, 1978	60
Hondo (2005)	63
Hopwood, Mellor e O'Brien (2005)	14
Hopwood; Mellor; O'brien, 2005	16
Huetting e Reijnders (2004)	14
Huetting; Reijnders, 2004	15
Hugé <i>et al.</i> , 2013	15

I

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2015	16, 61
Instituto Brasileiro de Geografia E Estatística, 2015	60
Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia, 2015	46
International Energy Agency, 2019a	70
International Energy Agency, 2019b	71
International Institute for Sustainable Development (2009)	67, 136
International Institute for Sustainable Development, 2009	66
International Institute For Sustainable Development, 2009	68
International Renewable Energy Agency, 2018	70, 71
Izquierdo (2022)	20, 38, 48, 49, 50
Izquierdo, 2022	18, 49, 51

J

Jacobi (2002)	47
Jong e Vijge (2021)	15, 37
Jong; Vijge, 2021	13

K

Karekezi; Lata; Coelho, 2004	73, 74
Klopp e Petretta (2017)	48, 49, 50
Klopp; Petretta, 2017	49
Kuang <i>et al.</i> , 2016	18, 73
Kumar <i>et al.</i> (2020)	95
Kumar <i>et al.</i> , 2016	72
Kumar <i>et al.</i> , 2020 ...	93, 94, 225, 230, 232, 234, 235

L

Lajara <i>et al.</i> (2023)	15, 19
Lajara <i>et al.</i> , 2023	15
Lambert; Silva, 2012	72
Landeta (1999)	143
Larivière e Lafrance (1999)	49, 50, 92
Latif <i>et al.</i> (2016)	139, 149, 166, 168
Le Blanc (2015)	59, 131
Leal Filho <i>et al.</i> (2018)	59
Leal Filho <i>et al.</i> , 2018	131
Leff (2000)	19, 37
Lenzen (2008)	63
Li e Yi (2020)	49
Li <i>et al.</i> , 2020	70
Linstone e Turoff (1975)	139
Lora; Haddad, 2006	88

M

Maani <i>et al.</i> , 2020	22
Magrini, 2001	14, 43
Mahmoudi; Huda; Behnia, 2020	22
Maia e Pires (2011)	37, 55
Maia; Pires, 2011	51, 52, 53, 55
Makram <i>et al.</i> , 2021	228, 231, 232, 234, 235
Malheiros, Philippi Jr. e Coutinho (2008)	20, 38

- Malheiros, Phlippi Jr. e Coutinho (2008) 16
- Marconi; Lakatos, 2002 35, 105
- Marconi; Lakatos, 2003 105
- Marini; Rossi, 2005..... 22
- Marrone *et al.*; 2023 88
- Martens, 2006 15
- Mattar Neto, Krüger e Dziedzic (2009) .. 16
- Mattar Neto; Krüger; Dziedzic, 2009..... 16
- Mayer; Szilágyi; Gróf, 2020 22
- Mcarthur; Rasmussen, 2018 56
- McCollum *et al.* (2018) 59, 132
- Mckenna *et al.*; 2018 72
- Mcqueen; Noak, 1988 60
- Meadows (1998)..... 16, 20, 26, 38, 60, 62, 130, 149, 151
- Meadows *et al.*, 1972 14, 43
- Meadows, 1998 22, 60, 61, 129, 153
- Mebratu, 1998 44
- Mega; Pedersen, 1998 60
- Mei e Chen (2021)..... 19, 37, 55, 155
- Mei; Chen, 2021 .. 151, 224, 229, 230, 231, 232, 233, 235
- Meireles e Cendón (2010) 124
- Meireles; Cendón, 2010 126, 127
- Mello e Hogan (2007) 45
- Mello, 2003 46
- Mello; Hogan, 2007 44, 46
- Miller e Spoolman (2021) 41
- Minayo, 2009..... 138, 153
- Ministério do Meio Ambiente, 2015 44
- Mohd, Latiff, Azhar, 2024 16
- Moldan, Janousková e Hák (2012)..... 59
- Montibeller Filho (1993)..... 52
- Moreira *et al.* (2024) 16, 25
- Moreira *et al.*, 2024 16
- Moreira; Caleffe, 2006 34
- Morin (2010) 19, 37
- Morse, 2024 74
- Movimento Nacional ODS, 2020 19, 37, 56
- Movimento Nacional ODS, 2022 55
- Mukherjee *et al.* (2015)..... 138, 143, 169
- Munaretto, Corrêa e Chunha (2013).... 140
- Munaretto, Corrêa e Cunha (2013)..... 139, 140, 141, 168
- Munaretto, Corrêa e Cunha, 2013 149
- N**
- Naderipour *et al.*, 2021 227, 231, 232, 233, 236
- Nagarkatti e Kolar (2021) ... 19, 37, 55, 99, 155
- Nagarkatti; Kolar, 2021 227, 229, 230, 231, 233, 234, 235, 236
- Nakano, 2017 94
- Narloch; Machado; Scheiner, 2019 14
- National Geographic Society, 2023 74
- National Geographic Society, 2024 . 73, 78
- Neely *et al.* (1997) 20, 38, 62, 130, 149, 151
- Neely *et al.*, 1997 61
- Negreiros *et al.*, 2020 225, 233, 234
- Nerini *et al.* (2017) 59
- Nerini *et al.* (2018) 132
- Nilsson, Griggs e Visbeck (2016) .. 59, 132
- Nonaka; Konno, 1998 34
- O**
- Olabi *et al.* (2023).... 16, 21, 26, 38, 56, 68, 149
- Olabi *et al.*, 2023 18, 21, 22, 64, 73
- Olabuénaga e Uribarri (1989) 143
- Organização das Nações Unidas (2022) 92
- Organização das Nações Unidas, 1972 14, 43, 44

Organização das Nações Unidas, 2001	16
Organização das Nações Unidas, 2007	15
Organização das Nações Unidas, 2015	17, 48, 55, 57, 59, 129, 131
Organização das Nações Unidas, 2016	19, 37, 57
Organização das Nações Unidas, 2019	49
Organização Mundial da Saúde (2006)	71
Orzes <i>et al.</i> , 2018	57

P

Page <i>et al.</i> (2021)	34, 35, 38, 111, 112, 123, 149
Parisca, 1995	138, 149
Parizad; Hatziadoniu, 2019	153, 226, 230, 233, 235, 236
Pawliczek; Zimmermannova, 2018	153, 227, 231, 233, 234, 235, 236
Peixer, 2019	48
Penteado e Duarte (2014)	67, 136
Pepermans <i>et al.</i> , 2005	87
Pereira <i>et al.</i> , 2017	78, 80, 81
Peteleaza <i>et al.</i> (2024)	49, 92
Phichetkunbodee <i>et al.</i> (2023)	138
Philippi Jr. e Coutinho (2008)	61
Philippi Jr. e Malheiros (2012)	20, 38
Philippi Jr. <i>et al.</i> (2000)	40
Philippi Jr. <i>et al.</i> (2014)	43, 44, 46
Philippi Jr. <i>et al.</i> , 2000	40
Philippi Jr. <i>et al.</i> , 2013	14, 45, 46
Philippi Jr. <i>et al.</i> , 2014	43, 47
Pinho e Galdino (2014)	38
Pinho; Galdino, 2014	80, 81
Pintér <i>et al.</i> (2012)	65, 68, 133, 149
Pintér <i>et al.</i> , 2012	129
Pintér <i>et al.</i> , 2012	64, 65, 66, 68, 154
Polany, 1967	34

Pott e Estrela (2017)	43, 44, 45, 47
Pott; Estrela, 2017	14, 43, 44, 45, 46, 47
Prates <i>et al.</i> (2020)	17
Prates <i>et al.</i> , 2020	17
Premier, 2022	92, 101
Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, 2002	44

R

Ravetz, 2000	60
Remenyi <i>et al.</i> (1998)	33
REN21 (2022)	76, 79
REN21 (2024)	74, 75, 76, 84
REN21, 2021	92
REN21, 2022	71, 73, 74, 76, 79, 81, 82, 84, 91, 93
REN21, 2024	18, 74, 75, 84
RIO+20, 2012	19, 48
RIO+20, 2012)	37
Robinson (2004)	14
Robinson, 2004	14, 45
Roe, 1998	15
Romulo <i>et al.</i> , 2024	15
Rong e Lahdelma (2016)	72
Ruiz; Pradas; Ruiz, 2017	22
Rüther (2004)	38, 93
Rüther, 2004	94
Ruthes e Silva (2015)	115

S

Sachs (1986)	19, 37
Sachs (1993)	49, 53
Sachs (2002)	16, 53, 55
Sachs (2012)	56
Sachs, 1986	51
Sachs, 2008	55
Salvia <i>et al.</i> (2019)	56

V

Vallance; Perkins, Dixon, 2011	16
Van Aken (2011)	111
Van Aken, 2004	107
Van Bellen (2002).....	20, 38, 59, 63, 149
Van Bellen, 2002	64
Vassiliades; Savvides; Buonomano; 2022	93
Veleva e Ellenbecker (2000)	62
Vergara (2008)	143
Vieira (1992).....	19, 37
Vijge, 2021	52
Villalva e Gazoli (2012).....	38
Villalva; Gazoli, 2012	81
Vyas <i>et al.</i> , 2022.....	93

W

Walters <i>et al.</i> (2021)	138
Wang <i>et al.</i> (2024).....	17
Weisser (2007)	63
Williams; Millington, 2004	15

Y

Yu e Wen (2010)	49
Yu; Halog, 2015.....	22

Z

Zeijl-Rozema <i>et al.</i> , 2008.....	15
Zhan e Li (2024)	19, 21, 37, 55, 155
Zhang e Chen (2021)	49, 50
Zhang; Chen, 2021	50, 51
Zhou <i>et al.</i> (2024)	20, 27, 38
Zhou <i>et al.</i> , 2024	49, 64