



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS



GUSTAVO LEITE GONÇALVES

**AVALIAÇÃO ECONÔMICA E AMBIENTAL DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO INTEGRADO À CONSTRUÇÃO - BIPV**

JOÃO PESSOA - PB
2021

PPGER / MESTRADO ACADÊMICO / Nº XX

GUSTAVO LEITE GONÇALVES

**AVALIAÇÃO ECONÔMICA E AMBIENTAL DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO INTEGRADO À CONSTRUÇÃO - BIPV**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em Energias Renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Raphael Abrahão

**JOÃO PESSOA - PB
2021**



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

ATA nº 79 da Sessão de Defesa Dissertação do Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Universidade Federal da Paraíba.

Ao vigésimo sexto dia do mês de julho de dois mil e vinte e um foi instalada a Banca de Defesa de Dissertação do Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas em Home Office, as 9h00, via Google Meet (meet.google.com/pnm-zuqi-mwt) a que se submeteu a defesa pública de GUSTAVO LEITE GONÇALVES, matrícula 20191024701, com o título "AVALIAÇÃO ECONÔMICA E AMBIENTAL DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO INTEGRADO À CONSTRUÇÃO - BIPV". A Comissão Examinadora esteve constituída pelos professores: RAPHAEL ABRAHAO (UFPB), PAULO ROTELLA JUNIOR (UFPB), e VICTOR FELIPE MOURA BEZERRA MELO (UFPB). Concluídos os trabalhos de apresentação e arguição, o(a) candidato(a) foi **APROVADO** pela Comissão Examinadora. E, para constar, foi lavrada a presente ata, assinada pelos membros da Comissão.

Observações: As sugestões da banca serão seguidas.

Membros da Banca Examinadora:

Profa. Dr. RAPHAEL ABRAHAO
Orientador(a)

Prof. Dr. PAULO ROTELLA JUNIOR -
UFPB
Examinador(a) Interno(a)

Prof. Dr. VICTOR FELIPE MOURA BEZERRA MELO -
UFPB
Examinador(a) Externo(a)

GUSTAVO LEITE GONÇALVES

**AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE UM SISTEMA BIPV NO
SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em energias renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADO EM 26 / julho /2021.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Victor Felipe Moura Bezerra Melo - Departamento de Engenharia de Energias Renováveis (UFPB) – examinador externo

Prof. Dr. Paulo Rotella Junior - Departamento de Engenharia de Produção (UFPB) – examinador interno

Prof. Dr. Raphael Abrahão - Departamento de Engenharia de Energias Renováveis (UFPB) – orientador

Suplentes

Prof^a. Dr^a. Monica Carvalho - Departamento de Engenharia de Energias Renováveis (UFPB)

Prof. Dr. Lauro César Bezerra Nogueira - Departamento de Ciências Exatas e Naturais (UFERSA) – examinador externo à instituição

Orientador

Dr. Raphael Abrahão

**JOÃO PESSOA - PB
2021**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

G635a Gonçalves, Gustavo Leite.

Avaliação econômica e ambiental de um sistema
fotovoltaico integrado à construção - BIPV / Gustavo
Leite Gonçalves. - João Pessoa, 2021.
144 f. : il.

Orientação: Raphael Abrahão.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Energia fotovoltaica. 2. Energias renováveis. 3.
Construção sustentável. 4. Viabilidade ambiental. 5.
Viabilidade econômica. I. Abrahão, Raphael. II. Título.

UFPB/BC

CDU 621.311.243(043)

DEDICATÓRIA E AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho à todas as pessoas, que assim como eu, acreditam em um planeta onde o respeito pelos seres vivos e o amor pelo meio ambiente superam a ganância de alguns poucos indivíduos.

Aproveito o espaço, ainda, para agradecer todo apoio que me foi dado nessa jornada. Agradeço aos meus pais, que apesar das dificuldades, se esforçaram muito para que eu pudesse cursar o mestrado. Além deles, meu Tio e Padrinho Teotônio Jr, que me acolheu em João Pessoa de portas abertas.

Agradeço à minha namorada, Sarah, que teve muita paciência e a atenção disputada com essa dissertação. Seu apoio e ajuda foram essenciais para execução do trabalho. E também aos meus amigos, os da vida e os que fiz no mestrado, que tornaram a trajetória menos árdua.

Agradeço ao meu Professor e orientador Dr. Raphael Abrahão, pelas ideias, ensinamentos, incentivos e contribuições. Estendo meu carinho a todos do PPGER-UFPB que, apesar do pouco contato presencial por causa da pandemia, se mostraram dispostos e solícitos a me ajudar sempre que recorri a eles, em especial a Professora Dra. Mônica Carvalho e o Professor Dr. Paulo Rotella. Também agradeço às bancas, de qualificação e defesa, por todas as contribuições e pela disponibilidade nesse período tão conturbado.

Por fim, agradeço à CAPES, pelo auxílio financeiro que me foi concedido, e a todos os Brasileiros, que direta e indiretamente, me proporcionaram o acesso à Instituições de Ensino Superior públicas, gratuitas e de qualidade.

RESUMO

O BIPV (*Building Integrated Photovoltaic*), ou Sistema Fotovoltaico Integrado à Construção, consiste na inclusão dos módulos fotovoltaicos à estrutura da edificação, atribuindo-lhes funcionalidade como elemento construtivo, além da geração elétrica. A presente dissertação se concentrou nos impactos ambientais, na viabilidade econômica e nas diretrizes da sustentabilidade na implementação de um sistema solar fotovoltaico integrado. A dissertação foi organizada na forma de artigos científicos. No primeiro artigo foi realizada uma bibliometria e uma revisão sistemática acerca da relação dos pilares da sustentabilidade nos trabalhos referentes aos BIPVs, além de apurar as principais lacunas encontradas na literatura, como forma de constatar as suas contribuições para o modo de desenvolvimento sustentável. No segundo artigo analisou-se e comparou-se a viabilidade econômica entre a implantação de um sistema BIPV e um sistema fotovoltaico convencional no município de Pau dos Ferros-RN, e em localidades que abrangem todos os tipos climáticos predominantes no Brasil. Foram realizadas simulações financeiras e testes estatísticos, considerando as características locais e a probabilidade acumulada de retornos positivos. No terceiro estudo identificou-se e realizou-se a avaliação dos impactos ambientais relacionados a um BIPV, desde a sua fabricação até a operação plena, através da elaboração de uma Matriz de Avaliação Rápida de Impactos (RIAM). Com o resultado da análise, verificou-se a viabilidade ambiental da sua implementação, bem como a dinâmica da ocorrência dos impactos e o seu contraste com o modelo convencional. No quarto trabalho comparou-se a pegada de carbono de um sistema fotovoltaico convencional e um semitransparente, avaliando seus fatores de emissão, por meio da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Os resultados expressaram uma importante contribuição dos BIPVs na disseminação do conceito de edificações sustentáveis, principalmente, quando fazem parte de um ciclo de reciclagem de materiais. Em síntese, o BIPV desenvolve um papel ambiental e socioeconômico promissor, com excelente contribuição para a propagação da teoria e prática das construções sustentáveis, embora ainda necessite de aperfeiçoamento em termos de políticas sociais, pesquisa e desenvolvimento.

Palavras-Chave: Construção sustentável; Viabilidade ambiental; Viabilidade econômica; Energia fotovoltaica.

ABSTRACT

Building Integrated Photovoltaic - BIPV consists in the inclusion of photovoltaic modules in the building structure, giving them functionality as a constructive element, in addition to electrical generation. This dissertation focused on environmental impacts, economic feasibility and sustainability guidelines in the implementation of an integrated solar photovoltaic system. The dissertation was organized in the form of scientific articles. In the first article, bibliometrics and a systematic review were carried out on the relationship of the pillars of sustainability in the works related to BIPVs, in addition to investigating the main gaps found in the literature, as a way of verifying their contributions to the sustainable development mode. The second article analyzed and compared the economic feasibility between the implementation of a BIPV system and a conventional photovoltaic system in the city of Pau dos Ferros-RN, and in locations that cover all the predominant climatic types in Brazil. Financial simulations and statistical tests were carried out, considering local characteristics and the accumulated probability of positive returns. In the third study, an assessment of the environmental impacts related to a BIPV was identified and carried out, from its manufacture to full operation, through the preparation of a Rapid Impact Assessment Matrix (RIAM). With the result of the analysis, the environmental feasibility of its implementation was verified, as well as the dynamics of the occurrence of impacts and its contrast with the conventional model. In the fourth work, the carbon footprint of a conventional and a semi-transparent photovoltaic system was compared, evaluating their emission factors through the Life Cycle Assessment (LCA). The results expressed an important contribution of BIPVs in disseminating the concept of sustainable buildings, especially when they are part of a material recycling cycle. In summary, the BIPV plays a promising environmental and socioeconomic role, with an excellent contribution to the propagation of the theory and practice of sustainable constructions, although it still needs improvement in terms of social policies, research and development.

Keywords: Sustainable buildings; Environmental feasibility; Economic viability; Social policies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Resumo descritivo do procedimento metodológico.	24
Figura 2.2: Descrição e refino da busca das referências bibliográficas utilizadas no estudo e classificação em eixos temáticos.	26
Figura 2.3: Quantitativo de artigos publicados e publicações acumuladas ao longo dos anos relacionados à sustentabilidade na aplicação de BIPVs.	28
Figura 2.4: Quantitativo de citações e citações acumuladas ao longo dos anos relacionados a sustentabilidade na aplicação de BIPVs.	29
Figura 2.5: Categorização amostral dos artigos relacionados a sustentabilidade na aplicação de BIPVs por áreas pesquisadas.	31
Figura 2.6: Países de desenvolvimento dos estudos acerca da sustentabilidade dos BIPVs e seus quantitativos.	32
Figura 2.7: Países objeto de estudo dos trabalhos analisados e seus quantitativos	32
Figura 2.8: Análise de agrupamento das palavras-chave.	33
Figura 2.9: Diagrama de Venn dos artigos sobre BIPV associados aos pilares da sustentabilidade.	34
Figura 3.1: Mapa de localização de Pau dos Ferros-RN e do Complexo Turístico Serrote do Jatobá (CTSJ).	71
Figura 3.3: Representação dos resultados das simulações determinísticas para as localidades estudadas.	80
Figura 3.4: Histogramas e Funções de Distribuição Cumulativa das simulações estocásticas.	82
Figura 3.5: Representação dos resultados das simulações estocásticas.	83
Figura 4.1: Mapa de localização de Pau dos Ferros-RN.	92
Figura 4.2: Localização do Complexo Turístico Serrote do Jatobá.	92
Figura 4.3: Exemplo de aplicação de BIPV em estacionamento.	93
Figura 4.4: Fluxograma ilustrativo e simplificado dos procedimentos metodológicos empregados na pesquisa.	97
Figura 4.5: Quantitativo dos impactos ambientais por faixa de alcance.	100
Figura 4.6: Quantitativo dos impactos ambientais durante as fases de implantação, operação e desativação do BIPV, de acordo com suas categorias e Faixas de Alcance.	101
Figura 4.7: Gráfico <i>box plot</i> da distribuição dos ES obtidos.	106
Figura 4.8: Representação dos valores obtidos pelos critérios utilizados na avaliação dos impactos ambientais.	107
Figura 5.1: Representação do modelo convencional com sistema de fixação e composição.	118
Figura 5.2: Representação do modelo semitransparente com sistema de fixação e composição.	118
Figura 5.3: Pegada de carbono individual GWP 100a - Painel convencional.	121

Figura 5.4: Pegada de carbono individual GWP 100a - Painel semitransparente.
..... 121

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Trabalhos mais citados da amostra.	29
Tabela 2.2: Quantidade de artigos relacionados a sustentabilidade na aplicação de BIPVs publicados por periódico.....	30
Tabela 2.3: Descrição dos artigos enquadrados na categoria Ambiental.....	37
Tabela 2.4: Descrição dos artigos enquadrados na categoria Econômico.....	40
Tabela 2.5: Descrição dos artigos enquadrados nas categorias Ambiental e Econômico.	45
Tabela 2.6: Descrição dos artigos enquadrados na categoria Social.	47
Tabela 2.7: Descrição dos artigos enquadrados nas categorias Ambiental e Social.	48
Tabela 2.8: Descrição dos artigos enquadrados nas categorias Ambiental, Econômico e Social.	49
Tabela 3.1: Classificação das cidades analisadas de acordo com os tipos climáticos de Köppen-Geiger.....	72
Tabela 3.2: Valores de irradiância (kWh/m ² .dia) nas cidades analisadas.....	72
Tabela 3.3: Horas de insolação mensal média nas cidades analisadas.	72
Tabela 3.4: Valores das tarifas e potência mínima dos sistemas para as cidades analisadas.	77
Tabela 3.5: Dados utilizados nas simulações determinísticas dos valores presentes líquidos (VPLs).	77
Tabela 3.6: Dados utilizados nas simulações estocásticas dos VPLs (Apenas Pau dos Ferros – RN).....	78
Tabela 3.7: Resultados das simulações determinísticas de VPL para as cidades definidas.....	80
Tabela 3.8: Resultados das simulações estocásticas de VPL para o município de Pau dos Ferros-RN.	82
Tabela 4.1: Critérios de avaliação do método RIAM.....	95
Tabela 4.2: Conversões das pontuações ambientais em faixas de alcance pelo método RIAM.	96
Tabela 4.3: Matriz de Avaliação Rápida de Impactos decorrentes das fases de implantação, operação e desativação do BIPV.	99
Tabela 5.1: Composição material do sistema fotovoltaico convencional.....	119
Tabela 5.2: Composição material do sistema fotovoltaico semitransparente.	119
Tabela 5.3: Pegada de carbono: sistema fotovoltaico convencional vs. BIPV.....	120

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A - Clima Tropical

A - Área do Módulo

+A - Mudança / Impactos Ligeiramente Positivos

-A - Mudança / Impactos Ligeiramente Negativos

ABINEE - Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica

ACCV - Avaliação do Custo de Ciclo de Vida

ACV - Avaliação do Ciclo de Vida

Af - Clima Equatorial

AIA - Avaliação de Impactos Ambientais

AICV - Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

Am - Clima de Monção

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

As - Clima Tropical com Estação Seca

B - Clima Seco

+B - Mudança / Impactos Positivos

-B - Mudança / Impactos Negativos

BE - Biológico/Ecológico

BIPV - *Building Integrated Photovoltaic* - Sistema Fotovoltaico Incorporado à Construção

BP - *British Petroleum*

BSh - Clima Semiárido

C - Clima Temperado

C - Cumulatividade

+C - Mudança / Impactos Moderadamente Positivos

-C - Mudança / Impactos Moderadamente Negativos

Cfa - Clima Subtropical Úmido

Cfb - Clima Oceânico Variante Temperada

CO₂-eq - Dióxido de Carbono Equivalente

Cofins - Contribuição Para Financiamento da Seguridade Social.

CTSJ - Complexo Turístico Serrote do Jatobá

Cwa - Clima Subtropical Úmido com Invernos Secos

Cwb - Clima Oceânico Variante Subtropical de Altitude

+D - Mudança / Impactos Positivos Significativos
-D - Mudança / Impactos Negativos Significativos
E - Quantidade de Eletricidade Produzida
+E - Mudanças / Impactos Positivos Importantes
-E - Principais Mudanças / Impactos Negativos
EO - Econômico/Operacional
EPE - Empresa de Pesquisa Energética
ES - Pontuação de Avaliação Final
FDP - Funções de Densidade Probabilística
FE - Fator de Emissão
FQ - Físico/Químico
GEE - Gases do Efeito Estufa
HSP - Horas De Sol Pleno
I - Importância da Condição
 I_m - Irradiância Horizontal Local Diária Média
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS - Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
ICV - Inventário do Ciclo de Vida
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*
IPI - Imposto Sobre Produtos Industrializados
ISO - *International Organization for Standardization*
LCOE - *Levelized cost of energy* - Custo Nivelado de Energia
M - Magnitude de Mudança / Efeito
Mtep - Milhões de Toneladas Equivalentes de Petróleo
N - Sem Mudança / *Status Quo* / Não Aplicável
n - Vida Útil do Equipamento
O&M - Operação e Manutenção
P - Capacidade de geração
P - Permanência
 $P_{VPL>0}$ - Probabilidade Acumulada de VPLs Positivos
PIS - Programa de Integração Social
PRE - Período de Retorno da Energia
PRGEE - Período de Retorno das Emissões de Efeito Estufa

Qtde. - Quantidade

r - Taxa de Desconto

R - Reversibilidade

RIAM - *Rapid Impact Assessment Matrix* - Matriz de Avaliação Rápida de Impacto

SC - Social/Cultural

t - Tempo

UCF - *Unit Capacity Factor* - Fator de Capacidade Unitária

VF - Fluxo de Caixa Líquido em um Tempo Futuro

VPL - Valor Presente Líquido

WACC - *Weighted Average Cost of Capital* - Custo Médio Ponderado de Capital

WOS - *Web of Science*

η - Eficiência do Módulo

ρ - Taxa de Desempenho

φ - Taxa de Degradação

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	17
INTRODUÇÃO GERAL	17
1.1 INTRODUÇÃO	18
1.2 OBJETIVOS	20
CAPÍTULO 2: AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE NA APLICAÇÃO DE BIPVS: REVISÃO SISTEMÁTICA	21
2.1 INTRODUÇÃO	22
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	24
2.3 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	27
2.4 ESTADO DA ARTE	33
2.5 CONCLUSÕES	52
ANEXO 01 - REFERÊNCIAS DA REVISÃO SISTEMÁTICA	54
REFERÊNCIAS	60
CAPÍTULO 3: VIABILIDADE ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO FOTOVOLTAICA CONVENCIONAL E BIPV NO BRASIL	67
3.1 INTRODUÇÃO	68
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	70
3.2.1 Localidades e objeto de estudo	70
3.2.2 Projeto de sistema PV	73
3.2.3 Análise econômica	74
3.2.4 Procedimentos aplicados	76
3.2.5 Teste de hipótese estatística	78
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
3.4 CONCLUSÕES	83
REFERÊNCIAS	84
CAPÍTULO 4: AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DE UM SISTEMA BIPV PELO MÉTODO RIAM	89
4.1 INTRODUÇÃO	90
4.2 MATERIAL E MÉTODOS	91
4.2.1 Área de estudo	91
4.2.2 Informações técnicas do sistema BIPV	93
4.2.3 Procedimentos metodológicos	93
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	97

4.4 CONCLUSÃO.....	108
REFERÊNCIAS	109
CAPÍTULO 5: COMPARAÇÃO AMBIENTAL ENTRE SISTEMA FOTOVOLTAICO CONVENCIONAL E SEMITRASPARENTE	114
5.1 INTRODUÇÃO	115
5.2 MATERIAL E MÉTODOS	116
5.2.1 Avaliação de Ciclo de Vida	116
5.2.2 Descrição dos sistemas	118
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	120
5.4 CONCLUSÕES.....	123
REFERÊNCIAS	124
CAPÍTULO 6: CONSIDERAÇÕES FINAIS	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE TODA A DISSERTAÇÃO	130

CAPÍTULO 1
INTRODUÇÃO GERAL

1.1 INTRODUÇÃO

Os processos de construção e operação dos edifícios são responsáveis pela ocorrência de inúmeros impactos urbanos significativos. Esses podem ser minimizados pelo desenvolvimento de artifícios por parte dos projetistas, com as ditas construções sustentáveis. Um desses artifícios consiste nas construções alternativas, como são os casos das coberturas, fachadas e tetos solares (KELLY; SEN; TATARI, 2019). As edificações sustentáveis devem atender aos critérios amparados pelos três pilares da sustentabilidade, ou seja, prover condições favoráveis aos meios ambiente, social e econômico (LI; ROSKILLY; WANG, 2018).

O desempenho energético do edifício geralmente é considerado o principal critério para certificação de uma construção como sustentável. A integração de elementos fotovoltaicos com a estrutura do edifício é chamada de Sistema Fotovoltaico Integrado à Construção - BIPV (*Buildind Integrated Photovoltaic*). Quando comparado com o método tradicional de instalação dos sistemas fotovoltaicos, o BIPV apresenta algumas vantagens, pois além de geradores renováveis de eletricidade, seus componentes atuam como parte integrante da construção, além de descentralizar o próprio consumo elétrico e contribuir com o aumento da eficiência dos módulos (SCHUETZE; WILLKOMM; ROOS, 2015).

Com base no estudo de Jahanfar, Sleep e Drake (2018), os efeitos do BIPV atuam diretamente na redução de gastos com o imóvel, tanto em materiais construtivos, como em cargas de energia pela redução da temperatura interna em dias quentes e aproveitamento da iluminação externa diária, de acordo com a disposição dos painéis. Esse é um fato importante, uma vez que o custo do investimento é a principal barreira a ser superada (CALISE *et al.*, 2020). A área, a eficiência total do sistema BIPV e o rendimento solar são os fatores que influenciam no melhor aproveitamento dos sistemas (SCHUETZE; WILLKOMM; ROOS, 2015).

No Brasil, alguns trabalhos relatam a ocorrência e fazem análises de naturezas diversas de instalações BIPVs no País. Dentre os exemplos, Urbanetz, Zomer e Rüter (2011) e Santos e Rüter (2012) realizaram uma comparação entre o desempenho entre sistemas convencionais e BIPVs, para uma cobertura de estacionamento e para uma residência unifamiliar, respectivamente. Já Santos e Rüter (2014) estudaram as limitações referentes à latitude do local e o ângulo de implementação do sistema.

A aplicação dessa tecnologia ainda é pouco difundida entre as diferentes classes sociais, onde em geral, os bairros considerados ricos são mais propensos à sua

implementação (RAMSHANI *et al.*, 2019). Shukla, Sudhakar e Baredar (2017) afirmam que ainda não há informações suficientes sobre os BIPVs para elaboração de muitas políticas de mobilização e incentivo de sua adoção pela sociedade civil. Além da carência no âmbito social, o acervo teórico desse tema é desprovido de estudos específicos em diversas outras áreas, como múltiplos métodos de Avaliações de Ciclo de Vida - ACV (LAMNATOU; CHEMISANA, 2017), soluções de armazenamento (LAMNATOU *et al.*, 2019) e sua entrada no campo da construção civil (ARISTIZÁBAL; PÁEZ, 2018), por exemplo.

O déficit de avaliações de desempenho geral de painéis fotovoltaicos, com ênfase na irradiância e temperatura ambiente em regiões semiáridas (MIRZAEI; MOHIABADI, 2017), bem como o estímulo à adoção desse modelo de geração elétrica no local como forma de alcance do desenvolvimento regional influente na economia, meio social e ecologia (SOTARAUTA; BEER; GIBNEY, 2017) levaram a escolha da região semiárida brasileira para aplicação desse estudo de caso.

As regiões semiáridas são caracterizadas pela baixa pluviosidade, altas temperaturas (AHMAD *et al.*, 2020) e baixa umidade relativa do ar (WENG *et al.*, 2019), normalmente apresentando baixa nebulosidade. A região Nordeste do Brasil, majoritariamente de clima semiárido, apresenta os valores de menor variabilidade interanual de irradiância solar, dentre todas as regiões brasileiras, com extremos entre 5,39 e 5,59 kWh/m², de acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA *et al.*, 2017). O estado do Rio Grande do Norte apresenta um dos maiores índices de irradiância solar do território brasileiro, onde o município de Pau dos Ferros, especificamente, apresenta uma média de 5,92 kWh/m².dia (PEREIRA *et al.*, 2017).

Situado nas coordenadas 6°6'9" S e 38°12'33" O, Pau dos Ferros apresenta aproximadamente 260 km² de área territorial e cerca de 30.400 habitantes (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2019). Além disso, possui 8,7 horas de insolação diária média ao longo do ano, de acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2021). Esses bons índices de radiação solar, horas de luz solar consistentes e demais condições climáticas tornam o local favorável para a instalação de sistemas fotovoltaicos (JHA; TRIPATHY, 2019). Na zona rural desse município será instalado um complexo turístico, denominado Complexo Turístico Serrote do Jatobá, que se encontra em fase de instalação e desenvolverá suas atividades em uma área total de aproximadamente 248.000 m², tornando-se um ótimo candidato de adaptação do projeto inicial para incorporação de um sistema BIPV como forma de atender a demanda de 386

kWh/dia, referentes ao consumo da área externa.

Desse modo, as informações concentradas nessa pesquisa servem de embasamento para expor o panorama da sustentabilidade na aplicação das tecnologias BIPV. A presente dissertação do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis (PPGER), da Universidade Federal da Paraíba, está organizada em forma de "artigos científicos", conforme as normas para elaboração de dissertações do PPGER. Dessa forma, inicialmente está sendo apresentada uma introdução geral da dissertação, seguida dos objetivos. Os capítulos seguintes são artigos científicos. Esses artigos são independentes, porém estritamente relacionados ao tema geral da dissertação.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é estudar o âmbito dos impactos ambientais, viabilidade econômica e as diretrizes da sustentabilidade na implementação de um sistema solar fotovoltaico integrado (BIPV). Os objetivos específicos foram os seguintes:

- Realizar a bibliometria, revisão sistemática e análise dos pilares da sustentabilidade em trabalhos referentes aos Sistemas Fotovoltaicos Integrados. Além disso, apurar as principais lacunas encontradas na literatura, como forma de verificar se os BIPVs podem contribuir para o desenvolvimento sustentável.
- Analisar e comparar a viabilidade econômica da implementação entre dois modelos de sistemas fotovoltaicos, um BIPV e um convencional, ambos fixados na cobertura do estacionamento do Complexo Turístico Serrote do Jatobá (Pau dos Ferros, Rio Grande do Norte, Brasil). Além disso, efetuar simulações da alocação destes mesmos modelos em diferentes localidades brasileiras, previamente selecionadas para abranger os principais tipos climáticos do País.
- Identificar os impactos ambientais relacionados às fases de implantação, operação plena e desativação de um sistema fotovoltaico integrado (BIPV) dimensionado para atender o consumo elétrico de um complexo turístico situado no semiárido do Nordeste do Brasil, e realizar suas respectivas avaliações pela metodologia da Matriz de Avaliação Rápida de Impacto (RIAM).
- Comparar a pegada de carbono, calculada por meio da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), de um sistema fotovoltaico convencional e um semitransparente.

CAPÍTULO 2

ARTIGO: AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE NA APLICAÇÃO DE BIPVS: REVISÃO SISTEMÁTICA

2.1 INTRODUÇÃO

O conceito de sustentabilidade tem amparo em três pilares, que são princípios fundamentais do desenvolvimento sustentável: meio ambiente, econômico e social (LI; ROSKILLY; WANG, 2018). A indústria da construção civil, em geral, desempenha um papel primordial na sustentabilidade urbana, através de métodos construtivos sustentáveis, que possibilitam a redução dos impactos comumente apresentados. As coberturas alternativas apresentam-se como oportunidade de melhoria do modelo urbano de desenvolvimento, principalmente, quando agem como fonte de energia renovável para compensar suas demandas energéticas, atentando-se sempre ao papel significativo da escolha dos materiais (KELLY; SEN; TATARI, 2020).

As tecnologias fotovoltaicas, entre as mais promissoras para o desenvolvimento sustentável, são montadas geralmente nos telhados de residências e edifícios não residenciais. Como forma de maximizar os números de módulos fotovoltaicos instalados e, conseqüentemente, a geração elétrica, às vezes realiza-se a integração dos módulos solares na arquitetura dos edifícios. Esse tipo de sistema integrado é intitulado BIPV (*Building Integrated Photovoltaic*) ou Sistemas Fotovoltaicos Integrados à Construção (LI; YANG; LAM, 2013).

Dessemelhante aos sistemas convencionais, que são acoplados ao invólucro do edifício, em geral, nos telhados, os BIPVs são instalados diretamente na construção (RITZEN *et al.*, 2017). Os módulos fotovoltaicos tornam-se elemento construtivo no exterior da edificação, como telhado, fachada ou claraboia e, quando semitransparentes, permitem a penetração da luz durante o dia e favorecem a iluminação e visualização interna. Além disso, servem como proteção contra intempéries, proporcionam isolamento térmico, proteção contra ruídos, etc. (TRIPATHY; SADHU; PANDA, 2016). Esses sistemas representam um amplo mercado e estão relacionados à economia de energia no setor da construção civil, em especial aos edifícios “zero energia” e reduzem os custos totais com material de construção e montagem, pois não exigem suportes e trilhos (LAMNATOU *et al.*, 2019; TRIPATHY; SADHU; PANDA, 2016).

A avaliação holística de sistemas BIPVs funciona como ferramenta de planejamento e otimização, além de ter a possibilidade de, posteriormente, servir para classificação e certificação de edifícios. Essa análise pode ser realizada de forma independente, unidimensional, ou através do arranjo entre duas ou mais metodologias. A avaliação da demanda acumulada de energia, avaliação do ciclo de vida, viabilidade econômica e a avaliação da qualidade total são exemplos dessa sistemática (SCHUETZE;

WILLKOMM; ROOS, 2015).

O resultado da avaliação ambiental final está diretamente relacionado à energia incorporada ao ciclo de vida desses produtos, tanto pelo consumo energético quanto pelos danos ambientais equivalentes geradas (LI; YANG; LAM, 2013). As fontes de energia renovável são reconhecidas como um método de melhoria das condições ambientais e redução de emissões de gases de efeito estufa, responsáveis pelas mudanças climáticas (YOO, 2019). Outro ponto importante é a diferença entre os materiais componentes do BIPV, que influenciam notavelmente no perfil ambiental do sistema, principalmente quando inclusas baterias para armazenamento de eletricidade, devido aos componentes químicos presentes (LAMNATOU; SMYTH; CHEMISANA, 2019).

A análise da viabilidade econômica é fundamental antes do acoplamento do BIPV (CALISE *et al.*, 2020). O alto custo de capital para o investimento é a barreira mais significativa para a implementação dessa tecnologia na construção setorial, porém, após a lida com esse impasse, as questões com aceitação pública são facilmente resolvidas. É essencial o conhecimento dos custos de todo o ciclo de vida relacionados para possibilitar a tomada de decisões por parte dos clientes e usuários finais (GHOLAMI; RØSTVIK; MÜLLER-EIE, 2019).

O impacto social dessa tecnologia energética pode ser medido pela capacidade de aliviar a escassez de combustível, provisão de emprego, cultura política, valores sociais, paradigmas, demografia, ambiente natural e outros aspectos cujos processos de transição ocorrem de forma lenta e autônoma (LI; ROSKILLY; WANG, 2018; CARSTENS; CUNHA, 2019). Além das políticas de incentivo concentradas na viabilidade financeira, análises de sensibilidade apontam a importância do estímulo ao aumento e efeito das taxas de adoção de tecnologias verdes perante a estrutura social (RAMSHANI *et al.*, 2020). O BIPV, entretanto, necessita de políticas modificadoras e um amplo suporte para o incentivo ao desenvolvimento dos projetos (SHUKLA *et al.*, 2018).

A elaboração da revisão sistemática permite ao pesquisador explorar o tamanho e escopo da literatura disponível sobre o tema estudado, na literatura acadêmica. Através dela é possível extrair a síntese de informações acionáveis e aplicáveis, enquanto resume a literatura disponível (NG; MITHRARATNE, 2014). Em termos de estudos de revisão sobre sistemas fotovoltaicos, observa-se, de forma representativa, a concentração da ênfase das investigações, tais como os desenvolvimentos recentes, diferenças entre tipos de sistemas, pontos de vista sobre metodologias e principais lacunas identificadas (LAMNATOU; CHEMISANA, 2017).

Este estudo teve como objetivo apresentar a análise do enquadro dos pilares da sustentabilidade em trabalhos referentes aos BIPVs, como forma de aferir as informações relevantes e as tendências de desenvolvimento das obras, bem como o conteúdo por elas abordados, incluindo as principais lacunas.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

A técnica metodológica empregada neste trabalho consiste na elaboração de uma revisão sistemática, como método de aferimento do desenvolvimento da linha de pesquisa, as colaborações dos autores dos trabalhos publicados, bem como seu espaço-temporal (MONTROYA *et al.*, 2016). Na sequência foram empregadas análises de redes e de conteúdo, que descrevem e interpretam o conteúdo de classes de documentos e textos, e revisam o conteúdo das pesquisas selecionadas, atendendo a critérios específicos de confiabilidade e validação (HAM-BALOYI; JORDAN, 2016). As etapas de desenvolvimento metodológico foram adaptadas de Levy e Ellis (2006) e estão descritas na Figura 2.1.

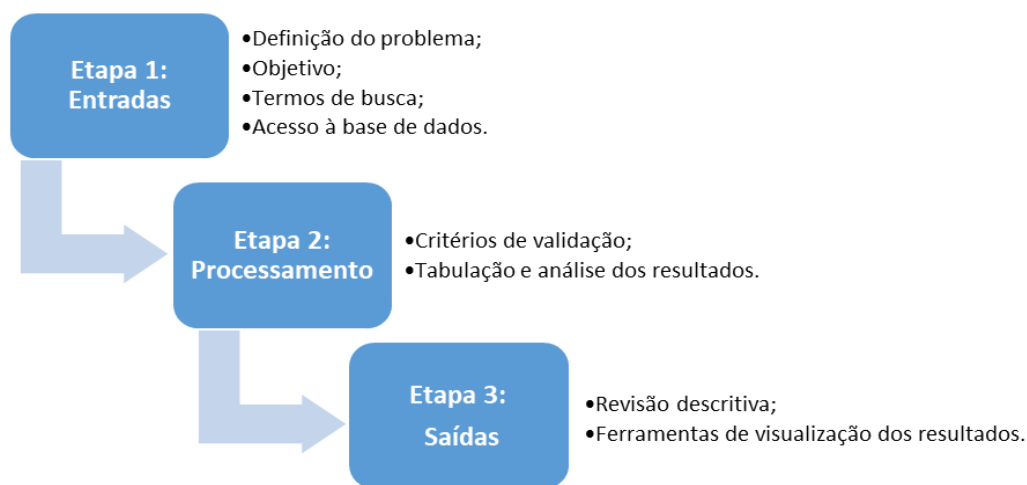


Figura 2.1: Resumo descritivo do procedimento metodológico.

Fonte: Adaptado de Levy e Ellis (2006)

Etapa 1 – Entradas: buscou-se estimar a relevância do problema a ser analisado, além de realizar a definição do objeto de estudo. Posteriormente, foi analisada, de forma exploratória, como os tópicos de sustentabilidade na aplicação de dispositivos BIPV são abordados na literatura. Também foram identificados os principais vocábulos adotados nos artigos para definição dos termos de busca (BEZERRA, GOHR E MORIOKA, 2020). Desse modo, definiu-se os termos de busca em: *Environment**, *Green**, *Building*

Integrated Photovoltaic, BIPV, Viabilit, Feasibilit*, Availabilit*, Evalua*, Assessment**. Os termos “incompletos” utilizados, tal como “Sustainab”, acrescidos do “*”, representam uma forma de busca, onde a base retorna os resultados de todas as suas variações, como “Sustainable”, “Sustainability” e “Sustainably”.

Etapa 2 – Processamento: Esse estágio do estudo refere-se à obtenção do material a ser analisado. Sua elaboração fundamentou-se na preparação de redes de busca delimitadas pelo tema do estudo. A coleta das informações na plataforma da *Web of Science* (WOS) foi em maio de 2020, conforme a Figura 2.2. A escolha de uma única base de dados se deu pelo grande prestígio e acervo da WOS, que assegura uma vasta cobertura de dados de citações e dados bibliográficos, com a maior profundidade e qualidade (AZEVEDO *et al.*, 2020).

A primeira fase da pesquisa descreve o processo de investigação de periódicos relacionados para dois grupos de palavras-chave. A Busca 1 decorreu dos termos *Environment* or Green**, realizada por “títulos” e *Building Integrated Pholtovoltaic or BIPV* em “tópicos”. A Busca 2 visou complementar a primeira, agregando novos termos à pesquisa, onde *Building Integrated Pholtovoltaic or BIPV* foi configurada como “título” e *Viabilit*or Feasibilit*or Availabilit*or Evalua* or Assessment**, foram consideradas em “tópicos”. A estrutura escolhida trouxe aos “títulos” o protagonismo das buscas, correlacionando-os aos “tópicos”.

A segunda fase compreende os critérios de inclusão e exclusão operados para seleção dos estudos distribuído em 3 etapas. Na primeira, na base da WOS, foram escolhidos apenas artigos científicos e de revisão. A segunda exclui os trabalhos duplicados. E na terceira, foram lidos atentamente todos os títulos, resumos e partes principais dos artigos, separando exclusivamente aqueles que possuíam alinhamento completo com a sustentabilidade na aplicação de BIPVs.

Excluiu-se, para tanto, os trabalhos que fugiam do foco, principalmente pela divergência entre o significado de termos pretendidos e apresentados, onde “sustentável” e “sustentabilidade” remetiam à longevidade de um processo a longo prazo, “ambiente” fazia referência unicamente ao ambiente construído, “viabilidade” não se referia a questões de análises ambientais econômicos e/ou sociais e, “desempenho” tratava do potencial de geração elétrica, que não foi alvo dessa pesquisa.

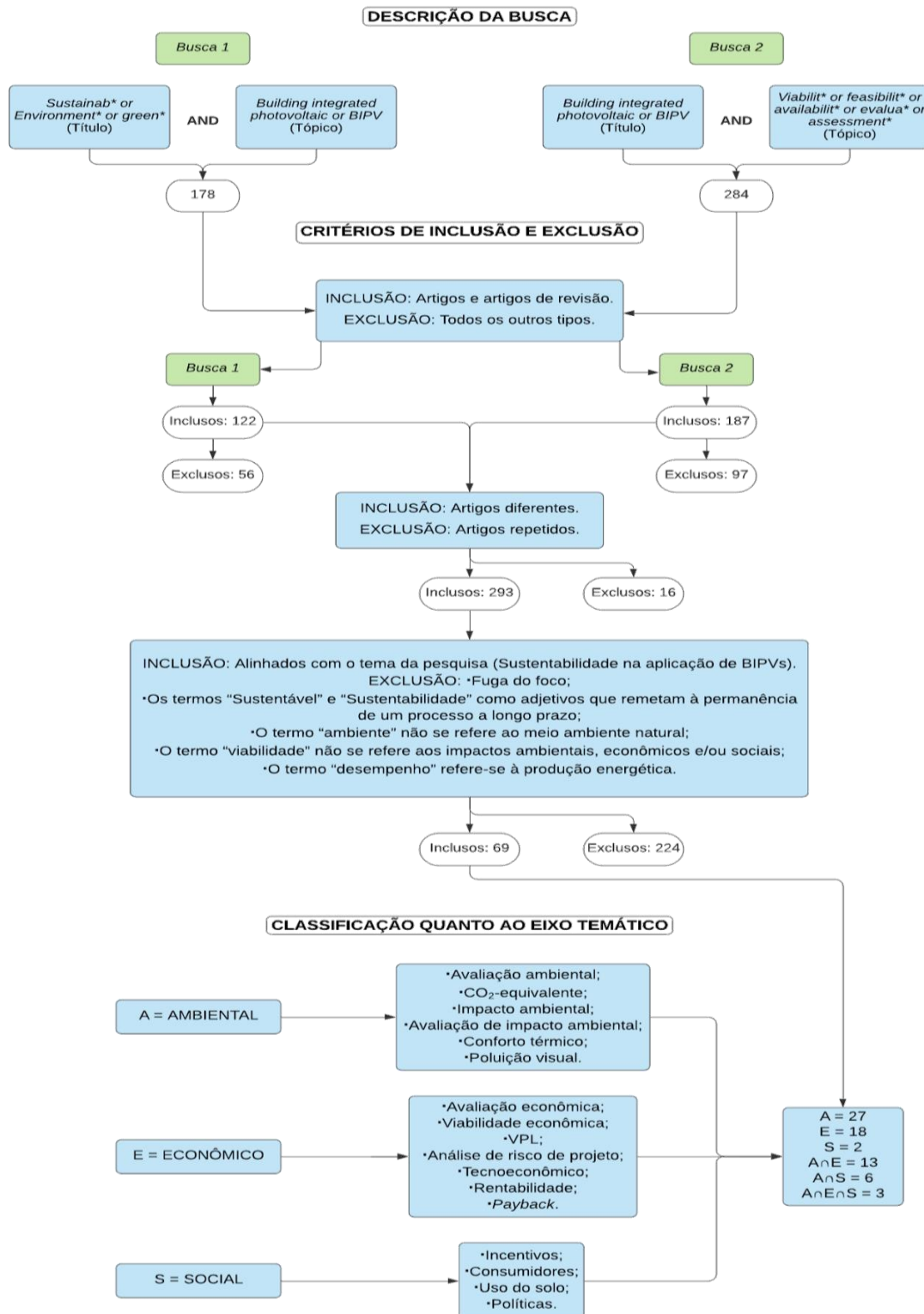


Figura 2.2: Descrição e refino da busca das referências bibliográficas utilizadas no estudo e classificação em eixos temáticos.

Fonte: Autores (2020)

A terceira fase classifica os artigos de acordo com o eixo temático, por análise de conteúdo, referente ao(s) pilar(es) da sustentabilidade analisado(s) (Ambiental, Econômico e Social). Foram utilizados termos relacionados para auxiliar na afinidade de inclusão em cada categoria (BEZERRA; GOHR; MORIOKA, 2020). Apenas os artigos enquadrados em todos os parâmetros de seleção fizeram parte da amostra da bibliometria, entretanto, quantificou-se todos os itens dispensados em cada etapa. Por fim, restaram 69 artigos, relatados e descritos em tabelas na seção seguinte e no Anexo 01.

Etapa 3 – Saídas: Os balanços quantitativos e qualitativos embasaram a melhor compreensão dos trabalhos analisados. Para tanto, no *Excel*, foi analisada a linha cronológica do número de publicações, para ilustração do quantitativo de obras publicadas por ano, desde a primeira publicação, bem como o total acumulado. Elencou-se os 5 principais autores como forma de observar suas reincidências, redes de colaboração, bem como os pontos de vista utilizados sobre o assunto, além da quantificação de trabalhos e as vezes em que foram citados.

Foram analisados, também, os periódicos nos quais os trabalhos foram publicados e as áreas de pesquisa em que estes são classificados, como forma de qualificar os fatores de impacto dos meios de publicação e a interdisciplinaridade do tema.

Após a leitura meticulosa do material, realizou-se a identificação das metodologias empregadas e elaborou-se um diagrama de Venn para estampar o enquadramento dos trabalhos nos pilares da sustentabilidade.

A análise de agrupamento das palavras-chave foi desenvolvida com auxílio do *software* VOSviewer versão 1.6.15 (VAN ECK; WALTMAN, 2020), que identificou e totalizou 23 palavras com ocorrência mínima de 5 vezes.

2.3 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A Figura 2.3 representa a cronologia das quantidades de artigos publicados anualmente e das publicações acumuladas ao longo dos anos. O primeiro artigo da amostra é datado do ano 2000 e tratou de uma combinação de inventário de ciclo de vida simplificado e fluxo de caixa descontado, como forma de demonstrar o equilíbrio entre fatores econômicos e ambientais na tecnologia fotovoltaica integrada (OLIVER; JACKSON, 2000). Essa visão foi a abertura da linha de raciocínio dos trabalhos posteriores, o que indicou que o mesmo serviu de base para a perspectiva dos demais autores. As publicações, entretanto, seguiram escassas nos anos subsequentes, onde em 2013 houve um eventual aumento que se estende até o momento da elaboração dessa

pesquisa (2020) e esse fato demonstrou a relevância do tema no contexto atual.

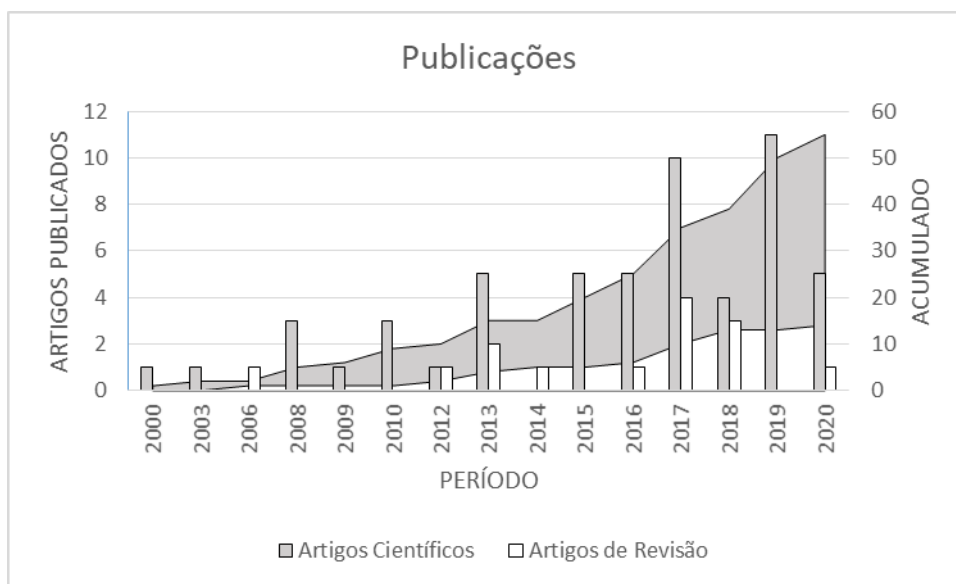


Figura 2.3: Quantitativo de artigos publicados e publicações acumuladas ao longo dos anos relacionados à sustentabilidade na aplicação de BIPVs.

Fonte: Autores (2020)

Na Figura 2.4 é possível observar o comportamento das citações, tanto nas quantidades em que os artigos de cada ano foram citados, quanto no total acumulado. Nota-se que os artigos científicos do ano de 2010 possuem o maior valor de citações, principalmente devido ao trabalho de Lu e Yang (2010), que já foi citado 106 vezes até a presente data. Já o trabalho de Li; Yang e Lam (2013) proporcionou a discrepância presente no ano de 2013 com relação aos artigos de revisão, pois só ele teve 207 citações nos anos seguintes. Os trabalhos mais citados de toda amostra estão descritos na Tabela 2.1.

Esse comportamento é justificado pela inspiração nas metodologias e referencial teórico nesses trabalhos mais citados, por parte dos autores nas obras posteriores. É notório que embora o número de artigos científicos seja superior, os artigos de revisão possuem uma significância na recorrência de citações, principalmente pelo caráter analítico e teórico presentes. Há uma tendência de decaimento nas citações dos artigos mais recentes quando comparados aos do intervalo de 2010 a 2017, pois esses são tomados como norteadores e pontos de comparação das metodologias e resultados dos trabalhos atuais. Além disso, os artigos mais recentes ainda não tiveram tempo suficiente para serem citados por muitos trabalhos.

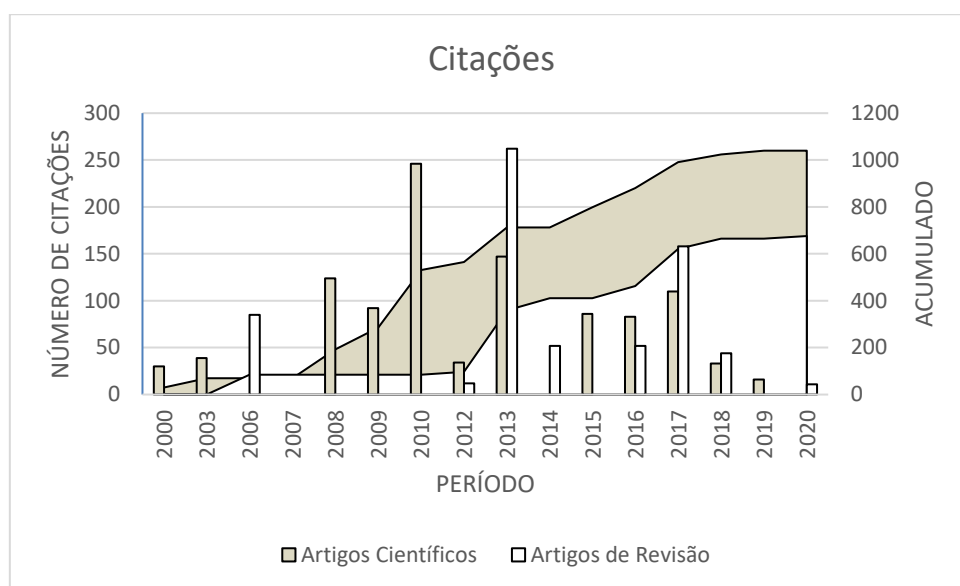


Figura 2.4: Quantitativo de citações e citações acumuladas ao longo dos anos relacionados a sustentabilidade na aplicação de BIPVs.

Fonte: Autores (2020)

Tabela 2.1: Trabalhos mais citados da amostra.

Autores	Ano	Classificação	Citações
Li; Yang; Lam	2013	Revisão	207
Lu; Yang	2017	Artigo	106
Chel; Tiwari; Chandra	2010	Artigo	92
Agrawal; Tiwari	2010	Artigo	91
Crawford; Treloar; Fuller; Bazillan	2009	Revisão	85
Seng; Lalchand; Lin	2006	Artigo	76
Shukla; Sudhakar; Baredar	2016	Revisão	72
Menoufi; Chemisana; Rosell	2017	Artigo	61
Lamnatou; Chemisana	2013	Revisão	57
Peng; Lu	2008	Revisão	55

Fonte: Autores (2020)

Os artigos foram publicados em 25 periódicos, a maioria com foco em energia e/ou meio ambiente, enquanto o restante foi da área de química, infraestrutura, arquitetura, engenharia e economia, conforme a Tabela 2.2. O periódico “Energy and Buildings” foi o de maior representatividade na amostra, com 14 publicações. Todos os periódicos reportados possuem fatores de impacto relevantes, o que constata a importância dos trabalhos perante o tema.

Tabela 2.2: Quantidade de artigos relacionados a sustentabilidade na aplicação de BIPVs publicados por periódico.

Revista	Qtde.
Energy and Buildings	14
Applied Energy	7
Renewable Sustainable Energy Reviews	7
Energies	5
Renewable Energy	5
Solar Energy	5
Energy	4
Energy Policy	2
International Journal of Green Energy	2
Journal of Cleaner Production	2
Science of The Total Environment	2
Advances in Building Energy Research	1
Applied Thermal Engineering	1
Energy for Sustainable Development	1
International Journal of Ambient Energy	1
International Journal of Photoenergy	1
International Journal of Production Economics	1
Journal of Architectural Engineering	1
Journal of Industrial Ecology	1
Journal of Infrastructure Systems	1
Journal of Physical Chemistry C	1
Progress in Photovoltaics	1
Resources Conservation and Recycling	1
Sustainability	1
Sustainable Energy Technologies and Assessments	1

Fonte: Autores (2020)

As múltiplas áreas de pesquisa, descritas pela WOS, nas quais as obras estão inseridas, confirmam a interdisciplinaridade do estudo das tecnologias BIPV, como descrito na Figura 2.5. Embora o foco das publicações tenha sido a adequação para suprimento energético, com 57 trabalhos de “combustíveis energéticos”, outras categorias da WOS também se apresentaram de forma expressiva. Foram denotados tópicos em engenharia, com relação a detalhes técnicos construtivos; ecologia; ciências dos materiais; fundamentos de química e física; mecânica; termodinâmica, dentre outros.

Observa-se no comportamento da Figura 2.5 que tanto o quantitativo dos artigos de revisão quanto dos de pesquisa aplicada seguem o mesmo padrão de crescimento conforme a área de estudo. Essa tendência foi observada na leitura do material, pela reincidência frequente de trabalhos voltados principalmente para a utilização da geração

fotovoltaica para suprimento energético.

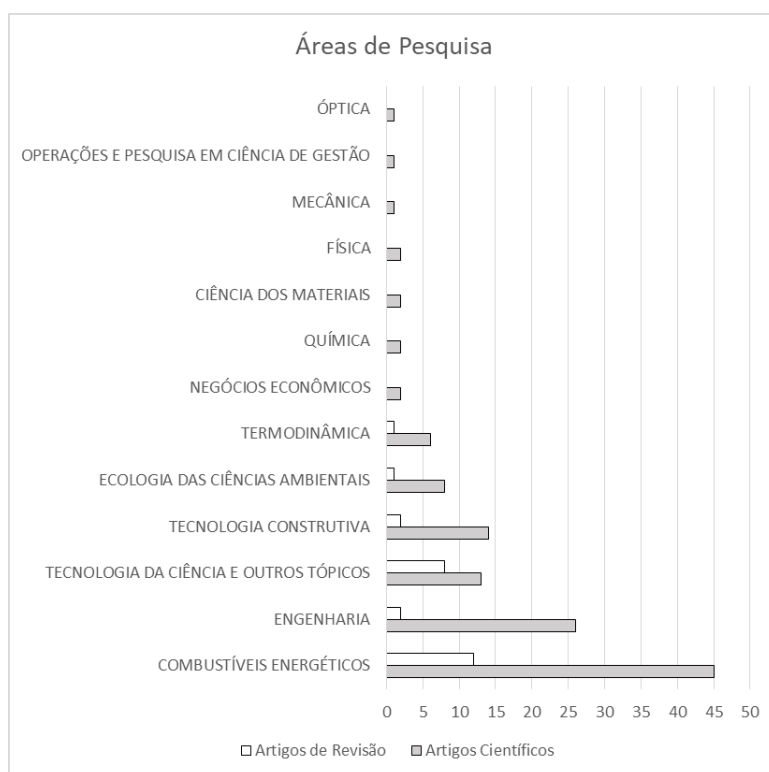


Figura 2.5: Categorização amostral dos artigos relacionados a sustentabilidade na aplicação de BIPVs por áreas pesquisadas.

Fonte: Autores (2020)

A Figura 2.6 explicita o arranjo territorial referente à localização de onde se deu o desenvolvimento das pesquisas e a quantidade de publicações por território. Embora a maioria dos artigos publicados advenha de países desenvolvidos como Reino Unido, Espanha, Itália e EUA, nota-se que alguns países em desenvolvimento apresentaram contribuições significativas para o tema, como a Índia, China e Malásia. O Reino Unido, primeiro lugar no *ranking*, encontrou na tecnologia BIPV uma forma de enfrentar o desafio de reduzir, em pelo menos 80%, as suas emissões de CO₂ até 2050 (HAMMOND *et al.*, 2009).

Já na Figura 2.7 é possível identificar os países que serviram de objeto de estudo para os trabalhos da amostra analisada. Nota-se que não há proporcionalidade direta entre o local de elaboração dos artigos e os locais de aplicação do estudo. O maior quantitativo ocorre na Espanha, com 11 estudos aplicados, seguido da Índia, com 6. Alguns trabalhos não possuem uma área de estudo específica, pois se tratam de revisão de literatura, logo possuem abrangência global. Também houve a ocorrência de estudos aplicados em mais

de um País, comparando o desempenho dos BIPVs em diferentes localidades.



Figura 2.6: Países de desenvolvimento dos estudos acerca da sustentabilidade dos BIPVs e seus quantitativos.

Fonte: Autores (2020)

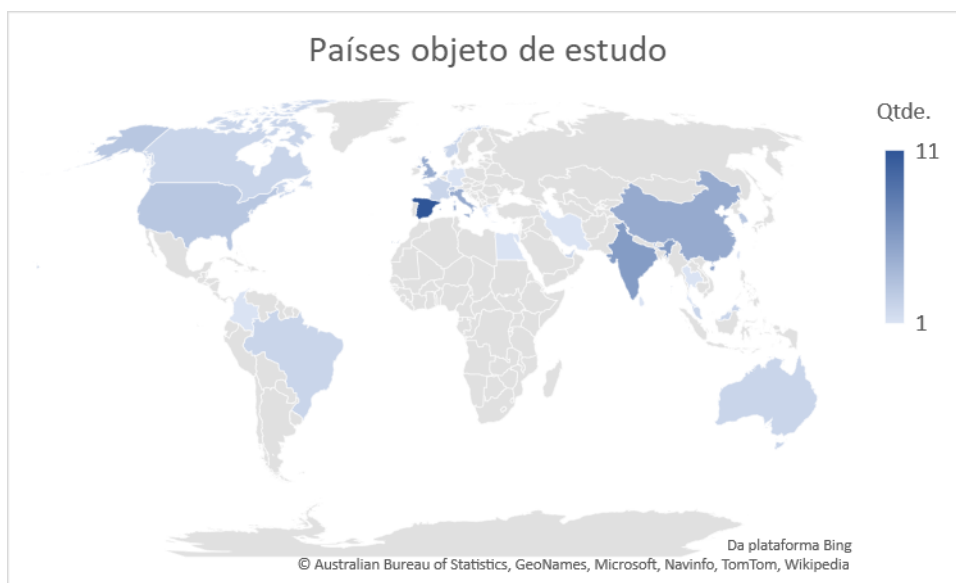


Figura 2.7: Países objeto de estudo dos trabalhos analisados e seus quantitativos

Fonte: Autores (2020)

A co-ocorrência de palavras-chave determina a proximidade das relações entre os artigos e a força da conexão entre elas (LI *et al.*, 2016). A Figura 2.8 sintetiza o resultado da análise amostral, onde observou-se que “*Performance*”, “*Life-cycle assessment*”,

“Design” e “BIPV” se destacaram em incidência, o que confirmou a temática principal dos trabalhos analisados, que buscaram descrever a performance técnica, ambiental, econômica e/ou social pertinentes à aplicação da tecnologia BIPV. No geral, as palavras apresentaram uma rede de interações bastante inter-relacionada, e tornou possível a identificação de abordagens como: impactos ambientais associados ao desempenho energético; análise do custo de ciclo de vida; interferência do *design* na eficiência energética; avaliação do ciclo de vida dos sistemas, dentre outros.

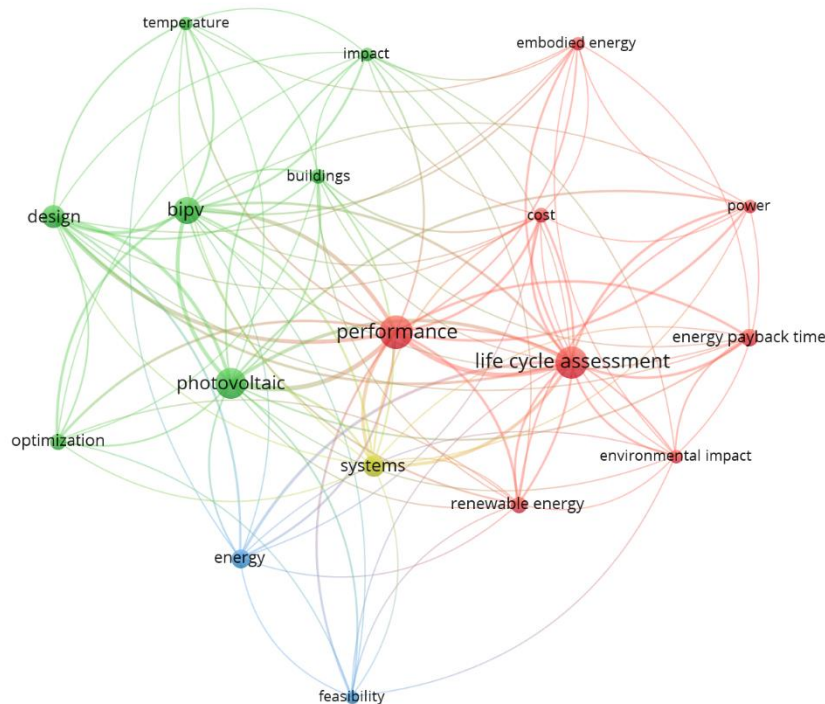


Figura 2.8: Análise de agrupamento das palavras-chave.

Fonte: Autores (2020)

2.4 ESTADO DA ARTE

De acordo com Yoo (2019), existem vários tratamentos e visões sobre projetos de construção sustentável, a variar com a cultura local. Embora o termo “sustentabilidade” seja amparado por três pilares bem definidos (ambiental, social e econômico), muitos autores que usaram essa temática como justificativa da execução de seus trabalhos a trataram de forma parcial. Dos 69 artigos analisados profundamente, 47 explanaram sobre apenas um dos eixos, 19 da junção entre dois e apenas 3 abordaram realmente a inter-relação entre os três pilares.

A Figura 2.9 ilustra a abordagem dos pilares da sustentabilidade na implantação de sistemas BIPV dentre a amostra dos trabalhos analisados. De forma isolada, o pilar

ambiental foi o mais discutido e compreendeu 39,1% do total das pesquisas, seguido do pilar econômico, com 26,1%. O primeiro artigo estritamente na temática ambiental foi de Keoleian e Lewis (2003) e Lu e Yang (2010) foi o mais citado. Ambos trataram da avaliação de desempenho energético de sistemas BIPV instalados em relação aos gases de efeito estufa associados às fases de fabricação, instalação e operação, através da avaliação do ciclo de vida (ACV) dos materiais.

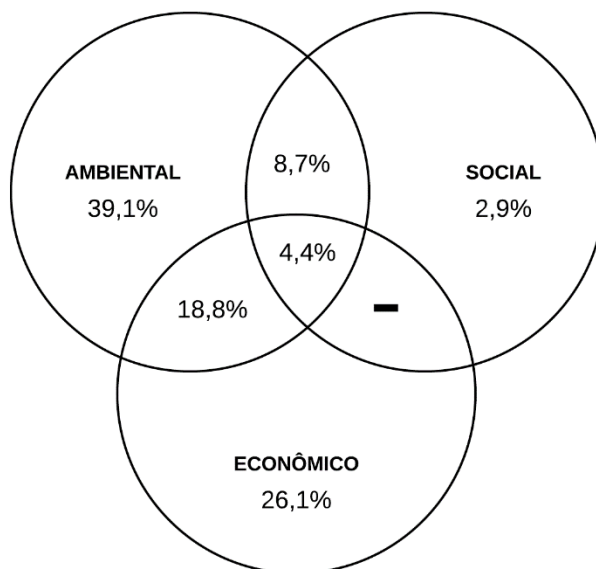


Figura 2.9: Diagrama de Venn dos artigos sobre BIPV associados aos pilares da sustentabilidade.

Fonte: Autores (2020)

A temática econômica esteve intimamente relacionada a questões técnicas da instalação dos sistemas BIPV e correlata a viabilidade do investimento com o retorno da forma energética a ser gerada, seja ela elétrica ou térmica. Agrawal e Tiwari (2010) foram os precursores dessa análise específica, quando avaliaram os valores presentes e futuros relevantes, associados à aquisição, operação, manutenção e descarte, e selecionaram o projeto que atendesse a demanda e garantisse que a instalação fornecesse o menor custo total.

Não foram registrados trabalhos referentes a intersecção entre economia e social. O pilar social foi o menos explorado, com apenas 2,9%, justificado pelo fato deste estar geralmente associado a outra temática (ambiental e/ou social). Foram encontrados apenas os trabalhos de Shukla *et al.* (2018) e Ramshani *et al.* (2020).

Do total de artigos analisados, 4,4% abordaram os três pilares da sustentabilidade

de forma interdependente. Com exceção de Li, Yang e Lam (2013) que realizaram uma revisão das implicações para o desenvolvimento sustentável dos edifícios de energia zero com análises de casos reais. Também foram apresentados modelos que retrataram a arquitetura sustentável do BIPV como algo ambientalmente correto, economicamente viável e socialmente justo, como em Schuetze, Willkomm e Roos (2015).

O foco ambiental concentrou-se no estudo dos impactos ambientais associados ao BIPV, principalmente na equivalência das emissões de gases do efeito estufa (GEE). Algumas abordagens foram mais recorrentes, cuja metodologia foi replicada na maioria dos trabalhos, conforme exposto na Tabela 2.3. Semelhante à conclusão de Li, Yang e Lam (2013), a ACV foi a mais utilizada na investigação dos impactos ambientais dos sistemas, como observado em Keoleian e Lewis (2003), Menoufi, Chemisana e Rosell (2013), Serrano-Lujan *et al.* (2015) e Palacios-Jaimes *et al.* (2017). Deve-se mencionar também que alguns estudos investigaram e enfatizaram o período de retorno da energia (PRE) e das emissões de GEE (PRGEE) (LAMNATOU; CHEMISANA, 2017), onde foram tratados, de forma independente, como em Lu e Yang (2010), ou como complemento à ACV, como fizeram Lamnatou *et al.* (2017).

Os resultados das ACVs contribuíram para informar acerca dos impactos ambientais das tecnologias, sistemas e/ou produtos, por toda sua cadeia de produção e consumo, além da tomada de decisões (KOURKOUMPAS *et al.*, 2018). O modo de efetuação não convencional dos BIPVs e o estudo aprofundado dos materiais utilizados revelaram o aumento no interesse por metais reciclados como recurso para conservação e redução das emissões de gases de efeito estufa, uma vez que todo CO₂ associado à fase de fabricação dos materiais é considerado parte do carbono incorporado de toda construção (LAMNATOU; SMYTH; CHEMISANA, 2019).

Os resultados apontam que a fase de fabricação representa a maior contribuição no total de emissões, seguida pela instalação, manutenção e o restante da vida útil dos equipamentos. Com relação à fase de operação, as condições climáticas foram consideradas ponto crucial na análise da pegada de carbono dos sistemas. Como exemplo, a avaliação realizada na cidade de Valladolid, na Espanha, obteve um valor de 150 g CO₂-eq/kWh na sua fachada fotovoltaica, enquanto Marselha e Sevilha mostraram valores menores que 142 g CO₂-eq/kWh para concentradores solares integrados a edifícios (PALACIOS-JAIMES, 2017, LAMNATOU *et al.*, 2017).

O PRE (Período de Retorno da Energia), em síntese, é o balanço da quantidade de energia gerada pelo sistema e a energia consumida incorporada para produção do sistema.

Nele contabiliza-se o ganho líquido de energia para o usuário, caso haja (LU; YANG, 2010). Peng e Lu (2013) mencionam que embora o PRE possa mostrar em quanto tempo o sistema recupera o uso de energia durante seu ciclo de vida, existem limitações importantes a serem consideradas, como a não consideração da vida útil do sistema fotovoltaico.

A escolha do local de exposição solar e a orientação ideal do BIPV foram a chave para o seu uso de maneira sustentável. Como exemplo, na fachada fotovoltaica vertical o PRE é mais longo, devido ao menor aproveitamento da radiação solar para produção elétrica, pela própria forma de disposição dos painéis, logo necessitará de mais tempo para produzir energia suficiente para recuperar o que foi gasto na fabricação do próprio sistema. Esse balanço da fachada vertical a torna menos sustentável, como afirmam Lu e Yang (2010).

O PRE é muito sensível a mudanças. Um mesmo sistema, sofrendo variações de temperatura controladas e sob efeito de diferentes intensidades solar diárias apresentou valores discrepantes de retorno. Em uma intensidade solar de 450 W/m².dia, sob diminuições de 4°C, 6°C e 8°C, os períodos de retorno foram de 24,51, 18,85 e 15,32 anos, respectivamente, enquanto para 650 W/m².dia, os períodos foram de 16,97, 13,06 e 10,61 anos, para as mesmas respectivas variações de temperatura (GUPTA; TIWARI, 2017).

Uma alternativa para estimar o número de anos que um sistema de geração de energia leva para "devolver" as emissões atmosféricas incorporadas no processo de fabricação dos equipamentos foi o PRGEE (Período de Retorno das Emissões de Efeito Estufa). O PRGEE é calculado através da razão entre as emissões evitadas por ano de funcionamento pelo produto entre a produção anual e a média de emissões por kWh/ano da matriz energética local (KRISTJANSDOTTIR *et al.*, 2016).

Zhang, Wang e Yang (2018) reforçam que também são consideradas outras emissões como o CH₄, N₂O, clorofluorcarbonetos, etc., entretanto são convertidas posteriormente em valores de CO₂-eq. O PRGEE variou significativamente com o cenário aplicado, de acordo com as emissões evitadas pela matriz local. Muito embora os módulos representassem a maior fração das emissões atmosféricas dos sistemas, as estruturas de fixação possuíam uma contribuição considerável. Dessa forma, a integração do sistema solar à arquitetura, ao reduzir o uso de materiais de cobertura e outros elementos construtivos, balanceiam e reduzem as contribuições totais da construção (KRISTJANSDOTTIR *et al.*, 2016).

Em Hong Kong, estimou-se que um sistema BIPV, com capacidade anual de

geração de 28.154 kWh de eletricidade, tenha capacidade de poupar cerca de 18.891 kg de CO₂-eq oriundos da queima de carvão. Esse mesmo sistema possui uma estimativa de CO₂-eq incorporado de 98.834 kg, referentes aos processos de fabricação e instalação, totalizando um PRGEE de 5,2 anos. O PRGEE adapta-se às condições locais e configurações de instalação do sistema, área requisitada e material, principalmente, o que promove diferentes valores de retorno. Essa sensibilidade aos cenários também foi observada na Noruega, onde os PRGEEs variaram entre 3 e 20 anos (LU; YANG, 2010, KRISTJANS DOT TIR, 2016).

Tabela 2.3: Descrição dos artigos enquadrados na categoria Ambiental.

Título	Autores	Descrição	Ano
Modeling the life cycle energy and environmental performance of amorphous silicon BIPV roofing in the US	Keoleian, GA.; Lewis, G.M.	É relatado um modelo de inventário do ciclo de vida que apresenta o desempenho energético e ambiental dos sistemas BIPV em relação à classe convencional e aos materiais de construção deslocados.	2003
Life-cycle energy analysis of building integrated photovoltaic systems (BiPVs) with heat recovery unit	Crawford, RH; Treloar, GJ; Fuller, RJ; Bazillan, M	São analisados dois tipos diferentes de células fotovoltaicas combinados com unidade de recuperação de calor, em termos de consumo de energia do ciclo de vida para determinar o período de retorno da energia.	2006
Potential of making - Over to sustainable buildings in the Kingdom of Bahrain	Alnaser, NW; Flanagan, R; Alnaser, WE	Estuda minuciosamente a quantidade de eletricidade extraída do uso de recursos de energia renovável (solar e eólica), integrada aos edifícios.	2008
Environmental payback time analysis of a roof-mounted building-integrated photovoltaic (BIPV) system in Hong Kong	Lu, L; Yang, HX	Relata os resultados da investigação do tempo de retorno da energia (PRE) e do tempo do retorno do gás de efeito estufa (GEE) de um sistema BIPV na cobertura (conectado à rede) em Hong Kong para medir sua sustentabilidade.	2010
Life cycle assessment of a building integrated concentrated photovoltaic scheme	Menoufi, K; Chemisana, D; Rosell, JI	Condução de um estudo de ACV em um sistema fotovoltaico concentrado em edifícios da Universidade de Lleida (Espanha)	2013
Investigation on the development potential of rooftop PV system in Hong Kong and its environmental benefits	Peng, JQ; Lu, L	Apresenta uma investigação aprofundada sobre o potencial de desenvolvimento do sistema fotovoltaico na cobertura em Hong Kong e seus benefícios ambientais.	2013

Life cycle energy analysis and embodied carbon of a linear dielectric-based concentrating photovoltaic appropriate for building-integrated applications	Lamnatou, C; Baig, H; Chemisana, D; Mallick, TK	Realiza a análise do ciclo de vida de um concentrador fotovoltaico para aplicações integradas ao edifício.	2015
Energy and greenhouse gas emission assessment of conventional and solar assisted air conditioning systems	Li, XF; Strezov, V	Investiga o potencial de redução da pegada ambiental dos sistemas de refrigeração com aplicações de fonte alternativa de energia renovável.	2015
Environmental benefits of parking-integrated photovoltaics: a 222 kWp experience	Serrano-Lujan, L; Garcia-Valverde, R; Espinosa, N; Garcia-Cascales, MS; Sanchez-Lozano, JM; Urbina, A	Realiza a avaliação do ciclo de vida de um sistema fotovoltaico de telureto de cádmio de 222kWp, conectado à rede.	2015
Embodied greenhouse gas emissions from PV systems in Norwegian residential zero emission pilot buildings	Kristjansdottir, TF; Bom, CS; Inman, MR; Schlanbusch, RD; Andresen, I	Compara GEE por kWh de eletricidade e tempos de retorno dos gases de efeito estufa para três sistemas fotovoltaicos residenciais em edifícios-piloto de emissão zero na Noruega.	2016
Environmental assessment of a building-integrated linear dielectric-based concentrating photovoltaic according to multiple life-cycle indicators	Lamnatou, C; Baig, H; Chemisana, D; Mallick, TK	Avança na direção da avaliação do ciclo de vida de um sistema fotovoltaico concentrado integrado em edifício dielétrico linear por meio de vários métodos de avaliação de impacto no ciclo de vida e indicadores ambientais.	2016
A critical review on building integrated photovoltaic products and their applications	Tripathy, M; Sadhu, PK; Panda, SK	Apresenta o estado da arte dos produtos envolvidos na construção e suas propriedades, além dos padrões e condições internacionais de teste.	2016
Hybrid diagnosis to characterise the energy and environmental enhancement of photovoltaic modules using smart materials	Royo, P; Ferreira, V; Lopez-Sabiron, AM; Ferreira, G	Avalia o controle operacional da temperatura em um BIPV com ou sem PCMs, considerando diferentes severidades climáticas.	2016
Recent advancement in BIPV product technologies: A review	Shukla, AK; Sudhakar, K; Baredar, P	Apresenta uma série de produtos BIPV e suas propriedades, além de diretrizes internacionais e padrões de teste.	2017
Photovoltaic/thermal (PVT) systems: A review with emphasis on environmental issues	Lamnatou, C; Chemisana, D	Revisão sobre investigações de PVT (fotovoltaica / térmica) com ênfase em estudos que envolvem questões ambientais sobre a tecnologia PVT.	2017
Dielectric-based 3D building-integrated concentrating photovoltaic modules: An environmental life-cycle assessment	Lamnatou, C; Baig, H; Chemisana, D; Mallick, TK	Investiga o perfil ambiental de um dispositivo fotovoltaico de concentração integrado em edifício 3D baseado em dielétrico (BICPV).	2017
Energy matrices of building integrated photovoltaic thermal systems: Case study	Gupta, N; Tiwari, GN	Estuda e analisa a integração de edifícios residenciais com sistemas fotovoltaicos.	2017
Transformation of a University	Palacios-Jaimes, GY;	Apresenta o estudo de caso de	2017

Lecture Hall in Valladolid (Spain) into a NZEB: LCA of a BIPV system integrated in its facade	Martin-Ramos, P; Rey-Martinez, FJ; Fernandez-Coppel, IA	um prédio de salas de aula, de propriedade da Universidade de Valladolid (Espanha).	
Environmental impact comparison of a ventilated and a non-ventilated building-integrated photovoltaic rooftop design in the Netherlands: Electricity output, energy payback time, and land claim	Ritzen, MJ; Vroon, ZAEP; Rovers, R; Lupisek, A; Geurts, CPW	Investiga um único indicador para avaliação de impacto ambiental da BIPV na Holanda, a reivindicação de terra.	2017
A review of key environmental and energy performance indicators for the case of renewable energy systems when integrated with storage solutions	Kourkoumpas, DS; Benekos, G; Nikolopoulos, N; Karellas, S; Grammelis, P; Kakaras, E	Propõe um número limitado de melhor ajuste e, ao mesmo tempo, facilmente adaptável a várias configurações, uma lista dos principais indicadores de desempenho para o caso de sistemas de energia renovável.	2018
A review of the energy performance and life-cycle assessment of building-integrated photovoltaic (BIPV) systems	Zhang, TT; Wang, M; Yang, HX	Analisa sistematicamente o progresso de pesquisas recentes sobre o desempenho elétrico, térmico, óptico e energético geral dos sistemas BIPV.	2018
Energy and carbon-emission analysis of integrated green-roof photovoltaic systems: Probabilistic approach	Jahanfar, A; Sono, B; Drake, J	Realizada uma análise probabilística para examinar as potenciais emissões de energia e carbono dos sistemas GR, PV e GR-PV.	2018
Towards productive cities: Environmental assessment of the food-energy-water nexus of the urban roof mosaic	Toboso-Chavero S; Nadal A; Petit-Boix, A; Pons, O; Villalba, G; Gabarrell, X; Josa, A; Rieradevall, J	Combina a ACV com duas diretrizes no telhado, para analisar a viabilidade técnica e as implicações ambientais da produção de alimentos e energia e coletar a água da chuva nos telhados através de diferentes combinações em diferentes escalas.	2018
Building-integrated photovoltaic/thermal (BIPVT): LCA of a facade-integrated prototype and issues about human health, ecosystems, resources	Lamnatou, C; Smyth, M; Chemisana, D	Estudo de ACV que avalia o desempenho ambiental de um protótipo BIPVT que foi desenvolvido e patenteado na Universidade de Ulster (Belfast, Reino Unido).	2019
Optimization of a BIPV system to mitigate greenhouse gas and indoor environment	Yoo, SH	Descreve os critérios ecológicos para otimizar a arquitetura solar através de uma convergência ecológica de uma arquitetura solar passiva e um sistema fotovoltaico.	2019
Carrying capacity based environmental impact assessment of Building Integrated Photovoltaics	Ritzen, MJ; Houben, JJM; Rovers, R; Vroon, ZAEP; Geurts, CPW	Desenvolve um método de ACV para configurações de BIPV.	2019
Storage systems for building-integrated photovoltaic (BIPV) and building-integrated photovoltaic/thermal (BIPVT) installations: Environmental profile and other aspects	Lamnatou, C; Notton, G; Chemisana, D; Cristofari, C	Apresenta uma visão geral sobre os sistemas de armazenamento apropriados para aplicativos BIPV e BIPVT.	2020

Fonte: Autores (2020)

A necessidade da avaliação do desempenho econômico nos cenários descritos foi satisfeita por alguns indicadores econômicos adotado. Foram considerados os investimentos, custo nivelado de energia (LCOE), valor presente líquido (VPL), período de retorno do investimento (*Payback*) e avaliação do custo de ciclo de vida (LCCA), conforme exposto na Tabela 2.4. Também foram apreciadas as economias de substituição de material e de carga térmica de resfriamento, devido à integração do sistema ao edifício (LU; YANG, 2010).

De acordo com as análises, há incertezas substanciais na estimativa do custo de investimento para sistemas BIPV. Os custos da compra, entrega e instalação dos componentes variaram imensamente dentre os parâmetros econômicos de cada localidade, desde o tamanho de mercado, área geográfica, condições competitivas, até taxas de trabalho prevalentes, dentre outros (ASAE *et al.*, 2017). Aristizábal e Páez (2018) sintetizaram os custos associados às etapas do projeto em três categorias: (i) elaboração do projeto, (ii) compra e aquisição de equipamentos e materiais e (iii) aquisição e implementação do sistema de O&M.

A comparação da viabilidade econômica dos estudos de caso foi realizada principalmente por duas ferramentas financeiras, que são o VPL e o *Payback*. O VPL mostra a diferença líquida entre os lucros e os custos do sistema no presente ou em valores anuais, calculado pela diferença entre o valor presente dos lucros e do valor presente dos custos. Já o *Payback* é o tempo mínimo necessário para recuperar os custos do investimento (GHOLAMI; RØSTVIK; MÜLLER-EIE, 2019).

Tabela 2.4: Descrição dos artigos enquadrados na categoria Econômico.

Título	Autores	Descrição	Ano
Life cycle cost assessment of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) systems	Agrawal, B; Tiwari, GN	Trata de uma análise do sistema térmico fotovoltaico integrado instalado no telhado de um edifício para gerar energia elétrica maior do que a gerada por um sistema fotovoltaico integrado no cenário inicial e também para o uso econômico de energia para aquecimento ambiente.	2010
Energy analysis of façade-integrated photovoltaic systems applied to UAE commercial buildings	Radhi, H	Explora uma variação da energia total do edifício do sistema fotovoltaico integrado, como um sistema de revestimento de parede aplicado ao setor comercial dos Emirados Árabes Unidos e mostra que as médias entre a produção fotovoltaica e a economia de energia é afetada pelos painéis	2010

		fotovoltaicos.	
Investigating the option of installing small scale PVs on facility rooftops in a green supply chain	Abdallah, T; Diabat, A; Rigter, J	Apresenta um modelo econômico que calcula ou usa a capacidade de kWh de PVs solares disponíveis e integra a decisão de instalar PVs de diferentes tamanhos nos telhados das instalações de uma cadeia de suprimentos sujeitos a diferenças climáticas específicas.	2013
Renovation of apartment blocks with BIPV: Energy and economic evaluation in temperate climate	Evola, G; Margani, G	Investiga a rentabilidade econômica e energética de edifícios residenciais em clima temperado através da integração de painéis fotovoltaicos em fachadas.	2016
Energy payback time and life-cycle cost analysis of building integrated photovoltaic thermal system influenced by adverse effect of shadow	Tripathy, M; Joshi, H; Panda, SK	Analisa o custo do ciclo de vida e o tempo de retorno de energia dos sistemas térmicos fotovoltaicos integrados de edifícios (BIPV) com referência às condições climáticas da Índia.	2017
Nonlinearity analysis of the shading effect on the technical-economic performance of the building-integrated photovoltaic blind	Hong, T; Koo, C; Oh, J; Jeong, K	Realiza uma análise não linear de efeito de sombreamento sobre o desempenho técnico-econômico da cortina fotovoltaica integrada ao prédio (BIPB), que foi projetado como um estudo preliminar para avaliar a viabilidade do BIPB antes de sua execução.	2017
Techno-economic evaluation of grid connected PV system for households with feed in tariff and time of day tariff regulation in New Delhi A sustainable approach	Tomar, V; Tiwari, GN	Discute a viabilidade do sistema fotovoltaico integrado no telhado/edifício (BIPV) conectado a uma rede elétrica para consumo em três famílias residenciais diferentes, com incorporação de alimentação no processo de tarifas em Nova Deli, Índia.	2017
Techno-economic assessment of photovoltaic (PV) and building integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) system retrofits in the Canadian housing stock	Asaee, SR; Nikoofard, S; Ugursal, VI; Beausoleil-Morrison, I	Avalia o impacto tecnoeconômico das instalações de retromontagem no conjunto habitacional canadense com sistemas fotovoltaicos e BIPV / T usando o Modelo de Emissão e Energia Híbrido Canadense de Uso Final.	2017
An economic impact analysis of residential progressive electricity tariffs in implementing the building-integrated photovoltaic blind using an advanced finite element model	Oh, J; Koo, C; Hong, T; Jeong, K; Lee, M	Investiga o impacto econômico do RPET5 na implementação da cortina fotovoltaica integrada ao edifício (BIPB) usando um modelo avançado de elementos finitos.	2017
BIPV: Building envelope solutions in a multi-criteria approach. A method for assessing life-cycle costs in the early design phase	Bonomo, P; Frontini, F; De Berardinis, P; Donsante, I	Delineia uma nova metodologia para avaliar a relação custo-benefício do BIPV para a estrutura do edifício.	2017
Power quality analysis of 6 kW building-integrated photovoltaic system and economic evaluation using RETScreen ^(TM)	Aristizábal, AJ; Páez, CA	Descreve a análise da qualidade de energia aplicada ao sistema fotovoltaico integrado a um prédio de 6 kW (BIPVS) e seu estudo econômico.	2018
Technical and economic evaluation of thin-film CdTe	Sorgato, MJ; Schneider, K;	Analisa pela primeira vez no Brasil o potencial técnico e econômico de	2018

building-integrated photovoltaics (BIPV) replacing facade and rooftop materials in office buildings in a warm and sunny climate	Ruther, R	integração de telureto de cádmio e cádmio de filmes finos de vidro e módulos PV de vidro de última geração (CdTe) em uma fachada e telhado de edifício comercial e avalia a viabilidade econômica de substituir materiais tradicionais de fachada, como vidro arquitetônico e material composto de alumínio por elegantes módulos fotovoltaicos pretos em seis cidades brasileiras.	
Techno-economic BIPV evaluation method in urban areas	Shirazi, AM; Zomorodiano, ZS; Tahsildoost, M	Apresenta uma ferramenta de avaliação tecnoeconômica integrada, para ajudar os decisores políticos e investidores a identificar as superfícies de instalação fotovoltaica mais apropriadas nas áreas urbanas.	2019
Holistic economic analysis of building integrated photovoltaics (BIPV) system: Case studies evaluation	Gholami, H; Rostvik, HN; Muller-Eie, D	Apresentada uma abordagem inovadora da análise econômica do BIPV.	2019
A simulated study of building integrated photovoltaics (BIPV) as an approach for energy retrofit in buildings	Farghaly, Y; Hassan, F	Estuda o uso de tecnologias e alternativas de energia renovável; representado na nova tecnologia fotovoltaica integrada de edifícios (BIPVs)	2019
Economic potential analysis of photovoltaic integrated shading strategies on commercial building facades in urban blocks: A case study of Colombo, Sri Lanka	Mendis, T.; Huang, ZJ; Xu, S; Zhang, WR	Avalia a utilização de estratégias integradas de sombreamento fotovoltaico com inclinação horizontal para combater esses problemas com base no contexto urbano de Colombo, Sri Lanka.	2020
Dynamic simulation, energy and economic comparison between BIPV and BIPVT collectors coupled with micro-wind turbines	Calise, F; Cappiello, FL; D'Accadia, MD; Vicidomini, M	Apresenta uma simulação dinâmica e uma análise econômica e energética de duas diferentes tecnologias solares integradas em edifícios.	2020
Economic performance assessment of building integrated photovoltaic system with battery energy storage under grid constraints	Sharma, P; Kolhe, M; Sharma, A	Analisa o desempenho da operação econômica e técnica considerando a aplicação potencial de armazenamento de energia da bateria no local em uma casa típica da Noruega com sistema BIPV.	2020

Fonte: Autores (2020)

De acordo com os resultados de Oh *et al.* (2017), existe uma tendência de que a viabilidade econômica do VPL em um caso com maior consumo de eletricidade seja superior ao de um agregado familiar de menor consumo. As principais variáveis nessa análise econômica, limitadas às condições assumidas nas simulações de energia, sistema de condicionamento, cargas internas, padrão de ocupação e operação do edifício, foram: (i) demanda de energia, (ii) produção de energia fotovoltaica no telhado, (iii) produção de energia fotovoltaica na fachada e (iv) tarifa de eletricidade. Dentro do VPL, a taxa interna de retorno (TIR) calcula o rendimento do investimento original através de um

processo iterativo que envolve a seleção de uma taxa de desconto e o desconto do fluxo de caixa até que o valor líquido do investimento seja zero (SORGATO; SCHNEIDER; RUTHER, 2018).

O VPL é sensível à capacidade de atendimento de uma demanda e de geração elétrica de um sistema BIPV, logo, qualquer influência nos fatores associados afeta diretamente no resultado final da análise financeira, como a temperatura local, índices de irradiância, quantidades de horas de sol pleno e consumo. Municípios cujos esses índices sejam desfavoráveis, em alguns cenários tendem a apresentar um balanço energético negativo, como é o caso de Belém-PA, no Norte do Brasil, conseqüentemente, o fluxo financeiro também se torna adverso (SORGATO; SCHNEIDER; RUTHER, 2018).

Em suma, o *Payback* representa o número de anos necessários para compensar o investimento inicial, a tornar o VPL positivo (EVOLA; MARGANI, 2016). Este foi o método padrão de cálculo do potencial econômico dessas tecnologias e considera o custo total de instalação, não apenas o custo unitário dos módulos fotovoltaicos, mas também dos outros equipamentos elétricos (cabos, inversor, desconexão), estimados em cerca de 30% do preço dos módulos e as economias de energia incorridas em termos de geração fotovoltaica que podem substituir o custo de serviços públicos (EVOLA; MARGANI, 2016; MENDIS *et al.*, 2020).

Como sempre, as condições físicas da instalação interferem diretamente na produção energética e, conseqüentemente, nos resultados relacionados. Mendis *et al.* (2020) concluíram que sistemas instalados a inclinações ideais são mais eficientes quando comparados a instalações verticais, o que concebe um custo mais baixo para conversão da energia solar em eletricidade, logo, um período de retorno financeiro menor.

Como exemplo, no Egito, um BIPV de 508,08 m², eficiência celular de 20,8% e um custo total de US\$ 60.888 alcançou o retorno do investimento em 4,7 anos, enquanto um sistema de mesma área, com eficiência de 19,2%, cujo custo foi de US\$ 51.235,3 obteve um *Payback* de 5,13 anos (FARGHALY; HASSAN, 2019). Já no Sri Lanka, o retorno obtido para a instalação de uma fachada fotovoltaica em um edifício urbano foi de 21 anos, o que tornou inviável a sua implementação (MENDIS *et al.*, 2020).

O valor de eletricidade gerada foi calculado pelo índice CNE, que descreve o custo da eletricidade produzida pela energia solar durante um período de tempo e é dependente da quantidade potencial da geração elétrica. Situações de BIPV com LCOE acima do preço da eletricidade residencial e comercial não são economicamente viáveis, de acordo com Shirazi, Zomorodian e Tahsildoost (2019). Sharma, Kolhe e Sharma (2019)

observaram que os parâmetros econômicos e técnicos considerados, bem como as condições climáticas, afetam o desempenho econômico sob as condições variáveis do mercado de energia.

Outra ferramenta escolhida para fornecer uma identificação eficaz da relação custo-benefício foi a avaliação do custo do ciclo de vida. Na ACCV, todos os custos relevantes, presentes e futuros, associados à aquisição, operação, manutenção e descarte de um sistema são somados em valor presente durante uma determinada vida útil, com objetivo de estimar o custo geral das alternativas do projeto e selecionar aquele que garanta o menor custo total de instalação na propriedade, consistente com sua qualidade e função (AGRAWAL; TIWARI, 2010).

Segundo Hong *et al.* (2017), a ACCV pode ser analisada através de três métodos de expressão: (i) VPL como valor absoluto do investimento; (ii) relação entre benefício do ciclo de vida e custo do ciclo de vida como valor relativo do investimento e; (iii) equilíbrio do valor relativo ao investimento. A ACCV segue a mesma tendência do PRE relacionada à orientação do painel BIPV, uma vez que ambos dependem dos valores de produção de energia e, conseqüentemente, da incidência de insolação no sistema (TRIPATHY; JOSHI; PANDA, 2017).

O estudo de caso de Bonomo *et al.* (2017) revelou que o VPL de soluções com BIPV foi superior aos custos totais. Notou-se que, embora em termos econômicos o BIPV necessite de alto investimento inicial, a solução tem o melhor desempenho em equilíbrio energético no ciclo de vida, devido à quantidade de energia líquida.

Os estudos que contemplam a junção de ambiente e economia, 18,8% da amostra, descritos na Tabela 2.5, no geral, utilizaram duas ou mais ferramentas características dessas áreas de abrangência. Os casos mais comuns justificaram a elaboração da pesquisa, cujo foco era a análise econômica, pelo benefício ambiental oriundo da implantação do sistema BIPV, resultante da diminuição da carga de GEE emitida para a atmosfera, como em Cucchiella, D'Adamo e Koh (2015) e Li, Chow e Lee (2013). Como concluíram Oliver e Jackson (2000), a tendência é que os sistemas fotovoltaicos se tornem um método econômico de redução de emissões de CO₂.

A situação mais comum encontrada nessa categoria foi a análise do investimento seguido de uma ACV. Cucchiella *et al.* (2012), Sagani, Mihelis e Dedoussis (2017) e Irshad *et al.* (2019), por exemplo, investigaram a eficiência técnica, econômica e ambiental de sistemas em diferentes localidades. Wu *et al.* (2018) foram além, com a análise do *Payback* e, Ng e Mithraratne (2014) ainda acrescentaram o PRE.

Os benefícios econômicos-ambientais relacionados ao sistema BIPV foram quantificados através do levantamento dos retornos futuros no tempo presente, pela metodologia do VPL e PRE, e mostraram-se maiores que os sistemas convencionais, segundo Wang *et al.* (2016). Com as mesmas ferramentas, Seng, Lalchand e Lin (2008) usaram os dados obtidos como indicação dos benefícios que os sistemas podem angariar para os governos, empresas de serviços públicos e proprietários em geral, como forma de economizar gastos e reduzir a emissão total de GEE quando comparados a outras matrizes energéticas. Semelhante a essa última afirmação, Radhi (2012) demonstrou a existência dos mesmos benefícios e, com base no estudo do *Payback*, complementou que o mesmo é inversamente proporcional ao aumento da tarifa elétrica.

Tabela 2.5: Descrição dos artigos enquadrados nas categorias Ambiental e Econômico.

Título	Autores	Descrição	Ano
The evolution of economic and environmental cost for crystalline silicon photovoltaics	Oliver, M; Jackson, T	Apresenta uma série de análises de sensibilidade projetadas para ilustrar a influência de vários fatores relacionados ao desempenho econômico e desempenho ambiental da construção de energia fotovoltaica integrada.	2000
Economical, environmental and technical analysis of building integrated photovoltaic systems in Malaysia	Seng, Ly; Lalchand, G; Lin, GMS	Analisa os resultados de trabalhos que abordam uma ampla gama de questões técnicas, ambientais e econômicas relacionadas à conexão de sistemas fotovoltaicos a redes de distribuição locais.	2008
Simplified method of sizing and life cycle cost assessment of building integrated photovoltaic system	Chel, A; Tiwari, GN; Chandra, A	Apresenta uma metodologia para avaliar o tamanho e o custo dos componentes do BIPV.	2009
Trade-off between environmental and economic implications of PV systems integrated into the UAE residential sector	Radhi, H	Revisa estudos sobre o uso de sistemas fotovoltaicos na região do Golfo e, avalia o trade-off entre parâmetros ambientais e econômicos que influenciam o valor da construção de tecnologia BIPV aplicado no setor de construção dos Emirados Árabes Unidos.	2012
Renewable energy options for buildings: Performance evaluations of integrated photovoltaic systems	Cucchiella, F; D'Adamo, I; Gastaldi, M; Koh, SCL	Apresenta um modelo para minimizar o risco de investimento e maximizar o retorno de um portfólio de energia renovável na Itália.	2012
An analysis of a medium size grid-connected building integrated photovoltaic (BIPV) system using measured data	Li, DHW; Chow, SKH; Lee, EWM	Estuda um sistema BIPV conectado a uma rede de tamanho médio montada em um prédio institucional. Foram analisados dados técnicos, incluindo aplicação solar e produção de energia.	2013
Lifetime performance of semi-transparent building-integrated photovoltaic (BIPV) glazing systems in	Ng, PK; Mithraratne, N	Examina o desempenho ambiental e econômico do ciclo de vida dos módulos BIPV semitransparentes disponíveis no mercado para aplicações em janelas nas	2014

the tropics		condições climáticas de Cingapura	
Environmental and economic analysis of building integrated photovoltaic systems in Italian regions	Cucchiella, F; D'Adamo, I; Koh, SCL	Foram estimadas a rentabilidade econômica e o impacto ambiental de sistemas, em escala local e regional, para delinear como características gerais que não são causadas por um único cenário.	2015
Environmental assessments and economic performance of BAPV and BIPV systems in Shanghai	Wang, WL; Liu, YS; Wu, XF; Xu, Y; Yu, WY; Zhao, CJ; Zhong, YB	Analisa dois sistemas em Xangai, um sistema fotovoltaico anexo ao edifício (BAPV) de 3 kWp e um sistema fotovoltaico integrado ao edifício (BIPV) de 10 kW, através dos benefícios do sistema, o tempo de retorno da energia e o tempo de retorno dos gases de efeito estufa.	2016
Techno-economic analysis and life-cycle environmental impacts of small-scale building-integrated PV systems in Greece	Sagani, A; Mihelis, J; Dedoussis, V	Apresenta uma análise econômica e ambiental de sistemas de energia interconectados relativamente à rede fotovoltaica no telhado, pequenos e com potência nominal de 2-10 kW (p), localizado em Atenas, Grécia.	2017
LCA-based economic benefit analysis for building integrated photovoltaic (BIPV) façades: A case study in Taiwan	Wu, YW; Wen, MHD; Young, LM; Hsu, IT	Explora os benefícios econômicos das instalações e equipamentos fotovoltaicos integrados em edifícios (BIPV).	2018
Sizing and life-cycle assessment of building integrated thermoelectric air cooling and photovoltaic wall system	Irshad, K; Habib, K; Algarni, S; Saha, BB; Jamil, B	Apresenta um procedimento para calcular o tamanho e o custo da integração de sistemas de duto de refrigeração de ar termoelétrico (TE-AD) e parede fotovoltaica (PV-W) com sala de teste.	2019
Sustainable design for airport terminals, by integrated photovoltaic (PV) system (adopting bench-marking approach)	Dehkordi, ER; Karimi, A; Karimi, R; Beygi, MA	Visa responder à demanda comum de sustentabilidade e arquitetura sem conflito de interesses.	2019

Fonte: Autores (2020)

Os estudos de cunho social foram pautados no encorajamento e análise da adoção das tecnologias por meio de políticas incentivadoras, na percepção humana dos benefícios ambientais e econômicos da sua implantação e a influência da aplicabilidade no dia a dia dos usuários, como foi demonstrado na Tabela 2.6. De acordo com Shukla *et al.* (2018), o comissionamento de BIPVs em edifícios governamentais na Índia aumentou o uso de energia solar e proporcionou uma replicação. Eles ainda afirmaram que embora esse modelo de módulos seja de 25 a 30% mais caro que o convencional, a sua popularização ajudaria na redução do preço ao longo dos anos.

Países com boas condições climáticas e altas faixas de irradiação solar possuem um ótimo potencial energético para implantação de tecnologias fotovoltaicas. Como exemplo, a Índia está com a capacidade de geração elétrica oriunda da energia solar ascendente desde 2010, proporcionado pelo direcionamento de políticas governamentais,

como forma de suprimento dos déficits energéticos (SHUKLA *et al.*, 2018). Por isso o estudo da taxa de difusão das tecnologias verdes junto com o efeito das políticas promocionais foi de grande valor (RAMSHANI *et al.*, 2020).

Ramshani *et al.* (2020) elencaram alguns estudos que avaliam os efeitos do incremento de políticas sobre as taxas de adoção de tecnologias verdes. Eles abordaram, principalmente, o potencial de influência dos impostos nos créditos para investimento, alimentação de tarifas e energia líquida. De fato, a melhor política para o desenvolvimento de sistemas fotovoltaicos foi a redução do custo de implementação.

Os resultados revelam a relação direta entre o número total de instalações e o custo dessas tecnologias, ou seja, a quantidade de sistemas instalados foi diretamente proporcional à diminuição dos custos ao longo do tempo. O efeito dos custos foi identificável nos bairros relativamente mais ricos, com maior número de instalações e isso os tornou ponto de partida para políticas promocionais, pelo maior potencial de adoção de tecnologias verdes. Esse fato destacou a importância da formulação de políticas financeiras e da conscientização do público na taxa de adoção (RAMSHANI *et al.*, 2020).

Tabela 2.6: Descrição dos artigos enquadrados na categoria Social.

Título	Autores	Descrição	Ano
Solar PV and BIPV system: Barrier, challenges and policy recommendation in India	Shukla, AK; Sudhakar, K; Baredar, P; Mamat, R	Fornecer uma visão geral do status da energia solar e aplicação do sistema BIPV na Índia.	2018
An agent-based approach to study the diffusion rate and the effect of policies on joint placement of photovoltaic panels and green roof under climate change uncertainty	Ramshani, M; Li, XP; Khojandi, A; Omitaomu, O	Investiga a taxa de difusão das tecnologias verdes sob incertezas causadas pelas mudanças climáticas, características dos adotantes e suas interações.	2020

Fonte: Autores (2020)

Existe também a classe dos trabalhos que tratam da comunicação entre os meios ambiental e social, esses representaram 8,7% da amostra e são detalhados na Tabela 2.7. A abordagem desses estudos foi o dinamismo e a casualidade entre os sistemas integrados com o ambiente urbano e os que dele fazem parte (KELLY; SEN; TATARI, 2020). Com exceção de Kittner, Gheewala e Kamens (2013), que realizaram uma ACV e revisão de políticas públicas, o enfoque dessa seção foi o conforto humano diante da presença do BIPV, que de acordo com Castaldo *et al.* (2018), atenta-se às condições de bem-estar, produtividade e satisfação.

Tabela 2.7: Descrição dos artigos enquadrados nas categorias Ambiental e Social.

Título	Autores	Descrição	Ano
An environmental life cycle comparison of single-crystalline and amorphous-silicon thin-film photovoltaic systems in Thailand	Kittner, N; Gheewala, SH; Kamens, RM	Avalia os benefícios ambientais e econômicos de dois tipos de tecnologias fotovoltaicas - sistemas de película fina de silício monocristalino e amorfo.	2013
Evaluation of green buildings' overall performance through in situ monitoring and simulations	Asdrubali, F; Buratti, C; Cotana, F; Baldinelli, G; Goretti, M; Moretti, E; Baldassarri, C; Belloni, E; Bianchi, F; Rotili, A; Vergoni, M; Palladino, D; Bevilacqua, D	Executa simulações de energia por meio de códigos que implementam os algoritmos exigidos pela lei italiana. Além disso, realiza uma comparação entre consumos reais e requisitos simulados de energia. Finalmente, os edifícios foram caracterizados pelo ponto de vista da sustentabilidade ambiental, usando o método adotado pela região da Úmbria, Itália.	2013
Quantitative evaluation of BIPV visual impact in building retrofits using saliency models	Xu, R; Wittkopf, S; Roeske, C	Apresenta um método alternativo e complementar para avaliar o impacto visual da BIPV utilizando o método da saliência, com uma abordagem objetiva, quantitativa e neuropsicológica.	2017
Numerical studies of thermal comfort for semi-transparent building integrated photovoltaic (BIPV)-vacuum glazing system	Ghosh, A; Sarmah, N; Sundaram, S; Mallick, TK	Avalia o conforto térmico, numericamente, de uma sala sem mobília, composta por vidros a vácuo BIPV, para o clima do Reino Unido.	2019
Color comfort evaluation of dye-sensitized solar cell (DSSC) based building-integrated photovoltaic (BIPV) glazing after 2 years of ambient exposure	Roy, A; Ghosh, A; Bhandari, S; Selvaraj, P; Sundaram, S; Mallick, TK	Analisa o conforto de cores menos explorada da janela BIPV de célula solar sensibilizada por corante (DSSCs) baseada em TiO2 sensível ao corante N719.	2019
A system dynamics analysis of the alternative roofing market and its potential impacts on urban environmental problems: A case study in Orlando, Florida	Kelly, C; Sen, B; Tatari, O	Analisa os obstáculos no mercado de coberturas alternativas de Orlando, bem como o potencial de investimentos sociais, econômicos e de desenvolvimento em diferentes mercados de coberturas alternativas para abordar diversas questões através de uma abordagem de modelagem da System Dynamics.	2020

Fonte: Autores (2020)

A análise de Kittner, Gheewala e Kamens (2013) comparou as emissões de GEE geradas pela produção e utilização de painéis monocristalinos e filmes finos fabricados em diferentes países e concluiu que os painéis da China têm maiores índices de emissões quando comparados a outros países. Este fato ocorreu devido à maior proporção de carvão na matriz energética da China, o que indicou que o potencial de aquecimento global varia de acordo com o país de produção.

Em instalações BIPV, o fluxo de ar frio entre a camada fotovoltaica externa e a superfície intermediária reduz a temperatura interna do ar e aumenta o conforto térmico ambiente e ainda aumenta a geração de energia (GHOSH *et al.*, 2019). Apesar disso, de acordo com Asdrubali *et al.* (2013), a análise do conforto térmico estava estritamente ligada à rotina dos habitantes, em relação ao gerenciamento de dispositivos de controle térmico e ventilação natural. Os edifícios equipados com espaços solares desprotegidos e ventilação mal aproveitada possuíam mudanças significativas na faixa de temperatura do ar, devido ao uso incorreto dessas áreas.

Com o crescente número de instalações de BIPVs, os usuários perceberam que além do seu aspecto energético, o visual é um elemento crucial na escolha, inclusive o governo Suíço afirmou que a abundância de sistemas fotovoltaicos convencionais acabaria por prejudicar a aparência existente das cidades e dos edifícios (XU; WITTKOPF; ROESKE, 2017). Além do conforto visual do elemento estético, por parte dos moradores, o bem-estar sensitivo foi considerado um passo crucial para a diminuição do consumo energético, pelo melhor aproveitamento da iluminação natural. É percebida uma melhor receptividade dos usuários quando se controla as propriedades da cor da luz do dia, através da vidraça, e se alcança a qualidade da iluminação interior semelhante a do exterior. Entretanto, pode-se criar um desconforto quando a alta penetração da luz do dia supera o nível de aceitabilidade (ROY *et al.*, 2019).

Os trabalhos que analisam os três eixos citados anteriormente foram enquadrados na classe de sustentabilidade, através da metodologia adotada, como exposto na Tabela 2.8. Existem diversos pontos de vista para considerar a mesma temática. As ferramentas definidas pelos pesquisadores variaram entre análise teórica, estudo de déficits e proposição de formas de avaliação de sustentabilidade mais abrangente.

Tabela 2.8: Descrição dos artigos enquadrados nas categorias Ambiental, Econômico e Social.

Título	Autores	Descrição	Ano
Model for calculating the sustainable building index (SBI) in the kingdom of Bahrain	Alnaser, NW; Flanagan, R; Alnaser, WE	Desenvolve um modelo que permite que os participantes do setor de construção civil e os formuladores de políticas de energia percebam o interesse de investidores no reino do Bahrein na condução de turbinas eólicas integradas de construção fotovoltaica integrada (BIPV) ou construção (BIWT), ou seja, edifícios parciais sustentáveis ou verdes.	2008
Zero energy buildings and sustainable	Li, DHW; Yang, L; Lam, JC	Revisa os edifícios de energia zero. Trabalha e discute as implicações deles para o desenvolvimento sustentável.	2013

development implications - A review			
Development of a Holistic Evaluation System for BIPV Façades	Schuetze, T; Willkomm, W; Roos, M	Compara sistemas de fachada convencionais com sistemas de fachada BIPV em relação a diferentes critérios técnicos, econômicos, de sustentabilidade e de design.	2015

Fonte: Autores (2020)

Alnaser, Flanagan e Alnaser (2008) revisaram dois modelos de certificação de construção sustentável e suas diretrizes e criaram um sistema de avaliação de edificações sustentáveis. De acordo com o selo LEED, a energia utilizada pelo edifício, inclusive na sua construção, consiste em quase 25% do peso dos requisitos necessários para certificação, onde considera-se ainda o local de instalação, eficiência hídrica, materiais e recursos, qualidade ambiental interna e inovação e design. Já a certificação BREEAM utiliza padrões que melhoram as práticas sustentáveis e avalia o desempenho dos edifícios em políticas gerais de gerenciamento, local de comissionamento de questões processuais, uso de energia e relação com dióxido de carbono, saúde e bem-estar, poluição e logística de transporte.

A significância desses fatores foi desenvolvida através de conduções e barreiras previamente elencadas, que objetivam a execução da política energética, definição dos critérios operacionais e seleção de indicadores recomendados. A elaboração de políticas sustentáveis foi orientada por objetivos e prioridades que consideram o impacto de suas características específicas para cada localidade, de acordo com suas geopolíticas. Já os dados da energia eram apontadores tecnológicos, técnico-físicos, socioeconômicos, de despesas e do acompanhamento da pesquisa e desenvolvimento, de relevância extremamente crítica. A formulação de políticas energéticas seguiu com base nos seguintes indicadores para cada um dos objetivos políticos: (i) atenção à segurança do fornecimento, (ii) competitividade do mercado e (iii) proteção ambiental (ALNASER; FLANAGAN; ALNASER, 2008).

Schuetze, Willkomm e Roos (2015) trabalharam com a criação de uma metodologia para comparação quantitativa e qualitativa de fachadas BIPV e afirmaram que só é possível a sua realização, entre duas ou mais estruturas, de posse da descrição detalhada e objetiva dos seus componentes. Os seis principais critérios de avaliação da qualidade foram definidos em: (i) projeto, (ii) flexibilidade, (iii) sustentabilidade e ecologia, (iv) produção, (v) economia e (vi) construção civil. O método desenvolvido ateu-se para as seguintes singularidades: (i) os principais critérios só puderam ser

determinados claramente com base nas interações entre os critérios individuais associados; (ii) as interações geralmente tinham características qualitativas e só puderam ser quantificados em casos particulares e; (iii) as comparações de interações entre critérios específicos deveriam ser consideradas e tratadas de maneira semelhante no âmbito de avaliações ou alternativas de projetos.

A análise crítica realizada por Li, Yang e Lam (2013) contribuiu para a percepção dos déficits dos estudos a respeito da sustentabilidade dos BIPVs. As técnicas e tecnologias de design associadas foram bem estabelecidas e desempenham um papel importante em qualquer estratégia de desenvolvimento sustentável. Entretanto, existem discussões, pesquisas e desenvolvimentos que necessitam de mais atenção nos três eixos. Apesar do ano da publicação do estudo (2013), as considerações efetuadas ainda se mostraram condizentes com a realidade das demais obras verificadas.

As recentes análises do impacto das mudanças climáticas no setor energético como um todo, inclusive do uso no ambiente construído, destacaram a vulnerabilidade dos sistemas em relação ao excesso de energia e problemas de armazenamento (LI; YANG; LAM, 2013). Lamnatou e Chemisana (2017) explicitaram a necessidade de mais estudos baseados em múltiplos métodos de ACV e impactos ambientais associados. Lamnatou, Smyth e Chemisana (2019) complementaram a afirmação da necessidade de estudos de ACV voltados especificamente para tecnologia fotovoltaica integrada, em especial a inclusão de indicadores sobre toxicidade e ecotoxicidade humanas.

Embora houvesse um número de estudos que utilizaram a contabilidade técnica da energia do ciclo de vida para avaliar a eficiência energética e as implicações das emissões dos edifícios ou das tecnologias renováveis específicas, muito pouco trabalho foi direcionado profundamente para esse tipo de construção autossustentável (LI; YANG; LAM, 2013). Nesse sentido, Lamnatou *et al.* (2019) expressaram a necessidade da apresentação de soluções de armazenamento para sistemas solares integrados, com ênfase nos impactos ambientais de diferentes tipos de componentes de armazenamento. Aristizábal e Páez (2018) manifestaram a exigência de mais pesquisas sobre a entrada de produtos fotovoltaicos como parte adicional no campo da construção civil.

As políticas sociais carecem de uma atitude positiva em relação à sustentabilidade de seus incentivos e na universalização dos usuários, com uma visão econômica e ambiental acompanhada de visão social igualmente importante (LI; YANG; LAM, 2013). Essa afirmação também foi admitida por Radhi (2012), quando citou que o valor da tecnologia fotovoltaica precisava ser avaliado à luz de parâmetros ambientais e até

sociais. Os sistemas BIPVs precisam de políticas modificadoras, além do amplo suporte para o incentivo ao desenvolvimento dos projetos, através do acesso a informações de qualidade sobre essas tecnologias, além de treinamentos, capacitações e elaboração de políticas mobilizadoras da sociedade (SHUKLA *et al.*, 2018).

Também não foram detectados trabalhos classificados como econômicos e sociais, o que demonstrou o déficit de pesquisas desse cunho. Mesmo com essas carências de estudos, os BIPVs mostraram-se bons modelos para propagação dos conceitos de sustentabilidade e construção sustentável. Os benefícios ambientais, quando acompanhados de estudos econômicos sólidos e de incentivos para generalização e difusão social, garantem um melhor aproveitamento da tecnologia, no sentido de economia de recursos, resgate de GEE e valorização da arquitetura predial.

2.5 CONCLUSÕES

O estudo possibilitou uma visão geral sobre o estado da arte dos trabalhos referentes aos Sistemas Fotovoltaicos Integrados à Construção e das particularidades da bibliografia com relação aos pilares da sustentabilidade, na amostra dos 69 artigos analisados. Trata-se de uma temática recente e interdisciplinar, com pesquisas de diversas áreas do conhecimento.

A sustentabilidade é tratada de forma segregada, na maior parte dos trabalhos, abordando um ou dois pilares de forma mútua. O pilar ambiental foi o de maior representatividade, seguido do econômico e da junção destes dois. Uma amostragem mínima trabalhou com os três pilares de forma explícita, entretanto, todos justificaram a metodologia empregada com base no princípio da sustentabilidade.

O foco do pilar ambiental foi abordado com estudos dos impactos ambientais associados ao BIPV, principalmente no equivalente às emissões de gases de efeito estufa. A avaliação econômica foi satisfeita, basicamente, por indicadores de viabilidade e retorno de investimentos. Já o cunho social foi pautado em termos de análise dos incentivos e da adoção da tecnologia por meio de políticas, opiniões e impactos da aplicabilidade na vida dos usuários.

Listou-se alguns déficits presentes elencados pelos autores, para melhoria do embasamento quanto à sustentabilidade na aplicação de BIPVs, como a premência de trabalhos profundamente direcionados para as construções sustentáveis, múltiplos métodos de ACV e impactos ambientais associados. Além de tudo, não foram detectados trabalhos classificados como econômicos e sociais, o que demonstra a conveniência de

mais estudos dessa área de pesquisa específica.

Apesar das limitações elencadas, os BIPVs revelaram-se ótimos divulgadores dos valores da sustentabilidade unidos à construção sustentável. Demonstrou-se que essa tecnologia é melhor aproveitada quando acompanhada de estudos ambientais e econômicos sólidos, além de políticas de incentivos. Para mais, ainda agrega benefícios no âmbito da economia de recursos naturais, redução nas emissões de gases de efeito estufa e valorização da arquitetura.

ANEXO 01

REFERÊNCIAS DA REVISÃO SISTEMÁTICA

ABDALLAH, T.; DIABAT, A.; RIGTER, J. Investigating the option of installing small scale PVs on facility rooftops in a green supply chain. **International Journal of Production Economics**, [s.l.], v. 146, n. 2, p. 465-477, dez. 2013.

AGRAWAL, B.; TIWARI, G. N. Life cycle cost assessment of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) systems. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 42, n. 9, p. 1472-1481, set. 2010.

ALNASER, N. W.; FLANAGAN, R.; ALNASER, W. E. Model for calculating the sustainable building index (SBI) in the kingdom of Bahrain. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 40, n. 11, p. 2037-2043, jan. 2008.

ALNASER, N.W.; FLANAGAN, R.; ALNASER, W. E. Potential of making—Over to sustainable buildings in the Kingdom of Bahrain. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 40, n. 7, p. 1304-1323, jan. 2008.

ARISTIZÁBAL, A. J.; PÁEZ, C. A. Power quality analysis of 6 kW building-integrated photovoltaic system and economic evaluation using RETScreen™. **International Journal of Ambient Energy**, [s.l.], v. 39, n. 8, p. 813-822, 21 jul. 2017.

ASAE, S. R.; NIKOOFARD, S.; UGURSAL, V. I.; BEAUSOLEIL-MORRISON, I. Techno-economic assessment of photovoltaic (PV) and building integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) system retrofits in the Canadian housing stock. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 152, p. 667-679, out. 2017.

ASDRUBALI, F.; BURATTI, C.; COTANA, F.; BALDINELLI, G.; GORETTI, M.; MORETTI, E.; BALDASSARRI, C.; BELLONI, E.; BIANCHI, F.; ROTILI, A. Evaluation of Green Buildings' Overall Performance through in Situ Monitoring and Simulations. **Energies**, [s.l.], v. 6, n. 12, p. 6525-6547, 17 dez. 2013.

BONOMO, P.; FRONTINI, F.; BERARDINIS, P. D.; DONSANTE, I. BIPV: building envelope solutions in a multi-criteria approach. A method for assessing life-cycle costs in the early design phase. **Advances in Building Energy Research**, [s.l.], v. 11, n. 1, p. 104-129, 30 mar. 2016.

CALISE, F.; CAPPIELLO, F. L.; D'ACCADIA, M. D.; VICIDOMINI, M. Dynamic simulation, energy and economic comparison between BIPV and BIPVT collectors coupled with micro-wind turbines. **Energy**, [s.l.], v. 191, p. 116439-116484, jan. 2020.

CHEL, A.; TIWARI, G. N.; CHANDRA, A. Simplified method of sizing and life cycle cost assessment of building integrated photovoltaic system. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 41, n. 11, p. 1172-1180, nov. 2009.

CRAWFORD, R. H.; TRELOAR, G. J.; FULLER, R. J.; BAZILIAN, M. Life-cycle energy analysis of building integrated photovoltaic systems (BiPVs) with heat recovery unit. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 10, n. 6, p. 559-575, dez. 2006.

CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; GASTALDI, M.; KOH, S.C. Lenny. Renewable energy options for buildings: performance evaluations of integrated photovoltaic systems. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 55, p. 208-217, dez. 2012.

CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; KOH, S. C. L. Environmental and economic analysis of building integrated photovoltaic systems in Italian regions. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 98, p. 241-252, jul. 2015.

DEHKORDI, E. R.; KARIMI, A.; KARIMI, R.; BEYGI, M. A. Sustainable design for airport terminals, by integrated photovoltaic (PV) system (adopting bench-marking approach). **International Journal of Green Energy**, [s.l.], v. 16, n. 15, p. 1611-1616, 19 out. 2019.

EVOLA, G.; MARGANI, G. Renovation of apartment blocks with BIPV: energy and economic evaluation in temperate climate. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 130, p. 794-810, out. 2016.

FARGHALY, Y.; HASSAN, F. A Simulated Study of Building Integrated Photovoltaics (BIPV) as an Approach for Energy Retrofit in Buildings. **Energies**, [s.l.], v. 12, n. 20, p. 3946, 17 out. 2019.

GHOLAMI, H.; RØSTVIK, H. N.; MÜLLER-EIE, D. Holistic economic analysis of building integrated photovoltaics (BIPV) system: case studies evaluation. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 203, p. 109461-109472, nov. 2019.

GHOSH, A.; SARMAH, N.; SUNDARAM, S.; MALLICK, T. K. Numerical studies of thermal comfort for semi-transparent building integrated photovoltaic (BIPV)-vacuum glazing system. **Solar Energy**, [s.l.], v. 190, p. 608-616, set. 2019.

GUPTA, N.; TIWARI, G. N. Energy Matrices of Building Integrated Photovoltaic Thermal Systems: case study. **Journal of Architectural Engineering**, [s.l.], v. 23, n. 4, p. 05017006, dez. 2017.

HONG, T.; KOO, C.; OH, J.; JEONG, K. Nonlinearity analysis of the shading effect on the technical-economic performance of the building-integrated photovoltaic blind. **Applied Energy**, [s.l.], v. 194, p. 467-480, maio 2017.

IRSHAD, K.; HABIB, K.; ALGARNI, S.; SAHA, B. B.; JAMIL, B. Sizing and life-cycle assessment of building integrated thermoelectric air cooling and photovoltaic wall system. **Applied Thermal Engineering**, [s.l.], v. 154, p. 302-314, maio 2019.

JAHANFAR, A.; SLEEP, B.; DRAKE, J. Energy and Carbon-Emission Analysis of Integrated Green-Roof Photovoltaic Systems: probabilistic approach. **Journal of Infrastructure Systems**, [s.l.], v. 24, n. 1, p. 04017044, mar. 2018.

KELLY, C.; SEN, B.; TATARI, O. A system dynamics analysis of the alternative roofing market and its potential impacts on urban environmental problems: a case study in orlando, florida. **Resources, Conservation and Recycling**, [s.l.], v. 153, p. 104556-104570, fev. 2020.

KEOLEIAN, G. A.; LEWIS, G. M. Modeling the life cycle energy and environmental performance of amorphous silicon BIPV roofing in the US. **Renewable Energy**, [s.l.], v.

28, n. 2, p. 271-293, fev. 2003.

KITTFNER, N.; GHEEWALA, S. H.; KAMENS, R. M. An environmental life cycle comparison of single-crystalline and amorphous-silicon thin-film photovoltaic systems in Thailand. **Energy for Sustainable Development**, [s.l.], v. 17, n. 6, p. 605-614, dez. 2013.

KOURKOUMPAS, D.; BENEKOS, G.; NIKOLOPOULOS, N.; KARELLAS, S.; GRAMMELIS, P.; KAKARAS, E. A review of key environmental and energy performance indicators for the case of renewable energy systems when integrated with storage solutions. **Applied Energy**, [s.l.], v. 231, p. 380-398, dez. 2018.

KRISTJANSDDOTTIR, T. F.; GOOD, C. S.; INMAN, M. R.; SCHLANBUSCH, R. D.; ANDRESEN, I. Embodied greenhouse gas emissions from PV systems in Norwegian residential Zero Emission Pilot Buildings. **Solar Energy**, [s.l.], v. 133, p. 155-171, ago. 2016.

LAMNATOU, C.; BAIG, H.; CHEMISANA, D.; MALLICK, T. K. Dielectric-based 3D building-integrated concentrating photovoltaic modules: an environmental life-cycle assessment. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 138, p. 514-525, mar. 2017.

LAMNATOU, C.; BAIG, H.; CHEMISANA, D.; MALLICK, T. k. Environmental assessment of a building-integrated linear dielectric-based concentrating photovoltaic according to multiple life-cycle indicators. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 131, p. 773-784, set. 2016.

LAMNATOU, C.; BAIG, H.; CHEMISANA, D.; MALLICK, T. K. Life cycle energy analysis and embodied carbon of a linear dielectric-based concentrating photovoltaic appropriate for building-integrated applications. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 107, p. 366-375, nov. 2015.

LAMNATOU, C.; CHEMISANA, D. Photovoltaic/thermal (PVT) systems: a review with emphasis on environmental issues. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 105, p. 270-287, maio 2017.

LAMNATOU, C.; NOTTON, G.; CHEMISANA, D.; CRISTOFARI, C. Storage systems for building-integrated photovoltaic (BIPV) and building-integrated photovoltaic/thermal (BIPVT) installations: environmental profile and other aspects. **Science of The Total Environment**, [s.l.], v. 699, p. 134269, jan. 2020.

LAMNATOU, C.; SMYTH, M.; CHEMISANA, D. Building-Integrated Photovoltaic/Thermal (BIPVT): Ica of a façade-integrated prototype and issues about human health, ecosystems, resources. **Science of The Total Environment**, [s.l.], v. 660, p. 1576-1592, abr. 2019.

LI, D. D. W.; CHOW, S. K. H.; LEE, E. W. M. An analysis of a medium size grid-connected building integrated photovoltaic (BIPV) system using measured data. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 60, p. 383-387, maio 2013.

LI, D. H. W.; YANG, L.; LAM, J. C. Zero energy buildings and sustainable development implications – A review. **Energy**, [s.l.], v. 54, p. 1-10, jun. 2013.

LI, X.; STREZOV, V. Energy and Greenhouse Gas Emission Assessment of

- Conventional and Solar Assisted Air Conditioning Systems. **Sustainability**, [s.l.], v. 7, n. 11, p. 14710-14728, 3 nov. 2015.
- LU, L.; YANG, H. X. Environmental payback time analysis of a roof-mounted building-integrated photovoltaic (BIPV) system in Hong Kong. **Applied Energy**, [s.l.], v. 87, n. 12, p. 3625-3631, dez. 2010.
- MENDIS, T.; HUANG, Z.; XU, S.; ZHANG, W. Economic potential analysis of photovoltaic integrated shading strategies on commercial building facades in urban blocks: a case study of colombo, sri lanka. **Energy**, [s.l.], v. 194, p. 116908, mar. 2020.
- MENOUEFI, K.; CHEMISANA, D.; ROSELL, J. I. Life Cycle Assessment of a Building Integrated Concentrated Photovoltaic scheme. **Applied Energy**, [s.l.], v. 111, p. 505-514, nov. 2013.
- NG, P. K.; MITHRARATNE, N. Lifetime performance of semi-transparent building-integrated photovoltaic (BIPV) glazing systems in the tropics. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 31, p. 736-745, mar. 2014.
- OH, J.; KOO, C.; HONG, T.; J., K.; LEE, M. An economic impact analysis of residential progressive electricity tariffs in implementing the building-integrated photovoltaic blind using an advanced finite element model. **Applied Energy**, [s.l.], v. 202, p. 259-274, set. 2017.
- OLIVER, M.; JACKSON, T. The evolution of economic and environmental cost for crystalline silicon photovoltaics. **Energy Policy**, [s.l.], v. 28, n. 14, p. 1011-1021, nov. 2000.
- PALACIOS-JAIMES, G. Y.; MARTÍN-RAMOS, P.; REY-MARTÍNEZ, F. J.; FERNÁNDEZ-COPPEL, I. A. Transformation of a University Lecture Hall in Valladolid (Spain) into a NZEB: Ica of a bipv system integrated in its façade. **International Journal of Photoenergy**, [s.l.], v. 2017, p. 1-11, 2017.
- PENG, J.; LU, L. Investigation on the development potential of rooftop PV system in Hong Kong and its environmental benefits. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 27, p. 149-162, nov. 2013.
- RADHI, H. Energy analysis of façade-integrated photovoltaic systems applied to UAE commercial buildings. **Solar Energy**, [s.l.], v. 84, n. 12, p. 2009-2021, dez. 2010.
- RADHI, H. Trade-off between environmental and economic implications of PV systems integrated into the UAE residential sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 16, n. 5, p. 2468-2474, jun. 2012.
- RAMSHANI, M.; LI, X.; KHOJANDI, A.; OMITAOMU, O. An agent-based approach to study the diffusion rate and the effect of policies on joint placement of photovoltaic panels and green roof under climate change uncertainty. **Applied Energy**, [s.l.], v. 261, p. 114402-114418, mar. 2020.
- RITZEN, M. J.; HOUBEN, J. J. M.; ROVERS, R.; VROON, Z. A. E. P; GEURTS, C. P. W. Carrying capacity based environmental impact assessment of Building Integrated Photovoltaics. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, [s.l.], v. 31, p. 212-

220, fev. 2019.

RITZEN, M. J.; VROON, Z. A. E. P.; ROVERS, R.; LUPÍLEK, A.; GEURTS, C. P.W. Environmental impact comparison of a ventilated and a non-ventilated building-integrated photovoltaic rooftop design in the Netherlands: electricity output, energy payback time, and land claim. **Solar Energy**, [s.l.], v. 155, p. 304-313, out. 2017.

ROY, A.; GHOSH, A.; BHANDARI, S.; SELVARAJ, P.; SUNDARAM, S.; MALLICK, T. K. Color Comfort Evaluation of Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC) Based Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) Glazing after 2 Years of Ambient Exposure. **The Journal of Physical Chemistry C**, [s.l.], v. 123, n. 39, p. 23834-23837, 20 ago. 2019.

ROYO, P.; FERREIRA, V. J; LÓPEZ-SABIRÓN, A. M.; FERREIRA, G. Hybrid diagnosis to characterise the energy and environmental enhancement of photovoltaic modules using smart materials. **Energy**, [s.l.], v. 101, p. 174-189, abr. 2016.

SAGANI, A.; MIHELIS, J.; DEDOISSIS, V. Techno-economic analysis and life-cycle environmental impacts of small-scale building-integrated PV systems in Greece. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 139, p. 277-290, mar. 2017.

SCHUETZE, T.; WILLKOMM, W.; ROOS, M. Development of a Holistic Evaluation System for BIPV Façades. **Energies**, [s.l.], v. 8, n. 6, p. 6135-6152, 19 jun. 2015.

SENG, L. Y.; LALCHAND, G.; LIN, G. M. S. Economical, environmental and technical analysis of building integrated photovoltaic systems in Malaysia. **Energy Policy**, [s.l.], v. 36, n. 6, p. 2130-2142, jun. 2008.

SERRANO-LUJÁN, L.; GARCÍA-VALVERDE, R.; ESPINOSA, N. I.; GARCÍA-CASCALES, M. S.; SÁNCHEZ-LOZANO, J. M.; URBINA, A. Environmental benefits of parking-integrated photovoltaics: a 222 kwp experience. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, [s.l.], v. 23, n. 2, p. 253-264, 17 set. 2013.

SHARMA, P.; KOLHE, M.; SHARMA, A. Economic performance assessment of building integrated photovoltaic system with battery energy storage under grid constraints. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 145, p. 1901-1909, jan. 2020.

SHIRAZI, A. M.; ZOMORODIAN, Z. S.; TAHSILDOOST, M. Techno-economic BIPV evaluation method in urban areas. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 143, p. 1235-1246, dez. 2019.

SHUKLA, A. K.; SUDHAKAR, K.; BARENDAR, P.; MAMAT, R. Solar PV and BIPV system: barrier, challenges and policy recommendation in india. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 82, p. 3314-3322, fev. 2018.

SHUKLA, A.; SUDHAKAR, K.; BARENDAR, P. Recent advancement in BIPV product technologies: a review. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 140, p. 188-195, abr. 2017.

SORGATO, M. J.; SCHNEIDER, K.; RÜTHER, R. Technical and economic evaluation of thin-film CdTe building-integrated photovoltaics (BIPV) replacing façade and rooftop materials in office buildings in a warm and sunny climate. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 118, p. 84-98, abr. 2018.

TOBOSO-CHAVERO, S.; NADAL, A.; PETIT-BOIX, A.; PONS, O.; VILLALBA, G.; GABARRELL, Xavier; J., A.; RIERADEVALL, J. Towards Productive Cities: environmental assessment of the food-energy-water nexus of the urban roof mosaic. **Journal of Industrial Ecology**, [s.l.], v. 23, n. 4, p. 767-780, 26 nov. 2018.

TOMAR, V.; TIWARI, G. N. Techno-economic evaluation of grid connected PV system for households with feed in tariff and time of day tariff regulation in New Delhi – A sustainable approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 70, p. 822-835, abr. 2017.

TRIPATHY, M.; JOSHI, H.; PANDA, S. K. Energy payback time and life-cycle cost analysis of building integrated photovoltaic thermal system influenced by adverse effect of shadow. **Applied Energy**, [s.l.], v. 208, p. 376-389, dez. 2017.

TRIPATHY, M.; SADHU, P. K.; PANDA, S. K. A critical review on building integrated photovoltaic products and their applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 61, p. 451-465, ago. 2016.

WANG, W.; LIU, Y.; WU, X.; XU, Y.; YU, W.; ZHAO, C.; ZHONG, Y. Environmental assessments and economic performance of BAPV and BIPV systems in Shanghai. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 130, p. 98-106, out. 2016.

WU, Y.; WEN, M. D.; YOUNG, L.; HSU, I. LCA-Based Economic Benefit Analysis for Building Integrated Photovoltaic (BIPV) Façades: a case study in Taiwan. **International Journal of Green Energy**, [s.l.], v. 15, n. 1, p. 8-12, 18 jul. 2017.

XU, R.; WITTKOPF, S.; ROESKE, C. Quantitative Evaluation of BIPV Visual Impact in Building Retrofits Using Saliency Models. **Energies**, [s.l.], v. 10, n. 5, p. 1-16, 10 maio 2017.

YOO, S. Optimization of a BIPV system to mitigate greenhouse gas and indoor environment. **Solar Energy**, [s.l.], v. 188, p. 875-882, ago. 2019.

ZHANG, T.; WANG, M.; YANG, H. A Review of the Energy Performance and Life-Cycle Assessment of Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) Systems. **Energies**, [s.l.], v. 11, n. 11, p. 3157, 14 nov. 2018.

REFERÊNCIAS

ABDALLAH, T.; DIABAT, A.; RIGTER, J. Investigating the option of installing small scale PVs on facility rooftops in a green supply chain. **International Journal of Production Economics**, [s.l.], v. 146, n. 2, p. 465-477, dez. 2013.

AGRAWAL, B.; TIWARI, G. N. Life cycle cost assessment of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) systems. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 42, n. 9, p. 1472-1481, set. 2010.

ALNASER, N. W.; FLANAGAN, R.; ALNASER, W. E. Model for calculating the sustainable building index (SBI) in the kingdom of Bahrain. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 40, n. 11, p. 2037-2043, jan. 2008.

ALNASER, N.W.; FLANAGAN, R.; ALNASER, W. E. Potential of making—Over to sustainable buildings in the Kingdom of Bahrain. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 40, n. 7, p. 1304-1323, jan. 2008.

ARISTIZÁBAL, A. J.; PÁEZ, C. A. Power quality analysis of 6 kW building-integrated photovoltaic system and economic evaluation using RETScreen™. **International Journal of Ambient Energy**, [s.l.], v. 39, n. 8, p. 813-822, 21 jul. 2017.

ASAE, S. R.; NIKOOFARD, S.; UGURSAL, V. I.; BEAUSOLEIL-MORRISON, I. Techno-economic assessment of photovoltaic (PV) and building integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) system retrofits in the Canadian housing stock. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 152, p. 667-679, out. 2017.

ASDRUBALI, F.; BURATTI, C.; COTANA, F.; BALDINELLI, G.; GORETTI, M.; MORETTI, E.; BALDASSARRI, C.; BELLONI, E.; BIANCHI, F.; ROTILI, A. Evaluation of Green Buildings' Overall Performance through in Situ Monitoring and Simulations. **Energies**, [s.l.], v. 6, n. 12, p. 6525-6547, 17 dez. 2013.

AZEVEDO, R. de O.; ROTELA JUNIOR, P.; ROCHA, L. C. S.; CHICCO, G.; AQUILA, G.; PERUCHI, R. S. Identification and Analysis of Impact Factors on the Economic Feasibility of Photovoltaic Energy Investments. **Sustainability**, [s.l.], v. 12, n. 17, p. 7173-7213, 2 set. 2020.

BEZERRA, M. C. da C.; GOHR, C. F.; MORIOKA, S. N. Organizational capabilities towards corporate sustainability benefits: a systematic literature review and an integrative framework proposal. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 247, p. 119114-119132, fev. 2020.

BONOMO, P.; FRONTINI, F.; BERARDINIS, P. D.; DONSANTE, I. BIPV: building envelope solutions in a multi-criteria approach. A method for assessing life-cycle costs in the early design phase. **Advances in Building Energy Research**, [s.l.], v. 11, n. 1, p. 104-129, 30 mar. 2016.

CALISE, F.; CAPPIELLO, F. L.; D'ACCADIA, M. D.; VICIDOMINI, M. Dynamic simulation, energy and economic comparison between BIPV and BIPVT collectors coupled with micro-wind turbines. **Energy**, [s.l.], v. 191, p. 116439-116484, jan. 2020.

CARSTENS, D. D. dos S.; CUNHA, S. K. da. Challenges and opportunities for the growth of solar photovoltaic energy in Brazil. **Energy Policy**, [s.l.], v. 125, p. 396-404, fev. 2019.

CASTALDO, V. L.; PIGLIAUTILE, I.; ROSSO, F.; COTANA, F.; GIORGIO, F. de; PISELLO, A. L. How subjective and non-physical parameters affect occupants' environmental comfort perception. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 178, p. 107-129, nov. 2018.

CHEL, A.; TIWARI, G. N.; CHANDRA, A. Simplified method of sizing and life cycle cost assessment of building integrated photovoltaic system. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 41, n. 11, p. 1172-1180, nov. 2009.

CRAWFORD, R. H; TRELOAR, G. J.; FULLER, R. J.; BAZILIAN, M. Life-cycle energy analysis of building integrated photovoltaic systems (BiPVs) with heat recovery unit. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 10, n. 6, p. 559-575, dez. 2006.

CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; GASTALDI, M.; KOH, S.C. Lenny. Renewable energy options for buildings: performance evaluations of integrated photovoltaic systems. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 55, p. 208-217, dez. 2012.

CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; KOH, S. C. L. Environmental and economic analysis of building integrated photovoltaic systems in Italian regions. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 98, p. 241-252, jul. 2015.

DEHKORDI, E. R.; KARIMI, A.; KARIMI, R.; BEYGI, M. A. Sustainable design for airport terminals, by integrated photovoltaic (PV) system (adopting bench-marking approach). **International Journal of Green Energy**, [s.l.], v. 16, n. 15, p. 1611-1616, 19 out. 2019.

EVOLA, G.; MARGANI, G. Renovation of apartment blocks with BIPV: energy and economic evaluation in temperate climate. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 130, p. 794-810, out. 2016.

FARGHALY, Y.; HASSAN, F. A Simulated Study of Building Integrated Photovoltaics (BIPV) as an Approach for Energy Retrofit in Buildings. **Energies**, [s.l.], v. 12, n. 20, p. 3946, 17 out. 2019.

GHOLAMI, H.; RØSTVIK, H. N.; MÜLLER-EIE, D. Holistic economic analysis of building integrated photovoltaics (BIPV) system: case studies evaluation. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 203, p. 109461-109472, nov. 2019.

GHOSH, A.; SARMAH, N.; SUNDARAM, S.; MALLICK, T. K. Numerical studies of thermal comfort for semi-transparent building integrated photovoltaic (BIPV)-vacuum glazing system. **Solar Energy**, [s.l.], v. 190, p. 608-616, set. 2019.

GOOGLE. **Google Earth Pro**. 2019. Disponível em: <https://www.google.com.br/earth/download/gep/agree.html>. Acesso em: 10 maio 2020.

GUPTA, N.; TIWARI, G. N. Energy Matrices of Building Integrated Photovoltaic Thermal Systems: case study. **Journal of Architectural Engineering**, [s.l.], v. 23, n. 4, p. 05017006, dez. 2017.

HAM-BALOYI, W. T.; JORDAN, P. Systematic review as a research method in post-graduate nursing education. **Health SA Gesondheid**, [s.l.], v. 21, p. 120-128, dez. 2016.

HAMMOND, G. P.; HARAJLI, H. A.; JONES, C. I.; WINNETT, A. B. Integrated appraisal of a building integrated photovoltaic (BIPV) system. **International Conference on Sustainable Power Generation and Supply**, [s.l.], p. 1-9, abr. 2009.

HONG, T.; KOO, C.; OH, J.; JEONG, K. Nonlinearity analysis of the shading effect on the technical-economic performance of the building-integrated photovoltaic blind. **Applied Energy**, [s.l.], v. 194, p. 467-480, maio 2017.

IRSHAD, K.; HABIB, K.; ALGARNI, S.; SAHA, B. B.; JAMIL, B. Sizing and life-cycle assessment of building integrated thermoelectric air cooling and photovoltaic wall system. **Applied Thermal Engineering**, [s.l.], v. 154, p. 302-314, maio 2019.

JAHANFAR, A.; SLEEP, B.; DRAKE, J. Energy and Carbon-Emission Analysis of Integrated Green-Roof Photovoltaic Systems: probabilistic approach. **Journal of Infrastructure Systems**, [s.l.], v. 24, n. 1, p. 04017044, mar. 2018.

KELLY, C.; SEN, B.; TATARI, O. A system dynamics analysis of the alternative roofing market and its potential impacts on urban environmental problems: a case study in orlando, florida. **Resources, Conservation and Recycling**, [s.l.], v. 153, p. 104556-104570, fev. 2020.

KEOLEIAN, G. A.; LEWIS, G. M. Modeling the life cycle energy and environmental performance of amorphous silicon BIPV roofing in the US. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 28, n. 2, p. 271-293, fev. 2003.

KITTNER, N.; GHEEWALA, S. H.; KAMENS, R. M. An environmental life cycle comparison of single-crystalline and amorphous-silicon thin-film photovoltaic systems in Thailand. **Energy for Sustainable Development**, [s.l.], v. 17, n. 6, p. 605-614, dez. 2013.

KOURKOUMPAS, D.; BENEKOS, G.; NIKOLOPOULOS, N.; KARELLAS, S.; GRAMMELIS, P.; KAKARAS, E. A review of key environmental and energy performance indicators for the case of renewable energy systems when integrated with storage solutions. **Applied Energy**, [s.l.], v. 231, p. 380-398, dez. 2018.

KRISTJANSDOTTIR, T. F.; GOOD, C. S.; INMAN, M. R.; SCHLANBUSCH, R. D.; ANDRESEN, I. Embodied greenhouse gas emissions from PV systems in Norwegian residential Zero Emission Pilot Buildings. **Solar Energy**, [s.l.], v. 133, p. 155-171, ago. 2016.

LAMNATOU, C.; BAIG, H.; CHEMISANA, D.; MALLICK, T. K. Dielectric-based 3D building-integrated concentrating photovoltaic modules: an environmental life-cycle assessment. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 138, p. 514-525, mar. 2017.

LAMNATOU, C.; BAIG, H.; CHEMISANA, D.; MALLICK, T. k. Environmental assessment of a building-integrated linear dielectric-based concentrating photovoltaic according to multiple life-cycle indicators. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 131, p. 773-784, set. 2016.

LAMNATOU, C.; BAIG, H.; CHEMISANA, D.; MALLICK, T. K. Life cycle energy analysis and embodied carbon of a linear dielectric-based concentrating photovoltaic appropriate for building-integrated applications. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 107, p. 366-375, nov. 2015.

LAMNATOU, C.; CHEMISANA, D. Photovoltaic/thermal (PVT) systems: a review with emphasis on environmental issues. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 105, p. 270-287, maio 2017.

LAMNATOU, C.; NOTTON, G.; CHEMISANA, D.; CRISTOFARI, C. Storage systems for building-integrated photovoltaic (BIPV) and building-integrated photovoltaic/thermal (BIPVT) installations: environmental profile and other aspects. **Science of The Total Environment**, [s.l.], v. 699, p. 134269, jan. 2020.

LAMNATOU, C.; SMYTH, M.; CHEMISANA, D. Building-Integrated Photovoltaic/Thermal (BIPVT): Ica of a façade-integrated prototype and issues about human health, ecosystems, resources. **Science of The Total Environment**, [s.l.], v. 660, p. 1576-1592, abr. 2019.

LEVY, Y.; ELLIS, T. J. A system approach to conduct na effective literature review in suport of information systems research. **Informing Science Journal**, v. 9, p. 181-212, 2006.

LI, D. D. W.; CHOW, S. K. H.; LEE, E. W. M. An analysis of a medium size grid-connected building integrated photovoltaic (BIPV) system using measured data. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 60, p. 383-387, maio 2013.

LI, D. H. W.; YANG, L.; LAM, J. C. Zero energy buildings and sustainable development implications – A review. **Energy**, [s.l.], v. 54, p. 1-10, jun. 2013.

LI, H.; AN, H.; WANG, Y.; HUANG, J.; GAO, X. Evolutionary features of academic articles co-keyword network and keywords co-occurrence network: based on two-mode affiliation network. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, [s.l.], v. 450, p. 657-669, maio 2016.

LI, T.; ROSKILLY, A. P.; WANG, Y. Life cycle sustainability assessment of grid-connected photovoltaic power generation: a case study of northeast england. **Applied Energy**, [s.l.], v. 227, p. 465-479, out. 2018.

LI, X.; STREZOV, V. Energy and Greenhouse Gas Emission Assessment of Conventional and Solar Assisted Air Conditioning Systems. **Sustainability**, [s.l.], v. 7, n. 11, p. 14710-14728, 3 nov. 2015.

LU, L.; YANG, H. X. Environmental payback time analysis of a roof-mounted building-integrated photovoltaic (BIPV) system in Hong Kong. **Applied Energy**, [s.l.], v. 87, n.

12, p. 3625-3631, dez. 2010.

MENDIS, T.; HUANG, Z.; XU, S.; ZHANG, W. Economic potential analysis of photovoltaic integrated shading strategies on commercial building facades in urban blocks: a case study of colombo, sri lanka. **Energy**, [s.l.], v. 194, p. 116908, mar. 2020.

MENOUI, K.; CHEMISANA, D.; ROSELL, J. I. Life Cycle Assessment of a Building Integrated Concentrated Photovoltaic scheme. **Applied Energy**, [s.l.], v. 111, p. 505-514, nov. 2013.

MONTOYA, F. G.; BAÑOS, R.; MEROÑO, J. E.; MANZANO-AGUGLIARO, F. The research of water use in Spain. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 112, p. 4719-4732, jan. 2016.

NG, P. K.; MITHRARATNE, N. Lifetime performance of semi-transparent building-integrated photovoltaic (BIPV) glazing systems in the tropics. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 31, p. 736-745, mar. 2014.

OH, J.; KOO, C.; HONG, T.; J., K.; LEE, M. An economic impact analysis of residential progressive electricity tariffs in implementing the building-integrated photovoltaic blind using an advanced finite element model. **Applied Energy**, [s.l.], v. 202, p. 259-274, set. 2017.

OLIVER, M.; JACKSON, T. The evolution of economic and environmental cost for crystalline silicon photovoltaics. **Energy Policy**, [s.l.], v. 28, n. 14, p. 1011-1021, nov. 2000.

PALACIOS-JAIMES, G. Y.; MARTÍN-RAMOS, P.; REY-MARTÍNEZ, F. J.; FERNÁNDEZ-COPPEL, I. A. Transformation of a University Lecture Hall in Valladolid (Spain) into a NZEB: lca of a bipv system integrated in its façade. **International Journal of Photoenergy**, [s.l.], v. 2017, p. 1-11, 2017.

PATTERSON, T.; KELSO, N. V. **Natural Earth raster + vector map data**. 2020. Disponível em: <https://www.naturalearthdata.com/downloads/10m-cultural-vectors/10m-admin-0-countries/>. Acesso em: 11 maio 2020.

PENG, J.; LU, L. Investigation on the development potential of rooftop PV system in Hong Kong and its environmental benefits. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 27, p. 149-162, nov. 2013.

QGIS. **QGIS**. 2020. Disponível em: <https://qgis.org/en/site/>. Acesso em: 10 maio 2020.

RADHI, H. Energy analysis of façade-integrated photovoltaic systems applied to UAE commercial buildings. **Solar Energy**, [s.l.], v. 84, n. 12, p. 2009-2021, dez. 2010.

RADHI, H. Trade-off between environmental and economic implications of PV systems integrated into the UAE residential sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 16, n. 5, p. 2468-2474, jun. 2012.

RAMSHANI, M.; LI, X.; KHOJANDI, A.; OMITAOMU, O. An agent-based approach

to study the diffusion rate and the effect of policies on joint placement of photovoltaic panels and green roof under climate change uncertainty. **Applied Energy**, [s.l.], v. 261, p. 114402-114418, mar. 2020.

RITZEN, M. J.; HOUBEN, J. J. M.; ROVERS, R.; VROON, Z. A. E. P.; GEURTS, C. P. W. Carrying capacity based environmental impact assessment of Building Integrated Photovoltaics. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, [s.l.], v. 31, p. 212-220, fev. 2019.

RITZEN, M. J.; VROON, Z. A. E. P.; ROVERS, R.; LUPÍLEK, A.; GEURTS, C. P. W. Environmental impact comparison of a ventilated and a non-ventilated building-integrated photovoltaic rooftop design in the Netherlands: electricity output, energy payback time, and land claim. **Solar Energy**, [s.l.], v. 155, p. 304-313, out. 2017.

ROY, A.; GHOSH, A.; BHANDARI, S.; SELVARAJ, P.; SUNDARAM, S.; MALLICK, T. K. Color Comfort Evaluation of Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC) Based Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) Glazing after 2 Years of Ambient Exposure. **The Journal of Physical Chemistry C**, [s.l.], v. 123, n. 39, p. 23834-23837, 20 ago. 2019.

ROYO, P.; FERREIRA, V. J.; LÓPEZ-SABIRÓN, A. M.; FERREIRA, G. Hybrid diagnosis to characterise the energy and environmental enhancement of photovoltaic modules using smart materials. **Energy**, [s.l.], v. 101, p. 174-189, abr. 2016.

SAGANI, A.; MIHELIS, J.; DEDOISSIS, V. Techno-economic analysis and life-cycle environmental impacts of small-scale building-integrated PV systems in Greece. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 139, p. 277-290, mar. 2017.

SCHUETZE, T.; WILLKOMM, W.; ROOS, M. Development of a Holistic Evaluation System for BIPV Façades. **Energies**, [s.l.], v. 8, n. 6, p. 6135-6152, 19 jun. 2015.

SENG, L. Y.; LALCHAND, G.; LIN, G. M. S. Economical, environmental and technical analysis of building integrated photovoltaic systems in Malaysia. **Energy Policy**, [s.l.], v. 36, n. 6, p. 2130-2142, jun. 2008.

SERRANO-LUJÁN, L.; GARCÍA-VALVERDE, R.; ESPINOSA, N. I.; GARCÍA-CASCALES, M. S.; SÁNCHEZ-LOZANO, J. M.; URBINA, A. Environmental benefits of parking-integrated photovoltaics: a 222 kwp experience. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, [s.l.], v. 23, n. 2, p. 253-264, 17 set. 2013.

SHARMA, P.; KOLHE, M.; SHARMA, A. Economic performance assessment of building integrated photovoltaic system with battery energy storage under grid constraints. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 145, p. 1901-1909, jan. 2020.

SHIRAZI, A. M.; ZOMORODIAN, Z. S.; TAHSILDOOST, M. Techno-economic BIPV evaluation method in urban areas. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 143, p. 1235-1246, dez. 2019.

SHUKLA, A. K.; SUDHAKAR, K.; BAREDAR, P.; MAMAT, R. Solar PV and BIPV system: barrier, challenges and policy recommendation in india. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 82, p. 3314-3322, fev. 2018.

SHUKLA, A.; SUDHAKAR, K.; BARENDAR, P. Recent advancement in BIPV product technologies: a review. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 140, p. 188-195, abr. 2017.

SORGATO, M. J.; SCHNEIDER, K.; RÜTHER, R. Technical and economic evaluation of thin-film CdTe building-integrated photovoltaics (BIPV) replacing façade and rooftop materials in office buildings in a warm and sunny climate. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 118, p. 84-98, abr. 2018.

TOBOSO-CHAVERO, S.; NADAL, A.; PETIT-BOIX, A.; PONS, O.; VILLALBA, G.; GABARRELL, Xavier; J., A.; RIERADEVALL, J. Towards Productive Cities: environmental assessment of the food-energy-water nexus of the urban roof mosaic. **Journal of Industrial Ecology**, [s.l.], v. 23, n. 4, p. 767-780, 26 nov. 2018.

TOMAR, V.; TIWARI, G. N. Techno-economic evaluation of grid connected PV system for households with feed in tariff and time of day tariff regulation in New Delhi – A sustainable approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 70, p. 822-835, abr. 2017.

TRIPATHY, M.; JOSHI, H.; PANDA, S. K. Energy payback time and life-cycle cost analysis of building integrated photovoltaic thermal system influenced by adverse effect of shadow. **Applied Energy**, [s.l.], v. 208, p. 376-389, dez. 2017.

TRIPATHY, M.; SADHU, P. K.; PANDA, S. K. A critical review on building integrated photovoltaic products and their applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 61, p. 451-465, ago. 2016.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Leiden University's Centre for Science and Technology Studies. **VOSviewer**. 2020. Disponível em: <https://www.vosviewer.com/>. Acesso em: 13 abr. 2020.

WANG, W.; LIU, Y.; WU, X.; XU, Y.; YU, W.; ZHAO, C.; ZHONG, Y. Environmental assessments and economic performance of BAPV and BIPV systems in Shanghai. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 130, p. 98-106, out. 2016.

WU, Y.; WEN, M. D.; YOUNG, L.; HSU, I. LCA-Based Economic Benefit Analysis for Building Integrated Photovoltaic (BIPV) Façades: a case study in taiwan. **International Journal of Green Energy**, [s.l.], v. 15, n. 1, p. 8-12, 18 jul. 2017.

XU, R.; WITTKOPF, S.; ROESKE, C. Quantitative Evaluation of BIPV Visual Impact in Building Retrofits Using Saliency Models. **Energies**, [s.l.], v. 10, n. 5, p. 1-16, 10 maio 2017.

YOO, S. Optimization of a BIPV system to mitigate greenhouse gas and indoor environment. **Solar Energy**, [s.l.], v. 188, p. 875-882, ago. 2019.

ZHANG, T.; WANG, M.; YANG, H. A Review of the Energy Performance and Life-Cycle Assessment of Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) Systems. **Energies**, [s.l.], v. 11, n. 11, p. 3157, 14 nov. 2018.

CAPÍTULO 3

ARTIGO: VIABILIDADE ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO FOTOVOLTAICA CONVENCIONAL E BIPV NO BRASIL

3.1 INTRODUÇÃO

A dependência da sociedade em relação aos recursos não renováveis é refletida na flutuação do preço do petróleo, ao tempo em que as empresas consideram qualquer aumento como ameaça à lucratividade. Entretanto, os efeitos do aquecimento global fizeram a sociedade repensar e ter consciência dos impactos da priorização do modelo de desenvolvimento e estilo de vida econômico presenciado nas últimas décadas. O arcabouço teórico bibliográfico e posicionamentos de especialistas fornecem *insights* que melhoram a compreensão da necessidade de um desenvolvimento sustentável frente ao esgotamento dos recursos naturais (SCHILLING; CHIANG, 2011).

A disponibilidade energética mundial limitará e moldará o destino das civilizações futuras. Apesar do enfrentamento de sérios problemas ambientais e de crise energética, o consumo de energia primária mundial de 5.508,80 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep) em 1970 sofreu um incremento de 7.676,68 Mtep até 2018, quando atingiu a marca de 13.185,48 Mtep, advindos principalmente dos combustíveis fósseis (BP-BRITISH PETROLEUM, 2019). Com a tendência de aumento contínuo do consumo energético, o uso de combustíveis fósseis é amplamente determinado como insustentável devido à perspectiva de esgotamento do recurso e ao incremento na concentração de gases do efeito estufa na atmosfera (ZHANG *et al.*, 2012).

De acordo com Schilling e Chiang (2011), a transição do emprego dos recursos não renováveis por recursos sustentáveis apresenta restrições técnicas que impedem a sua mudança gradual. Entre os obstáculos existe o aumento de custo considerável do fornecimento de energia para suprimento de todos os processos econômicos. No entanto, o progresso tecnológico torna viável a implantação de outras formas de obtenção de energia, como o emprego de células solares continuamente mais baratas (SCHILLING; CHIANG, 2011). A participação das fontes renováveis nas matrizes energéticas é favorecida devido ao incremento na geração hidráulica, solar e eólica, aumento da oferta de lixo e biodiesel, redução da oferta de petróleo e derivados e redução da oferta de gás natural, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2019).

Para Yue e Huang (2011), as fontes renováveis de energia possuem um duplo papel em seu significado vital, o de mitigar o aquecimento global e o de garantir a segurança energética ao longo dos anos. A energia solar, como exemplo, é amplamente difundida, considerada uma importante fonte de energia renovável e trará grandes contribuições para a sociedade a longo prazo, tais como a segurança do suprimento de energia e a proteção do meio ambiente. A geração distribuída de energia solar fotovoltaica

(PV) e o aquecimento solar de água se apresentam como benefícios do ponto de vista da segurança energética (YUE; HUANG, 2011).

O potencial tecnológico da energia PV integra a solução de problemas energéticos, com interesses sociais, ambientais e princípios econômicos. O Brasil é considerado um local ideal para a produção de energia solar em decorrência de vários fatores climáticos e geográficos. Atrelado a esses fatores, os custos de instalação dos equipamentos diminuem rapidamente, o que incentiva e proporciona o melhor aproveitamento energético (ECHEGARAY, 2014). A geração elétrica solar brasileira em 2018 foi de 3.461 GWh, representando um aumento de 316,1% com relação ao ano anterior. A capacidade instalada em 2017 foi de 935 MW, enquanto em 2018 houve um acréscimo de 92,2%, atingindo 1.798 MW (EPE, 2019).

A geração distribuída é qualquer tecnologia de geração elétrica em pequena escala que gera eletricidade em um local que é mais perto dos clientes com relação a geração da estação central e geralmente é interconectada ao sistema de distribuição ou diretamente nas instalações do cliente (CORRIA; COBAS; LORA, 2006). Portanto, nesse cenário de evolução, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2012) disponibilizou a Resolução Normativa 482/2012, que regulamenta os critérios para aplicação de geração distribuída, por meio de micro e mini geração, como forma de introduzir mecanismos de fonte de energia renovável na matriz energética brasileira.

Esta Resolução atua no Brasil atua por meio do sistema de compensação de energia consumida, denominado *net metering*, que consiste na medição do fluxo energético da unidade consumidora de pequena geração, através de medidores bidirecionais. Além de ser um requisito de segurança do sistema, essa normatização incentiva a incorporação de fontes de energia renovável na matriz energética brasileira (CARVALHO; ABREU; CORREIA NETO, 2017).

A tecnologia PV tem sua inserção prejudicada devido ao alto investimento inicial, entretanto, na primeira década do século XXI o preço caiu entre 3 e 5 U\$/Wp para compradores de pequeno porte e entre 2 e 4 U\$/Wp para compradores de grande porte (YUE; HUANG, 2011). O impacto da redução do custo de financiamento e da carga tributária nos investimentos em micro geração está diretamente relacionado ao clima e as condições econômicas específicas dos consumidores de cada Unidade Federativa. No Brasil, o investimento para aquisição de equipamentos PV são, em média, 32,5% maiores que nos outros países, consequência da incidência de impostos como IPI, ICMS, PIS e Cofins (CARVALHO; ABREU; CORREIA NETO, 2017).

Diante disso, a geração de eletricidade verde em pequena escala se tornou o foco de estudo de alguns pesquisadores. A análise de sua viabilidade econômica ampara a tomada de decisão por parte dos investidores, pois o objetivo de qualquer sistema de geração elétrica é alcançar um fluxo de caixa positivo (ROCHA *et al.*, 2017). O desenvolvimento de simulações de taxa de desempenho dos modelos e ferramentas PV é fundamental para a tomada de decisões econômicas.

A conexão entre desempenho e lucratividade do sistema PV é influenciada pelo investimento inicial, pelos processos de manutenção, além de diversos outros fatores (BIANCHINI *et al.*, 2016). A sua rentabilidade é avaliada não apenas pelos custos e receitas, mas também pelas suas particularidades climáticas (CUI *et al.*, 2020).

O objetivo desse trabalho foi analisar modelos determinísticos e estocásticos de investimentos em dois modelos de sistemas fotovoltaicos, um incorporado à arquitetura do empreendimento (*Building Integrated Photovoltaic – BIPV*), e um convencional, em diferentes localidades brasileiras, abrangendo os fatores climáticos predominantes no País.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Localidades e objeto de estudo

A área de estudo principal deste trabalho é o Complexo Turístico Serrote do Jatobá (CTSJ), uma obra da prefeitura municipal localizada na Zona Rural de Pau dos Ferros, estado do Rio Grande do Norte, Brasil, com uma área total de 247.987 m² e 78.024 m² de área construída. A localização do CTSJ é apresentada na Figura 3.1.

Os sistemas fotovoltaicos propostos serão alocados na cobertura do estacionamento do CTSJ e ambos foram projetados para atender a demanda energética de 386 kWh/dia. O sistema BIPV é utilizado como elemento construtivo, substituindo o telhado da estrutura por painéis fotovoltaicos semitransparentes e sem molduras. Este trabalho não considera a economia com o material de construção no caso do BIPV.

Para a seleção das localidades a serem comparadas com o objeto principal, foi utilizado como critério a classificação climática de Köppen-Geiger (1936), que se baseia na distinção entre os tipos climáticos considerando a vegetação característica das localidades, além de dados de temperatura e pluviosidade (KOTTEK *et al.*, 2006).

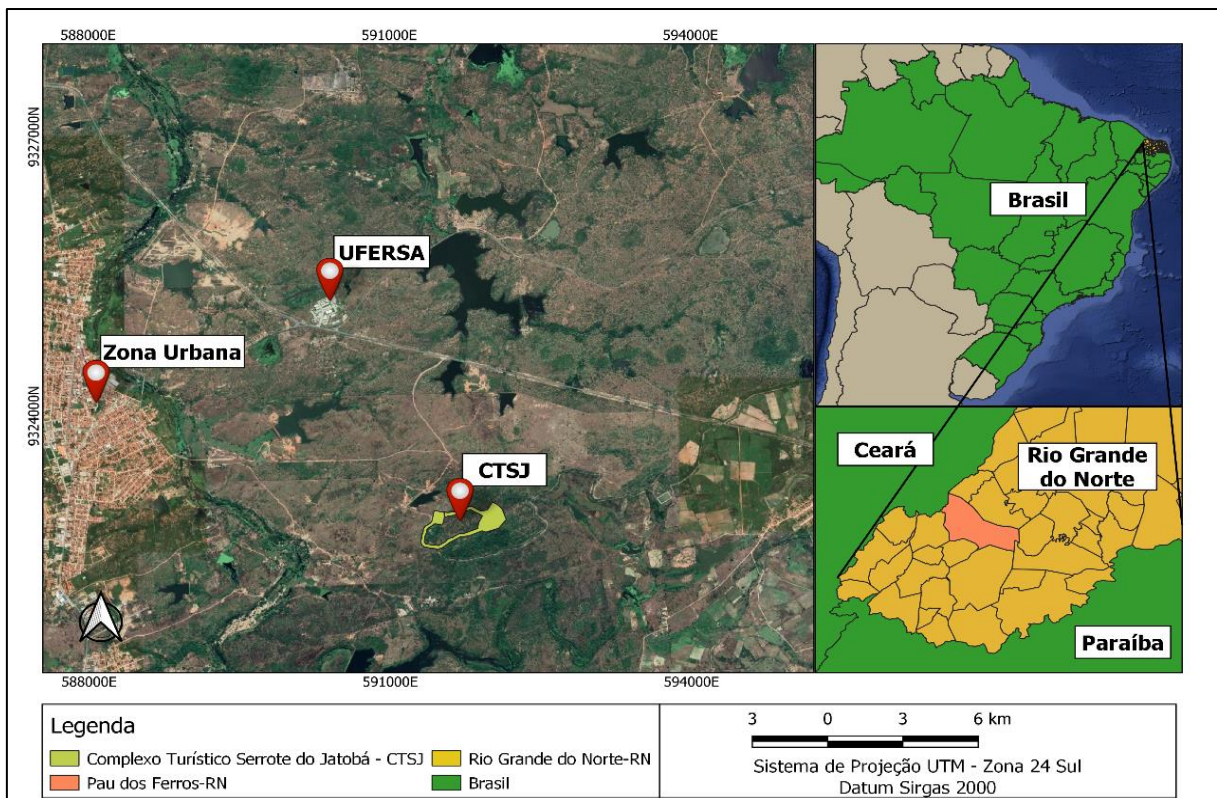


Figura 3.1: Mapa de localização de Pau dos Ferros-RN e do Complexo Turístico Serrote do Jatobá (CTSJ).

Fonte: Autores (2021).

No Brasil, é possível encontrar três grandes tipos climáticos de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger: Tropical (A) em 81,4% do território, B (Seco) em 4,9% e C (Temperado) em 13,7%. Para melhor especificidade, os símbolos dos tipos climáticos específicos são seguidos de dois ou três caracteres, que representam a distribuição da chuva e variação sazonal de temperatura, respectivamente (ALVARES *et al.*, 2013).

Para o presente estudo, escolheu-se uma cidade para cada tipo climático específico no Brasil, atentando-se aos índices de irradiância solar média e aos valores médios mensais de insolação. As informações das localizações escolhidas estão descritas nas Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3 e representadas na Figura 3.2.

Tabela 3.1: Classificação das cidades analisadas de acordo com os tipos climáticos de Köppen-Geiger.

Cidade	Tipo Climático	Denominação
Manaus-AM	Af	Clima equatorial
Aracaju-SE	Am	Clima de monção
Pau dos Ferros-RN	As	Clima tropical com estação seca
Ouricuri-PE	BSh	Clima semiárido
Bagé-RS	Cfa	Clima subtropical úmido
Irati-PR	Cfb	Clima oceânico variante temperada
São Simão-SP	Cwa	Clima subtropical úmido com invernos secos
São Thomé das Letras-MG	Cwb	Clima oceânico variante subtropical de altitude

Fonte: Autores (2021), adaptado de IBGE (2018) e Alvares *et al.* (2013).

Tabela 3.2: Valores de irradiância (kWh/m².dia) nas cidades analisadas.

Cidade	Irradiância (kWh/m ² .dia)												Média
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	
Manaus-AM	4,0	4,0	4,0	3,8	3,9	4,4	4,4	4,9	4,9	4,8	4,6	4,1	4,3
Aracaju-SE	6,3	6,4	6,1	5,1	4,4	4,1	4,2	4,8	5,6	6,1	6,4	6,5	5,5
Pau dos Ferros-RN	5,9	6,0	6,0	5,7	5,3	5,0	5,4	5,1	6,4	6,6	6,6	6,1	5,8
Ouricuri-PE	5,9	5,6	5,8	5,2	4,7	4,4	4,6	5,6	6,3	6,4	6,5	6,2	5,6
Bagé-RS	6,5	5,9	5,0	3,8	2,7	2,3	2,6	3,2	3,8	5,2	6,4	7,0	4,5
Irati-PR	5,5	5,3	4,6	3,8	3,1	2,7	2,9	4,0	4,1	4,6	5,6	5,7	4,3
São Simão-SP	5,6	5,9	5,1	4,8	4,1	3,8	4,0	4,9	5,0	5,5	5,6	6,0	5,0
São Thomé das Letras-MG	5,4	5,6	4,9	4,5	3,9	3,7	3,9	4,8	5,0	5,4	5,2	5,6	4,8

Fonte: (TIBA *et al.*, 2000; PEREIRA *et al.*, 2017).

Tabela 3.3: Horas de insolação mensal média nas cidades analisadas.

Cidade	Horas de Sol Pleno Mensal												Média
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	
Manaus-AM	124,7	79,7	135,4	113,2	126,9	181,8	224,1	228,2	197,9	162,3	119,2	114,7	150,7
Aracaju-SE	285,6	250,3	224,1	220,5	212,2	136,7	155,5	234,6	244,3	270,3	298,9	316,5	237,5
Pau dos Ferros-RN	292,9	199,3	206,9	237,0	275,3	240,7	215,8	275,2	316,0	307,7	316,3	294,3	264,8
Ouricuri-PE	255,0	192,2	220,3	225,8	240,8	166,3	151,6	260,6	276,3	309,2	281,8	295,7	239,6
Bagé-RS	176,0	226,7	215,9	171,2	107,2	152,6	165,2	188,9	232,3	164,2	241,8	278,5	193,4
Irati-PR	172,0	122,7	139,0	109,3	83,3	168,2	187,7	177,8	146,5	171,6	162,4	177,7	151,5
São Simão-SP	227,1	151,4	204,7	221,2	208,4	244,5	240,3	216,0	221,9	244,3	187,2	158,9	210,5
São Thomé das Letras-MG	198,4	169,7	186,6	228,3	198,1	237,7	268,7	225,4	245,8	246,8	149,3	149,0	208,7

Fonte: (INMET, 2019).



Figura 3.2: Mapa de localização das cidades analisadas, no Brasil.

Fonte: Autores (2021), adaptado de IBGE (2018) e Alvares *et al.* (2013).

As cidades estudadas abrangem os tipos climáticos predominantes no Brasil, conforme descrito na Tabela 3.1. As informações das Tabelas 3.2 e 3.3 são resultantes da compilação de dados do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2019), do Atlas Solarimétrico do Brasil (TIBA *et al.*, 2000) e do Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA *et al.*, 2017).

3.2.2 Projeto de sistema PV

Os parâmetros de desempenho de um sistema PV são influenciados principalmente pelo nível de intensidade luminosa do ambiente e pela temperatura do ar (CUCE; CUCE; BALI, 2013). Dessa forma, torna-se essencial o planejamento técnico e econômico para avaliar a energia resultante, atento à variação dos *inputs* que afetam a produção energética. A avaliação da eletricidade produzida é obtida a partir da Equação 3.1.

$$P = \eta \times I_m \times A \quad (3.1)$$

onde P representa a capacidade de geração em kW; η é a eficiência do módulo PV determinado; I_m representa a irradiância horizontal local diária média (kW/m²), calculada com base na irradiância solar local e insolação diária; e A é a área do módulo (m²).

Para quantificar a energia produzida pelo sistema PV, faz-se necessário o cálculo do produto da potência a ser gerada na Equação 3.1 pela quantidade de horas de insolação em um período de tempo, levando em consideração as perdas ocorrentes, tais como: acúmulo de poeira e sujeira na superfície dos módulos, sombreamento, perdas nos inversores e cabeamento, e redução da eficiência pela exposição a altas temperaturas (FOUAD; SHIHATA; MORGAN, 2017). Foi considerada uma taxa de desempenho (ρ) de 81%, semelhante a definida por Elibol *et al.* (2017). A Equação 3.2 define essa quantificação.

$$E = P \times h \times \rho \quad (3.2)$$

em que E é a quantidade de eletricidade produzida (kWh); P é a capacidade de geração de eletricidade (kW) definida pela Eq. 3.1, e h é o tempo de insolação (horas de sol pleno).

Os valores de E obtidos na Equação 3.2 foram ajustados (E_{aj}) na Equação 3.3, a uma taxa de degradação (φ) de 1% (AZEVEDO *et al.*, 2020), considerando a vida útil do equipamento (n).

$$E_{aj} = AEP(1 - \varphi)^n \quad (kWh) \quad (3.3)$$

Neste trabalho, para a análise da viabilidade econômica, foram consideradas probabilidades relacionadas à produção de elétrica PV, esperando-se que as condições de níveis de irradiância, insolação diária anual, tarifas de eletricidade e características dos equipamentos tenham papel de destaque para a produção energética.

3.2.3 Análise econômica

A avaliação de viabilidade econômica serve de auxílio na tomada de decisão

quanto a exequibilidade de um investimento. Dentre os métodos mais comuns para analisar demonstrações financeiras, existe o valor presente líquido (VPL), que se baseia nas previsões de fluxos de caixa em casos base (YE; TIONG, 2000).

O VPL é calculado pela subtração das saídas do caixa pelas entradas, quando todo o fluxo é trazido ao valor da moeda no tempo presente, através da aplicação da taxa de desconto fixa. O retorno de VPL negativo demonstra a incapacidade de recuperação do custo da aquisição, enquanto o VPL positivo indica a viabilidade do investimento (FARIAS-ROCHA *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2019). O VPL pode ser obtido a partir da Equação 3.4.

$$\sum_{t=0}^n \frac{VF}{(1+r)^t} - investimento \quad (3.4)$$

onde VF representa o fluxo de caixa líquido em um tempo futuro; t significa o tempo em anos e r é a taxa de desconto.

Entretanto, a presença de incertezas no fluxo de caixa representa fatores de risco ao resultado do VPL e é preocupante do ponto de vista do consumidor, que casualmente não está preparado para enfrentar o efeito econômico. Muitas variáveis envolvidas no processo, incluindo valores referentes ao sistema de produção, taxas de juros, custo do projeto após incentivos e tarifas de eletricidade, que muitas vezes são utilizadas em projetos assumindo valores constantes, representam na verdade, estimativas que, a depender da sua precisão, pode quantificar com um grau limitado de certeza o VPL (MANGIERO; KRATEN, 2017)

Já através de simulações é possível acomodar os riscos e incertezas quantitativamente na avaliação do investimento, onde o método de Monte Carlo é um dos mais aplicáveis. Ele se baseia na repetida iteração de números aleatórios para obtenção de previsões específicas de modelos probabilísticos para resolução de problemas, como o caso da viabilidade financeira do projeto considerando os riscos e incertezas atrelados. Nas etapas de simulação é definido um modelo quantitativo referente ao investimento, atendendo todas as informações relevantes das variáveis através de um modelo estatístico. Em seguida, estima-se as funções de densidade probabilística (FDP) de cada variável de entrada e a partir dos resultados obtidos é realizada a análise e interpretação da simulação (ZAMAN; PRIYANTA; TRISILO, 2017).

Para consideração viável do investimento do projeto, o VPL deve ser maior que zero, dessa forma, a caracterização da probabilidade de viabilidade é obtida em função da

Equação 3.5.

$$P_{VPL>0}(x_1 \dots x_n; r) = \int_0^{+\infty} FDP(\widetilde{VPL})d\widetilde{VPL} \quad (3.5)$$

onde $P_{VPL>0}$ representa a probabilidade acumulada de VPLs positivos no projeto; $FDP(\widetilde{VPL})$ indica o FDP dos VPLs no projeto (\widetilde{VPL}); e x_i , as variáveis aleatórias do projeto.

Para a estimativa da taxa de retorno do investimento aos consumidores, utilizou-se o Custo Médio Ponderado de Capital (WACC, do inglês, *Weighted Average Cost of Capital*), semelhante ao definido pela EPE (2019), de 8% a.a. Quanto menor o WACC, maior o valor do projeto, uma vez que o custo de oportunidade influi diretamente na taxa de desconto, com relação ao risco de investimento (ROTELA JUNIOR *et al.*, 2019).

3.2.4 Procedimentos aplicados

Os procedimentos realizados nesse trabalho são constituídos por métodos de modelagem e simulação para o fluxo de caixa, considerando as premissas financeiras para um projeto de micro geração PV. Primeiramente foi analisada a viabilidade do sistema em oito municípios brasileiros, nos diferentes tipos climáticos de Köppen-Geiger (1936) predominantes no País, com diferentes níveis de irradiância e horas de sol pleno, como observado na Figura 3.2 e Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3.

A metodologia inicialmente envolve a cotação da série histórica de valores de tarifa de eletricidade cobradas pelas concessionárias em cada localidade. Foi considerado um incremento de 1,05% a.a. de reajuste médio, condizente com a taxa proposta pela ANEEL, deflacionada. Já a eletricidade mensal produzida é calculada com base nas Equações 3.1 e 3.2, utilizando os valores dos níveis de irradiância solar e de horas diárias de insolação para cada cidade, disponibilizados nas Tabelas 3.2 e 3.3, respectivamente. Os valores de tarifa mencionados e a potência mínima dos sistemas registrada para cada município estão dispostos na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Valores das tarifas e potência mínima dos sistemas para as cidades analisadas.

Cidade	Distribuidora	Tarifa [‡] (R\$/kWh)	Potência Mínima do Sistema (kWp)
Manaus-AM	AmE	0,76	77,92
Aracaju-SE	Cercos	0,99	49,44
Pau dos Ferros-RN	Cosern	0,76	44,34
Ouricuri-PE	Celpe	0,82	48,99
Bagé-RS	CEEE-D	0,84	60,72
Irati-PR	Copel-DIS	0,82	77,49
São Simão-SP	CPFL Paulista	0,75	55,78
São Thomé das Letras-MG	Cemig-D	0,94	55,27

[‡](Média histórica dos últimos 10 anos*ICMS)

Fonte: (ANEEL, 2020; ANEEL, 2020).

As cotações do investimento no caso estudado foram realizadas através da compilação de orçamentos solicitados a empresas especializadas, alusivos ao atendimento à demanda de 386 kWh/dia. Esse valor primário contabiliza todos os custos que compõem os equipamentos fotovoltaicos, como cabos e proteções, etc. Entretanto, no caso do BIPV, não é incluso o sistema de fixação, uma vez que esse utilizará a estrutura já existente do estacionamento. Finalizada a estimativa do preço do sistema, a mesma foi submetida ao fator de 0,5%, referente à Operação e Manutenção (O&M), como definido pela ABINEE - Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (2012). Os valores médios obtidos estão exibidos na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Dados utilizados nas simulações determinísticas dos valores presentes líquidos (VPLs).

	BIPV	Convencional
Demanda	386 kWh/dia	
Área do painel (m²)	1,88	2,12
Eficiência do painel (%)	15,0	19,8
Potência Máxima do painel (Wp)	218,7	222,3
Investimento (R\$/kWp)	11.591,20	3.659,57
Vida útil do painel (anos)	25	
O&M (%investimento/ano)	5%	
WACC	8%	
Incremento na tarifa	1,05% a.a.	

Fonte: Autores (2021).

As simulações referentes ao fluxo de caixa e identificação das respectivas distribuições de valores para obtenção do VPL para cada cenário, foram realizadas em

dois momentos. No primeiro momento foram obtidos os valores de VPLs de todas as cidades definidas, de forma determinística, com base nos dados apresentados nas Tabelas 3.4 e 3.5. No segundo momento foi aplicado o método de Monte Carlo com 10.000 simulações, apenas no município de Pau dos Ferros-RN, com auxílio do *software* Crystal Ball®, para comparação do retorno da probabilidade de VPL positivo para os dois modelos PV, sob influência de variáveis estocásticas representadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Dados utilizados nas simulações estocásticas dos VPLs (Apenas Pau dos Ferros – RN).

Variável	Distribuição	BIPV			Convencional		
		Mín	MP	Máx	Mín	MP	Máx
Área do painel (m ²)	Uniforme	1,69	-	1,98	1,99	-	2,18
Eficiência (%)	Triangular	12,20	15,00	20,50	18,38	19,77	20,39
Potência do Painel (W _p)	Triangular	205	218,7	246	148	222,3	280
Demanda (kWh/dia)	Fixa	386					
Vida útil (anos)	Fixa	25					
Incremento na tarifa	Fixa	1,05% a.a.					
Tarifa (R\$/kWh)	Triangular	0,54	0,61	0,68	0,54	0,61	0,68
Investimento (R\$/kW _p)	Triangular	5.830,65	11.591,20	17.287,70	3.149,11	3.659,57	4.232,48
O&M (% investimento/ano)	Fixa	0,5%					
WACC	Triangular	7%	8%	20%	7%	8%	20%
ICMS	Fixa	20,5%					

Legenda: Min - Valor mínimo, MP - Valor mais provável; Máx - Valor máximo

Fonte: Autores (2021).

3.2.5 Teste de hipótese estatística

O método de comparação entre as amostras das simulações estocásticas foi o Teste T para duas amostras independentes. Para sua efetivação, o Teste em questão requer que as amostras satisfaçam as condições de normalidade, homogeneidade de variâncias e independência (KIM, 2015).

O Teste de Shapiro-Wilk foi utilizado para testar a normalidade das amostras (SHAPIRO; WILK, 1965). Ele deve ser executado para cada amostra separadamente, nos casos em que são independentes. O nível de significância para o teste foi de $\alpha=0,05$ e as hipóteses são: H_0 : Os dados seguem distribuição normal $\rightarrow p\text{-valor} > 0,05$ e H_1 : Os dados não seguem distribuição normal $\rightarrow p\text{-valor} \leq 0,05$.

O Teste de Levene foi adotado para comprovar a homogeneidade das variâncias, considerando as distâncias das observações das médias das amostras. Sendo o p-valor $< 0,05$, rejeita-se a hipótese nula, onde: $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ e $H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$ (BROWN;

FORSYTHE, 1974).

Uma vez atestado o atendimento das condicionantes, o método final foi executado para comparar a diferença entre as médias das amostras. Para tanto, considerou-se: H_0 : Média dos VPLs do BIPV = Média dos VPLs do Convencional e, H_1 : Média dos VPLs do BIPV \neq Média dos VPLs do Convencional, sendo a hipótese H_0 rejeitada quando $p\text{-valor} < 0,05$ (KIM, 2015). O teste foi efetuado com auxílio do *software* Minitab®.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a execução da simulação determinística, para todas as localidades previamente apresentadas, foram obtidos os valores de VPL para cada uma delas. Os resultados estão apresentados na Tabela 3.7.

Alguns aspectos físicos iniciais, conforme a Tabela 3.5, diferenciam os dois modelos e influenciam nos valores obtidos através das simulações. O primeiro ponto são as configurações de fábrica dos equipamentos, pois os painéis fotovoltaicos semitransparentes do BIPV possuem dimensões e eficiência inferiores ao convencional, entretanto ambos atingem uma potência aproximada, permitindo que o BIPV atenda à demanda solicitada consumindo uma área menor. O segundo ponto é quanto ao valor do investimento por kWp, pois o custo do BIPV ultrapassa o triplo do convencional.

Como observado, todas as simulações retornaram uma estimativa de $VPL > 0$. Apesar das variações entre os municípios e entre os dois modelos propostos, todas as aplicações são consideradas viáveis, de acordo com o critério econômico do VPL, conforme estipularam Zhang *et al.* (2019). De todo modo, comparando-os, o modelo convencional se mostrou mais acessível do ponto de vista dos valores de investimento, e com melhores níveis de retorno.

Como ilustrado na Figura 3.3, identifica-se uma quase proporcionalidade inversa entre o valor de investimento e o VPL obtido. Os maiores investimentos ocorreram nos municípios de Manaus-AM, Irati-PR e Bagé-RS e os menores foram em Pau dos Ferros-RN, Ouricuri-PE e Aracaju-SE. Com relação aos montantes de VPL, a situação é invertida, Aracaju-SE, Pau dos Ferros-RN e Ouricuri-PE possuem os maiores valores e, Irati-PR, Bagé-RS e Manaus-AM têm os menores retornos, nessa ordem. De acordo com Rocha *et al.* (2017), o valor do investimento impacta diretamente no resultado do VPL.

Tabela 3.7: Resultados das simulações determinísticas de VPL para as cidades definidas.

Cidade	Área (m ²)		Investimento (R\$)		O&M (R\$/ano)		VPL (R\$)	
	B	C	B	C	B	C	B	C
Manaus-AM	677,87	751,56	894.246,51	282.336,10	4471,23	1.411,68	2.864.237,86	5.264.524,28
Aracaju-SE	431,03	477,49	567.428,36	179.151,39	2837,14	895,76	4.880.866,51	7.810.374,94
Pau dos Ferros-RN	385,46	428,24	508.871,13	160.663,40	2.544,36	803,32	3.928.275,54	6.367.805,86
Ouricuri-PE	427,23	473,21	562.278,17	177.525,35	2.811,39	887,63	3.881.776,87	6.344.388,65
Bagé-RS	527,87	586,69	696.783,93	219.992,20	3.483,92	1.099,96	2.720.993,44	4.829.345,32
Irati-PR	674,07	747,28	889.279,02	280.767,74	4.446,40	1.403,84	2.079.213,58	4.110.968,28
São Simão-SP	486,09	537,44	640.123,17	202.102,97	3.200,62	1.010,51	3.146.761,26	5.355.247,26
São Thomé das Letras-MG	489,89	543,86	645.773,27	203.886,85	3.228,87	1.019,43	3.445.284,07	5.821.750,74

Legenda: B – BIPV; C – Convencional.

Fonte: Autores (2021).

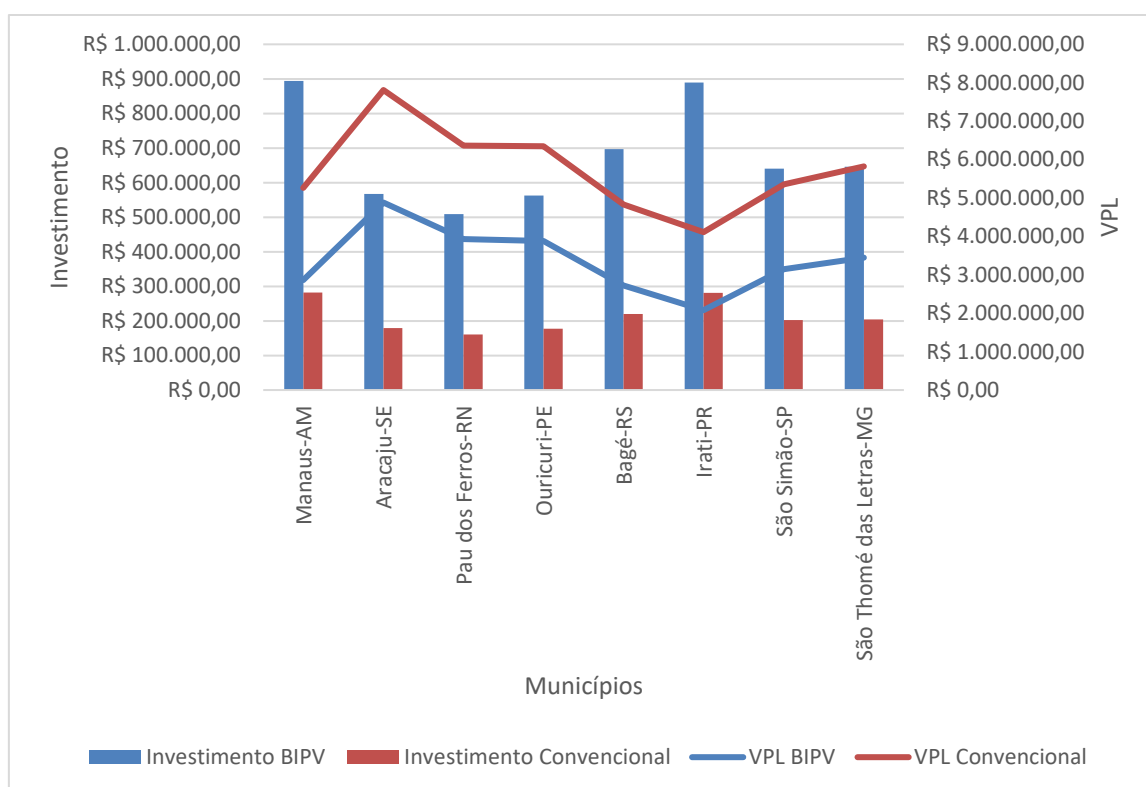


Figura 3.3: Representação dos resultados das simulações determinísticas para as localidades estudadas.

Fonte: Autores (2021).

Essa dissemelhança entre os valores do investimento nas diferentes cidades possui uma relação direta com suas particularidades climáticas. De acordo com Han *et al.* (2016),

a carga e a produção de energia fotovoltaica são afetadas pela temperatura, clima, estações, dentre outros fatores. As localidades que possuem os menores valores de investimentos, pertencem, respectivamente, aos tipos climáticos As, Am e BSh, que são caracterizados por períodos de seca bem definidos, períodos chuvosos relativamente curtos e altas temperaturas (ALVARES *et al.*, 2013).

Já os maiores investimentos são encontrados nos tipos climáticos Af, Cfb e Cfa, qualificados pela alta pluviosidade ao longo do ano, que interfere diretamente na quantidade de horas de sol diária e níveis de irradiância aos quais os painéis são submetidos (ALVARES *et al.*, 2013). Este fato se confirma quando se compara os tipos Cwa e Cwb com os tipos Cfa e Cfb, respectivamente, pois apesar de suas semelhanças gerais, esses primeiros possuem um período de seca que os beneficia com melhores dados de geração elétrica. Constatou-se, ainda, que o *ranking* dos valores dos investimentos é equivalente ao das médias de horas de insolação diária entre as cidades analisadas e dos valores de irradiância, como observado nas Tabelas 3.2 e 3.3.

As considerações de Ascencio-Vásquez, Brecl e Topič (2019) reiteram os resultados apresentados quando afirmam que a maior produção de eletricidade ocorre em locais com altas irradiações. Eles concluíram que o Fator de Capacidade Unitária (*Unit Capacity Factor* - UCF), que representa o percentual de tempo anual em que o sistema fotovoltaico está operando, nas localidades com alta irradiação e grande quantidade de horas de sol pode chegar a mais de 20%. Climas Tropicais apresentam UCFs entre 16 e 18%, pois, apesar da alta irradiação, manifestam períodos chuvosos e nublados durante todo o ano. Já em locais nublados os valores dificilmente ultrapassam 14% (ASCENCIO-VÁSQUEZ; BRECL; TOPIČ, 2019).

Pranadi *et al.* (2016) afirmam que a taxa de receptividade da tecnologia fotovoltaica é influenciada, principalmente, pelo valor inicial do projeto. No entanto, o VPL do projeto é impactado mais significativamente pelo custo da eletricidade local. Em sua análise de sensibilidade, Cui *et al.* (2020) também identificaram que o preço da eletricidade possuía a maior influência no aumento do VPL, sendo essas variáveis diretamente proporcionais. Essa relação e os bons índices solares certamente contribuíram para a colocação de Aracaju-SE como a localidade com melhor VPL.

Contudo, ainda de acordo com Cui *et al.* (2020), a conquista dos melhores retornos de VPL é alcançada com a maior quantidade de energia produzida. As condições climáticas têm a capacidade de influenciar na geração energética, a ponto de locais com maiores tarifas originarem menores retornos, como ocorreu entre o município de Pau dos

Ferros-RN e os demais. Rocha *et al.*, (2017) identificaram um evento semelhante, onde Petrolina-PE obteve melhores retornos do que Belém-PA e Uberaba-MG, mesmo com tarifa inferior, devido ao seu maior potencial solar.

Já no tocante a aplicação das simulações estocásticas para o município de Pau dos Ferros-RN, foram retornados 10.000 valores de VPL para cada um dos modelos de instalação fotovoltaica. Como representado na Tabela 3.8 e Figura 3.4, em ambos os casos a frequência e a probabilidade cumulativa do retorno do VPL positivo é de 100%, reafirmando a viabilidade econômica e o potencial solar do local.

Tabela 3.8: Resultados das simulações estocásticas de VPL para o município de Pau dos Ferros-RN.

	Média VPL (R\$)	P $VPL > 0$
BIPV	3.070.653,92	100%
Convencional	5.083.210,02	100%

Fonte: Autores (2021).

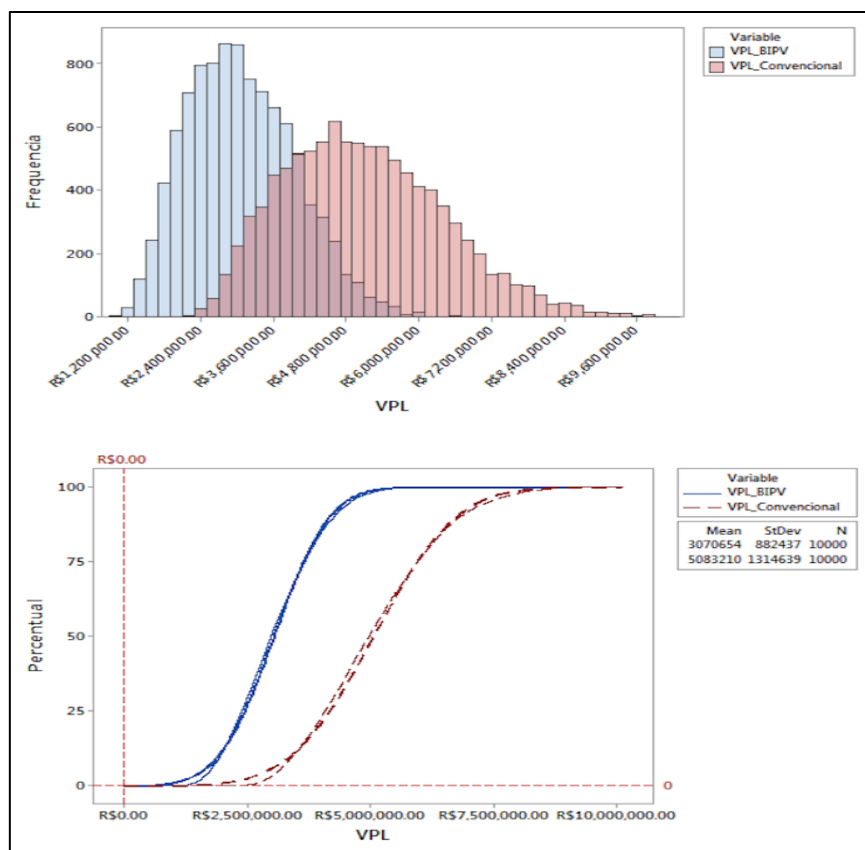


Figura 3.4: Histogramas e Funções de Distribuição Cumulativa das simulações estocásticas.

Fonte: Autores (2021).

Com base no tratamento estatístico para comparação das amostras de valores de VPL simulados para os dois modelos fotovoltaicos sugeridos, foi possível afirmar que o convencional é mais lucrativo. Através do Teste T para duas amostras, obteve-se um p-valor de 0,000, descartando-se, portanto, a hipótese nula que prega a igualdade entre as amostras. O valor médio do VPL do modelo convencional é expressivamente maior que o BIPV, com uma diferença na ordem de 66%. A Figura 3.5 retrata o padrão de dispersão das amostras.

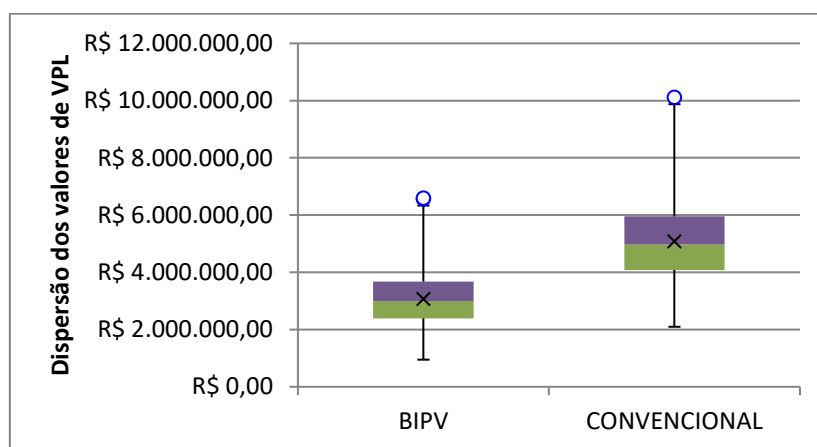


Figura 3.5: Representação dos resultados das simulações estocásticas.

Fonte: Autores (2021).

A amostra de valores do modelo convencional apresenta grande dispersão, variando entre R\$ 2.097.118,71 e R\$ 9.874.294,74, com um valor médio de R\$ 5.083.210,02. Já a amostra BIPV possui uma dispersão mais reduzida, com valor mínimo de R\$ 948.587,38 e máximo de R\$ 6.596.273,94, com média de R\$ 3.070.653,92. Ambas apresentam *outliers*. De toda forma, os resultados deste trabalho não sinalizam a inviabilização da implantação de sistemas BIPVs, pois além de não considerar a economia com os materiais de construção que seriam utilizados no caso do modelo convencional, os benefícios do BIPV ultrapassam as barreiras econômicas e refletem os conceitos de *design*, controle sensível e valorização de imóveis (GUNERHAN; HEPBASLI; GIRESunLU, 2008), não incluídos nos objetivos da presente análise.

3.4 CONCLUSÕES

A energia fotovoltaica é vista internacionalmente como uma alternativa sustentável para o alcance da segurança energética e para a mitigação das mudanças climáticas. Por isso, o número de instalações solares vem crescendo muito nos últimos

anos. Esse cenário próspero necessita de planejamento estratégico, para garantir que, além de alcançar seus objetivos já citados, proporcione um retorno financeiro favorável para o investidor, utilizando da melhor forma as características climáticas disponíveis localmente.

A partir das análises econômicas realizadas, foi possível constatar que ambos os sistemas propostos são viáveis em todos os tipos climáticos predominantes do Brasil. Observou-se que há uma profunda relação entre as peculiaridades de cada tipo climático com os resultados obtidos. Os municípios que possuíam maiores índices de irradiância e horas de insolação diária lograram maiores valores de geração elétrica e, conseqüentemente, melhores retornos de VPL com menores custos iniciais. Esses estão em regiões correspondentes aos tipos climáticos Am, As e BSh, todos na região Nordeste do Brasil.

Os municípios de Pau dos Ferros-RN e Aracaju-SE possuem o menor valor de investimento e o maior VPL simulado, respectivamente. Já Manaus-AM e Irati-PR apresentam maior investimento e menor VPL, nessa ordem. De todo modo, o modelo convencional se mostrou mais atrativo que o BIPV, do ponto de vista dos valores de aplicação e retorno.

Com relação às simulações estocásticas no município de Pau dos Ferros-RN, os resultados continuaram equivalentes aos das simulações anteriores. Os dois sistemas obtiveram 100% de probabilidade acumulada de $VPL > 0$. O modelo convencional permanece apresentando valores mais convidativos que o BIPV, com média de VPL significativamente maior.

Contudo, embora não apresente os melhores resultados, o BIPV ainda é qualificado como viável para as localidades estudadas, com todos os VPLs calculados positivos. Além disso, seus benefícios ultrapassam as barreiras monetárias, atuando em áreas sensíveis, de *design* e até na valorização dos imóveis, devido ao seu diferencial arquitetônico.

REFERÊNCIAS

ABINEE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA. **Propostas para inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica Brasileira**. 2012. Disponível em: <http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/profotov.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2020.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische**

Zeitschrift, [s.l.], v. 22, n. 6, p. 711-728, 1 dez. 2013.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 482/2012**. 2012. 13p.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Empresas de Energia Elétrica Nacionais**. 2020. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/link/DefaultDetail.cfm?idLinkCategoria=14>. Acesso em: 24 abr. 2020.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Incidência de ICMS nas tarifas de energia elétrica**. 2020. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjA0ZjQxZjItMDI4Ni00NzAyLTlhZjUtNjVkNTY3ZmMzNmMwIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>. Acesso em: 17 set. 2020.

ASCENCIO-VÁSQUEZ, J.; BRECL, K.; TOPIČ, M. Methodology of Köppen-Geiger-Photovoltaic climate classification and implications to worldwide mapping of PV system performance. **Solar Energy**, [s.l.], v. 191, p. 672-685, out. 2019.

AZEVÊDO, R. de O.; ROTELA JUNIOR, P.; ROCHA, L. C. S.; CHICCO, G.; AQUILA, G.; PERUCHI, R. S. Identification and Analysis of Impact Factors on the Economic Feasibility of Photovoltaic Energy Investments. **Sustainability**, [s.l.], v. 12, n. 17, p. 7173-7213, 2 set. 2020.

BIANCHINI, A.; GAMBUTI, M.; PELLEGRINI, M.; SACCANI, C. Performance analysis and economic assessment of different photovoltaic technologies based on experimental measurements. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 85, p. 1-11, jan. 2016.

BP - BRITISH PETROLEUM. **BP Statistical Review of World Energy 2019**. 68. ed. Londres: BP p.l.c., 2019. 64 p.

BROWN, M. B.; FORSYTHE, A. B. Robust Tests for the Equality of Variances. **Journal of The American Statistical Association**, [s.l.], v. 69, n. 346, p. 364-367, jun. 1974.

CARVALHO, F. I. A. de; ABREU, M. C. S. de; CORREIA NETO, J. F. Financial alternatives to enable distributed microgeneration projects with photovoltaic solar power. **RAM. Revista de Administração Mackenzie**, [s.l.], v. 18, n. 1, p. 120-147, fev. 2017.

CORRIA, M. E.; COBAS, V. M.; LORA, E. S. Perspectives of Stirling engines use for distributed generation in Brazil. **Energy Policy**, [s.l.], v. 34, n. 18, p. 3402-3408, dez. 2006

CUCE, E.; CUCE, P. M.; BALI, T. An experimental analysis of illumination intensity and temperature dependency of photovoltaic cell parameters. **Applied Energy**, [s.l.], v. 111, p. 374-382, nov. 2013.

CUI, Y.; ZHU, J.; MENG, F.; ZORAS, S.; MCKECHNIE, J.; CHU, J. Energy assessment and economic sensitivity analysis of a grid-connected photovoltaic system. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 150, p. 101-115, maio 2020.

ECHEGARAY, F. Understanding stakeholders' views and support for solar energy in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 63, p. 125-133, jan. 2014.

ELIBOL, E., ÖZMEN, Ö.T., TUTKUN, N., KÖYSAL, O. Outdoor performance analysis of different PV panel types. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 67, p. 651-661, jan. 2017.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. MME – Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional**. Rio de Janeiro: EPE, 2019. 67 p.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. MME – Ministério de Minas e Energia. **NOTA TÉCNICA DEA 016/2019** - Modelo de Mercado da Micro e Minigeração Distribuída (4MD). Rio de Janeiro: EPE, 2019. 26 p. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-423/topico-488/NT_Metodologia_4MD_PDE_2029.pdf. Acesso em: 03 nov 2020.

FARIAS-ROCHA, A. P.; HASSAN, K. M. K.; MALIMATA, J. R. R.; SÁNCHEZ-CUBEDO, G. A.; ROJAS-SOLÓRZANO, L. R. Solar photovoltaic policy review and economic analysis for on-grid residential installations in the Philippines. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 223, p. 45-56, jun. 2019.

FOUAD, M. M.; SHIHATA, L. A.; MORGAN, E. I. An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 80, p. 1499-1511, dez. 2017.

GUNERHAN, H.; HEPBASLI, A.; GIRESUNLU, U. Environmental Impacts from the Solar Energy Systems. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, [s.l.], v. 31, n. 2, p. 131-138, 2 dez. 2008.

HAN, X.; ZHANG, H.; YU, X.; WANG, L. Economic evaluation of grid-connected micro-grid system with photovoltaic and energy storage under different investment and financing models. **Applied Energy**, [s.l.], v. 184, p. 103-118, dez. 2016.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Brasil: Unidades da Federação**. 2018. Disponível em: <https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#mapa220344>. Acesso em: 23 abr. 2020

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **BDMEP** - Dados Históricos. 2019. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>. Acesso em: 25 abr. 2020.

KIM, T. K. T test as a parametric statistic. **Korean Journal of Anesthesiology**, [s.l.], v. 68, n. 6, p. 540-546, 2015.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Handbuch der Klimatologie**. (Eds.). Berlim: Editora Gebrüder Borntraeger, 1936. v.1, parte C, p. 44.

KOTHARI, C. R. **Research methodology: methods and techniques**. 2. ed. Nova Delhi: New Age International Limited, 2004. 414 p.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, [s.l.], v. 15, n. 3, p. 259-263, 10 jul. 2006.

MANGIERO, G. A.; KRATEN, M. NPV Sensitivity Analysis: a dynamic excel approach. **American Journal of Business Education**, [s.l.], v. 10, n. 3, p. 113-126, 30 jun. 2017

MINITAB (EUA). **Minitab® Statistical Software**. 2021. Disponível em: <https://www.minitab.com/pt-br/>. Acesso em: 19 jun. 2021.

ORACLE. **Crystal Ball**. Disponível em: <https://www.oracle.com/br/applications/crystalball/>. Acesso em: 25 abr. 2020.

PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas Brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 88 p.

PRANADI, A. D.; HARAMAINI, Q.; SETIAWAN, A.; SETIAWAN, E. A.; ALI, C. Sensitivity Analysis of Financial Parameters in Varying PV Penetrations in the Optimum Location of a Feeder. **Energy Procedia**, [s.l.], v. 156, p. 95-99, jan. 2019.

ROCHA, L. C. S.; AQUILA, G.; PAMPLONA, E. de O.; PAIVA, A. P. de; CHIEREGATTI, B. G.; LIMA, J. de S. B. Photovoltaic electricity production in Brazil: a stochastic economic viability analysis for small systems in the face of net metering and tax incentives. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 168, p. 1448-1462, dez. 2017.

ROTELA JUNIOR, P.; FISCHETTI, E.; ARAÚJO, V. G.; PERUCHI, R. S.; AQUILA, G.; ROCHA, L. C. S.; LACERDA, L. S. Wind Power Economic Feasibility under Uncertainty and the Application of ANN in Sensitivity Analysis. **Energies**, [s.l.], v. 12, n. 12, p. 2281-2291, 14 jun. 2019.

SCHILLING, M.; CHIANG, L. The effect of natural resources on a sustainable development policy: the approach of non-sustainable externalities. **Energy Policy**, [s.l.], v. 39, n. 2, p. 990-998, fev. 2011.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). **Biometrika**, [s.l.], v. 52, n. 3/4, p. 591-611, dez. 1965.

TIBA, C *et al.* (Coord.). **Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados terrestres**. 2. ed. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2000. 116 p.

YE, S.; TIONG, R. L. K. NPV-at-Risk Method in Infrastructure Project Investment Evaluation. **Journal Of Construction Engineering and Management**, [s.l.], v. 126, n. 3, p. 227-233, maio 2000.

YUE, C.; HUANG, G. An evaluation of domestic solar energy potential in Taiwan incorporating land use analysis. **Energy Policy**, [s.l.], v. 39, n. 12, p. 7988-8002, dez. 2011.

ZAMAN, M. B.; PRIYANTA, D.; TRISILO, F. Risk Assessment in Financial Feasibility of Tanker Project Using Monte Carlo Simulation. **International Journal of Marine Engineering Innovation and Research**, [s.l.], v. 1, n. 4, p. 303-316, 24 ago. 2017.

ZHANG, Q.; MA, J.; QIU, G.; LI, L.; GENG, S.; HASI, E.; LI, C.; WANG, G.; LI, X. Potential energy production from algae on marginal land in China. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 109, p. 252-260, abr. 2012.

ZHANG, Z.; ZHANG, Z.; WANG, X.; LIU, H.; WANG, Y.; WANG, W. Models for economic evaluation of multi-purpose apple harvest platform and software development. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, [s.l.], v. 12, n. 1, p. 74-83, 2019.

CAPÍTULO 4

ARTIGO: AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DE UM SISTEMA BIPV PELO MÉTODO RIAM

4.1 INTRODUÇÃO

Um dos principais contribuintes para o aquecimento global são os gases de efeito estufa (GEE), liberados na atmosfera devido, em grande parte, à queima de combustíveis fósseis utilizados na geração de eletricidade e calor. As energias renováveis são vistas como alternativa para o combate deste problema, possibilitando o desenvolvimento de um setor de energia competitivo, confiável e sustentável. Elas são conhecidas por serem mais ecologicamente corretas e “verdes”, almejando-se a menor emissão de GEE (HADIAN; MADANI, 2015; PACESILA; BURCEA; COLESCA, 2016).

As tecnologias relacionadas à energia solar se caracterizam por baixa emissão de carbono, mínima dependência de combustíveis fósseis e comumente necessitam de pouca manutenção. Entretanto, como em qualquer fonte energética, elas apresentam potenciais efeitos ambientais, como os relacionados ao uso de água e da terra, geração de resíduos perigosos, modificação paisagística e alteração do microclima, geralmente minimizados por meio de gerenciamento e monitoramento adequados (DHAR *et al.*, 2020).

O planejamento bem executado para a instalação de plantas solares garante o melhor aproveitamento dos benefícios econômicos, ambientais e técnicos associados. A escolha do local que permita a máxima exploração do potencial solar, o uso consciente da terra, a disponibilidade e conservação dos recursos hídricos, infraestrutura da rede, análise tecno-econômica e de viabilidade devem ser avaliados (HIRBODI; ENJAVI-ARSANJANI; YAGHOUBI, 2020).

Inspirados nos conceitos de sustentabilidade, a tendência é de que os projetos de desenvolvimento se tornem cada vez mais compatíveis com critérios ambientais. A Avaliação de Impactos Ambientais (AIA) é um método de avaliação focado nos aspectos ambientais locais, a fim de explorar os prováveis impactos de um determinado projeto (FERNANDO *et al.*, 2017). Ela é definida como um processo de gerenciamento ambiental, planejamento e tomada de decisões com o intuito de manter e melhorar a qualidade do meio ambiente (GUNERHAN; HEPBASLI; GIRESUNLU, 2008).

Os primeiros registros de análise dos impactos ambientais da energia solar datam da década de 1970. Esses estudos baseiam-se na determinação de um gradiente, entre benigno e prejudicial, assentado pela resiliência energética e conservação ambiental para formulação de um relatório de uso final. Enfatiza-se a importância do entendimento das singularidades geográficas locais, da biodiversidade e dos elementos fundamentais do ciclo de vida, bem como a sua interação com os fatores de mudança ambiental global (HERNANDEZ *et al.*, 2014).

No tocante aos sistemas fotovoltaicos integrados – BIPVs (*Building Integrated Photovoltaics*), a literatura concentra seus esforços na avaliação dos benefícios ambientais dos sistemas em si, com relação ao desempenho do equipamento e sua taxa de inserção no mercado (KELLY; SEN; TATARI, 2020). O maior impacto ambiental da energia solar ocorre durante a fase de fabricação dos equipamentos, seguido das fases de implantação, operação e desativação (KORONEOS; NANAKI, 2012; MICHAEL; SELVARASAN, 2017). Os principais danos associam-se às mudanças climáticas, toxicidade humana, depleção fotoquímica de ozônio, acidificação terrestre e marinha, eutrofização e esgotamento de recursos hídricos (MAHMUD *et al.*, 2018).

Os efeitos no solo, no ar e na água e a geração de resíduos sólidos acontecem em proporções diferentes para cada etapa do projeto de energia solar (MAHMUD *et al.*, 2018). Praticamente, nenhum resíduo é gerado durante a operação dos módulos fotovoltaicos, no entanto, não se deve ignorar o fluxo acometido em algumas situações isoladas. A utilização de produtos químicos utilizados na limpeza dos painéis causa efeitos negativos na qualidade do ar, e na saúde humana, valores elevados de acidificação, e contribuem para o aquecimento global (MAANI *et al.*, 2020). Além disso, há a geração de resíduos decorrentes de peças danificadas e da desativação da instalação, tornando a reciclagem das partes, no fim de sua vida útil, essencial para a superação dos problemas conexos (MAHMUD *et al.*, 2018; KLUGMANN-RADZIEMSKA; KUCZYŃSKA-ŁAŚEWSKA, 2020).

Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi identificar os impactos ambientais relacionados às fases de implantação, operação plena e desativação de um sistema fotovoltaico integrado (BIPV) dimensionado para atender o consumo elétrico de um complexo turístico situado no semiárido do Nordeste do Brasil, e realizar suas respectivas avaliações pela metodologia do método da Matriz de Avaliação Rápida de Impacto, do inglês, *Rapid Impact Assessment Matrix* - RIAM.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Área de estudo

O município de Pau dos Ferros (Figura 4.1) está situado na região do alto oeste do Rio Grande do Norte, no Nordeste do Brasil, com aproximadamente 260 km² de área territorial e conta com cerca de 30.400 habitantes (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2019). Além disso, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2021) cita que o município apresenta uma média de 8,7 horas de

insolação diária ao longo do ano e consta no Atlas Brasileiro de Energia Solar a presença de 5,92 kWh/m² de irradiância solar diária média (PEREIRA *et al.*, 2017).

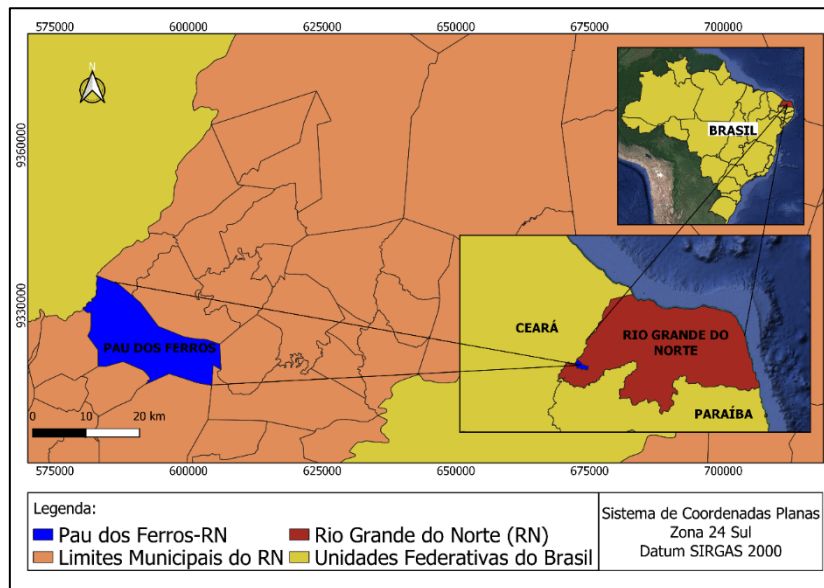


Figura 4.1: Mapa de localização de Pau dos Ferros-RN.

Fonte: Adaptado de IBGE (2018).

O Complexo Turístico Serrote do Jatobá (CTSJ) é a área de estudo do presente trabalho. Trata-se de uma obra em desenvolvimento pela prefeitura de Pau dos Ferros, a qual se encontra em fase de instalação. O CTSJ está localizado no Sítio Jatobá, Zona Rural do município de Pau dos Ferros (Figura 4.2) e desenvolverá suas atividades em uma área total de 247.987 m², com 78.024 m² de área construída.

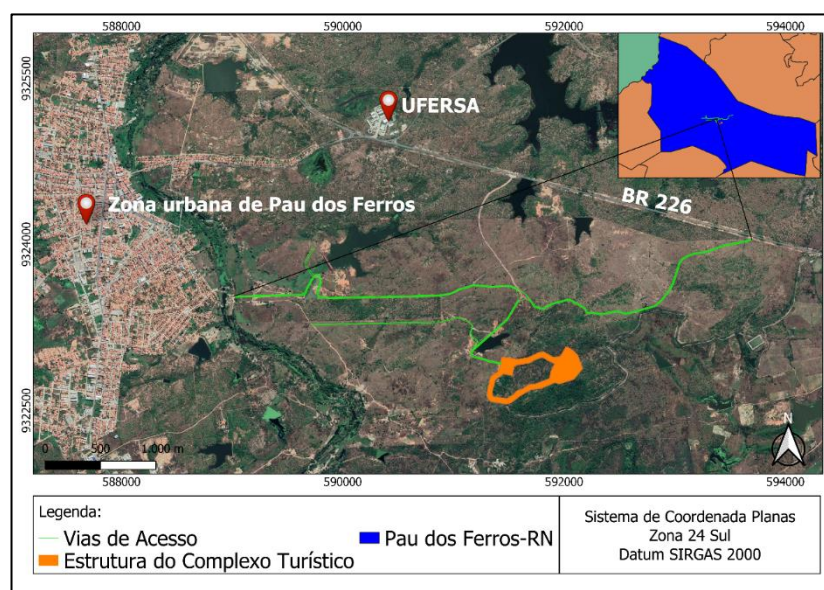


Figura 4.2: Localização do Complexo Turístico Serrote do Jatobá.

Fonte: Adaptado de IBGE (2018) e Google Earth (2020).

4.2.2 Informações técnicas do sistema BIPV

O sistema fotovoltaico proposto será utilizado para substituição da cobertura do estacionamento do complexo turístico, semelhante ao exemplo da Figura 4.3, como elemento construtivo integrante da infraestrutura, caracterizando-o como BIPV. O sistema solar foi projetado para satisfazer a demanda energética de 386 kWh/dia, referente à necessidade para o atendimento da área externa do complexo, e ocupar a área de 770m² corresponde ao espaço do telhado do estacionamento. Dessa forma, aproveita-se toda a estrutura que já seria efetivada, o que implica em não adicionar o sistema de fixação usual de alumínio para os módulos fotovoltaicos.



Figura 4.3: Exemplo de aplicação de BIPV em estacionamento.

Fonte: Portal Solar (2020)

A área em questão foi escolhida pela disponibilidade de dados meteorológicos da base do INMET próxima ao local e pelo porte da construção que será efetuada, onde devido ao seu estágio inicial de instalação, é adaptável a alterações no projeto estrutural e arquitetônico.

4.2.3 Procedimentos metodológicos

A Avaliação dos Impactos Ambientais foi desenvolvida para prever e caracterizar os potenciais impactos sobre diferentes percepções, com consideração às condições ambientais e sociais emergentes, para interpretar e estabelecer suas importâncias em relação aos fatores ambientais afetados durante as fases de implantação e operação do sistema.

A listagem dos principais impactos incidentes nas fases de implantação e operação do sistema fotovoltaico integrado foi efetivada pelo método da Listagem de Controle, que

enumerou as possíveis influências consideradas ao tipo do projeto, para fins de documentação, planejamento e avaliação (NAHVI; DAGHIGHI; NAZIF, 2017), baseada em revisão bibliográfica e observações de campo. Para fins de avaliação desses impactos, foi confeccionada uma matriz do tipo RIAM.

A RIAM é uma metodologia para realização de Avaliação de Impactos Ambientais proposta por Pastakia e Jensen (1998). Ela apresenta os resultados dos estudos de avaliação de forma organizada e transparente, através da incorporação de um sistema bem definido de atribuição de valores referentes às magnitudes dos diferentes impactos nas diferentes ações do projeto nas condições ambientais. O método envolve uma análise profunda dos componentes selecionados, de forma rápida e precisa, resultando em uma abordagem holística do referido estudo ambiental (SARUPRIA; MANJARE; GIRAP, 2018).

Inicialmente os componentes a serem avaliados especificamente foram definidos por meio de um processo de escopo, enquadrando-os em uma das quatro categorias, que são definidas da seguinte forma: (i) Físico/Químico (FQ); (ii) Biológico/Ecológico (BE); (iii) Social/Cultural (SC); (iv) Econômico/Operacional (EO).

Em seguida, foi produzida uma matriz composta por células de acordo com os impactos relacionados a cada componente definido. Dentro de cada célula, as pontuações dos critérios individuais foram definidas de acordo com os critérios e escalas apresentados na Tabela 4.1. Existem duas classes em que os critérios são definidos: (i) os critérios que são importantes para a condição, que individualmente podem alterar a pontuação obtida (grupo A), inclusos Importância da condição (I) e Magnitude de mudança / efeito (M); e (ii) os critérios que têm valor para a situação, mas não devem ser individualmente capazes de alterar a pontuação obtida (grupo B), contendo Permanência (P), Reversibilidade (R) e (C) Cumulatividade.

Para efeito de valoração de cada impacto, foi utilizada uma série de fórmulas simples, que determinam essas pontuações em uma base definida. Para o grupo A, o sistema propõe uma multiplicação linear das pontuações atribuídas a cada um dos impactos, conforme a Equação 4.1. Esse efeito multiplicador é importante para garantir que o peso de cada pontuação seja expresso.

$$A_1 * A_2 = A_T \quad (4.1)$$

onde, A_1 e A_2 são as pontuações dos impactos dos critérios individuais do grupo A e A_T é o resultado da multiplicação das pontuações.

Já no grupo B, as pontuações foram somadas dentro do grupo de critérios, com o

intuito de fornecer uma soma única, de acordo com a Equação 4.2. Esse método busca garantir que as pontuações individuais não influenciem na pontuação geral, entretanto que a importância coletiva de todo o grupo B seja considerada.

$$B_1 + B_2 + B_3 = B_T \quad (4.2)$$

onde, B_1 , B_2 e B_3 são as pontuações dos impactos dos critérios individuais para o grupo B e B_T é o resultado da soma de todas as pontuações.

Tabela 4.1: Critérios de avaliação do método RIAM.

Critério	Escala	Descrição
A1: Importância da condição	4	Importante para interesses nacionais / internacionais
	3	Importante para interesses regionais / nacionais
	2	Importante para áreas imediatamente fora da condição local
	1	Importante apenas para a condição local
	0	Sem importância
A2: Magnitude de mudança / efeito	+3	Grande benefício positivo
	+2	Melhoria significativa no <i>status quo</i>
	+1	Melhoria no <i>status quo</i>
	0	Sem mudança / <i>status quo</i>
	-1	Mudança negativa para o <i>status quo</i>
	-2	Desvantagem ou mudança negativa significativa
	-3	Grande desvantagem ou mudança
B1: Permanência	1	Sem alteração / não aplicável
	2	Temporário
	3	Permanente
B2: Reversibilidade	1	Sem alteração / não aplicável
	2	Reversível
	3	Irreversível
B3: Cumulatividade	1	Sem alteração / não aplicável
	2	Não cumulativo / único
	3	Cumulativo / sinérgico

Fonte: Pastakia e Jensen (1998).

Os valores de A_T e B_T foram então multiplicados e resultaram em uma pontuação de avaliação final (ES) para a condição. O processo para o RIAM pode ser expresso conforme a Equação 4.3.

$$A_T * B_T = ES \quad (4.3)$$

Para efeito de julgamento, as pontuações ES individuais são agrupadas e comparadas em faixas de intervalos. Esse sistema auxilia no processo de avaliação, onde os marcadores de faixas refletem a combinação entre os grupos A e B de critérios. As condições são definidas em um intervalo alfabético (positivo e negativo), de acordo com a Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Conversões das pontuações ambientais em faixas de alcance pelo método RIAM.

Pontuação Ambiental	Faixas de alcance	Descrição das faixas de alcance	Caracterização
+72 a +108	+ E	Mudanças / impactos positivos importantes.	Impactos positivos, significativos e de longo prazo.
+36 a +71	+ D	Mudança / impactos positivos significativos.	Impactos positivos, significativos, de médio prazo.
+19 a +35	+ C	Mudança / impactos moderadamente positivos.	Impactos positivos, moderadamente significativos e de médio prazo.
+10 a +18	+ B	Mudança / impactos positivos.	Impactos positivos, pouco significativos e de longo prazo.
+1 a +9	+ A	Mudança / impactos ligeiramente positivos.	Impactos positivos, pouco significativos e de curto prazo.
0	N	Sem mudança / <i>status quo</i> / não aplicável.	Sem impactos
-1 a -9	- A	Mudança / impactos ligeiramente negativos.	Impactos negativos, pouco significativos, de curto prazo, reversíveis e gerenciáveis.
-10 a -18	- B	Mudança / impactos negativos.	Impactos negativos, pouco significativos, de longo prazo, reversíveis e gerenciáveis.
-19 a -35	- C	Mudança / impactos moderadamente negativos.	Impactos negativos, moderadamente significativos, de médio prazo, reversíveis e gerenciáveis.
-36 a -71	- D	Mudança / impactos negativos significativos.	Impactos negativos, significativos, de médio prazo, irreversíveis, incontroláveis.
-72 a -108	- E	Principais mudanças / impactos negativos.	Impactos negativos, significativos, de longo prazo, irreversíveis e incontroláveis.

Fonte: Pastakia e Jensen (1998).

Dessa forma, após a identificação e caracterização dos impactos, os procedimentos estruturados e o tratamento das considerações ambientais por meio de testes estatísticos foram incorporados ao processo decisório. O Teste de Shapiro-Wilk foi utilizado para testar a normalidade das amostras (valores de ES para os impactos positivos e negativos) (SHAPIRO; WILK, 1965). O teste deve ser executado para cada amostra

separadamente, nos casos em que são independentes, pois se um dos testes indicar que não há distribuição normal, testes não paramétricos devem ser empregados para inferir sobre os dados (ORCAN, 2020). O nível de significância para o teste foi de $\alpha=0,05$ e as hipóteses são: H_0 : Os dados seguem distribuição normal $\rightarrow p\text{-valor} > 0,05$ e H_1 : Os dados não seguem distribuição normal $\rightarrow p\text{-valor} \leq 0,05$.

O Teste de Levene foi adotado para comprovar a homogeneidade das variâncias, considerando as distâncias das observações das médias das amostras. Esta alternativa torna o teste mais robusto para menores dimensões de amostras (BROWN; FORSYTHE, 1974). Sendo o $p\text{-valor} < 0,05$, rejeita-se a hipótese nula, onde: $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ e $H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$.

O método final de comparação foi o Teste T de Student, que é geralmente usado quando os sujeitos experimentais são divididos em dois grupos independentes, quando as amostras satisfazem as condições de normalidade, homogeneidade de variâncias e independência (KIM, 2015). Uma vez atestada as condições exigidas, o Teste T de Student foi então executado para comparar a diferença entre as medianas das amostras independentes. Para tanto, considerou-se: H_0 : Média dos impactos positivos = Média dos impactos negativos e H_1 : Média dos impactos positivos \neq Média dos impactos negativos (KIM, 2015; PANDIS, 2015). Todos os testes foram realizados através do suplemento “Real Statistics” (ZAIONTZ, 2021), no *software* Excel (MICROSOFT, 2021). O fluxograma ilustrado na Figura 4.4 resume o procedimento metodológico a ser desenvolvido no estudo.



Figura 4.4: Fluxograma ilustrativo e simplificado dos procedimentos metodológicos empregados na pesquisa.

Fonte: Autores (2021).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na fase de implantação, foram definidos 10 diferentes aspectos e 13 respectivos impactos ambientais. Durante a operação foram listados 6 aspectos e 10 impactos ambientais, e na desativação houve 1 aspecto e 1 impacto. Alguns dos impactos agem

simultaneamente em mais de um meio, podendo aparecer mais de uma vez na mesma fase do projeto. Todos esses são englobados e avaliados nas quatro categorias previstas por Pastakia e Jensen (1998) (FQ, BE, SC e EO), como exposto na Tabela 4.3.

Semelhante ao que foi apresentado por Scognamiglio (2016), os aspectos ambientais descritos e analisados referem-se a eventos que perturbam o equilíbrio e bem-estar da população, tanto de forma benéfica quanto maléfica. Dentre os aspectos positivos da implantação do BIPV estão relacionados o desenvolvimento econômico local, aperfeiçoamento da mão de obra, a vertente ambiental, entre outros. Já os aspectos negativos estão associados à modificação arquitetônica, questões de segurança para com os operários, alteração da paisagem, etc. (COHEN; REICHL; SCHMIDTHALER, 2014; SCOGNAMIGLIO, 2016).

Como discutido por Silva e Branco (2018), os impactos da instalação fotovoltaica são classificados tanto em positivos quanto em negativos, a depender das suas repercussões nos meios. Cada impacto possui sua particularidade representada na pontuação de avaliação final ES, refletindo a sua magnitude e natureza. Os resultados dos quantitativos de impactos para cada Faixa de Alcance são retratados na Figura 4.5.

Os principais impactos ambientais positivos foram: a geração de turismo científico (ES=48), a qualificação da mão de obra (ES=48), bem como a sua contratação (ES=48), o consequente fortalecimento do comércio local (ES=36), a rentabilidade ao longo da vida útil do projeto (ES=36), além dos benefícios verdes, definidos como a geração de energia verde (ES=36) e a descarbonização da rede elétrica (ES=36), que refletem diretamente na mitigação dos efeitos das mudanças climáticas.

Já os negativos se apresentaram como: possível contaminação do solo e corpos hídricos, decorrentes da geração de resíduos sólidos e efluentes dos processos da fase de instalação (ES=-36), da manutenção dos equipamentos na fase de operação, principalmente no uso de substâncias químicas para limpeza (ES=-42), e no descarte das peças no encerramento (ES=-42), além da perturbação, afugentamento e risco de acidentes com a fauna (ES=-24) e a alteração na qualidade do ar, por material particulado (ES=-24), ambos no momento da instalação, sendo esta última o maior risco para população local.

Tabela 4.3: Matriz de Avaliação Rápida de Impactos decorrentes das fases de implantação, operação e desativação do BIPV.

Categoria	Aspecto	Impacto	I	M	P	R	C	ES	Faixa
FQ	Inserção de canteiro de obras.	Modificação paisagística.	1	-1	2	2	2	-6	-A
	Aumento do volume de tráfego local.	Alteração na qualidade do ar por material particulado.	2	-2	2	2	2	-24	-C
	Uso e ocupação planejada do solo.	Aproveitamento de área construída para acoplamento do sistema.	1	2	3	3	2	16	B
	Modificação da arquitetura padrão e original do empreendimento.	Alteração paisagística.	1	1	3	3	2	8	A
	Geração de resíduos (sólidos e efluentes).	Contaminação do solo e corpos hídricos.	2	-3	2	2	2	-36	-D
BE	Inserção de canteiro de obras.	Perturbação, afugentamento e risco de acidentes com a fauna.	2	-2	2	2	2	-24	-C
SC	Aperfeiçoamento e contratação da mão de obra local.	Qualificação da mão de obra.	2	3	3	3	2	48	D
	Geração de ruídos relacionados às construções civis e outros processos.	Perturbação à população circunvizinha.	1	-1	2	2	2	-6	-A
EO	Risco de acidentes de trabalho.	Possibilidade de acidentes durante a execução do projeto.	1	-2	2	2	2	-12	-B
	Contratação de empresa com <i>know-how</i> na técnica BIPV.	Equilíbrio quanto ao custo inicial dos equipamentos e instalação.	3	2	2	2	2	36	D
	Aperfeiçoamento e contratação da mão de obra local.	Geração de emprego e renda.	2	2	2	3	2	28	C
	Aumento do volume de tráfego local.	Riscos de acidentes de trânsito nas vias principais e locais, causando tensão emocional aos moradores do entorno das áreas em obras.	1	-2	2	2	2	-14	-B
	Fim da implantação do empreendimento e a desmobilização das obras.	Perda dos postos de trabalho temporários criados.	2	-1	3	3	2	-12	-B
FQ	Geração de resíduos (sólidos e efluentes).	Contaminação do solo e corpos hídricos.	2	-3	3	2	2	-42	-D
EO	Manutenção dos equipamentos.	Oferta de empregos diretos, mesmo que em número reduzido, para mão de obra especializada.	3	2	3	3	2	48	D

	Consumo de energia fotovoltaica.	Lucratividade com a redução dos custos com energia elétrica.	2	2	3	3	3	36	D
		Geração de energia verde	4	1	3	3	3	36	D
		Descarbonização da rede elétrica e consequente contribuição para mitigação dos efeitos das mudanças climáticas	4	1	3	3	3	36	D
	Risco de acidentes de trabalho.	Possibilidade de acidentes durante a manutenção	1	-2	2	2	2	-12	-B
	Baixa necessidade de manutenção do BIPV.	Economia de gastos.	2	2	2	3	2	28	C
		Minimização de riscos de acidentes operacionais e ambientais.	1	2	3	3	3	18	B
	Abertura para visitação.	Geração de turismo científico.	3	2	3	3	2	48	D
		Fortalecimento do comércio local.	2	2	3	3	3	36	D
	FQ	Geração de resíduos (sólidos e efluentes).	Contaminação do solo e corpos hídricos.	2	-3	3	2	2	-42
IMPLANTAÇÃO		OPERAÇÃO			DESATIVAÇÃO				
Legenda: FQ - Físico/Químico, BE - Biológico/Ecológico, SC - Social/Cultural, EO - Econômico/Operacional, I - Importância da condição, M - Magnitude de mudança/efeito, P – Permanência, R – Reversibilidade, C – Cumulatividade.									

Fonte: Autores (2021).

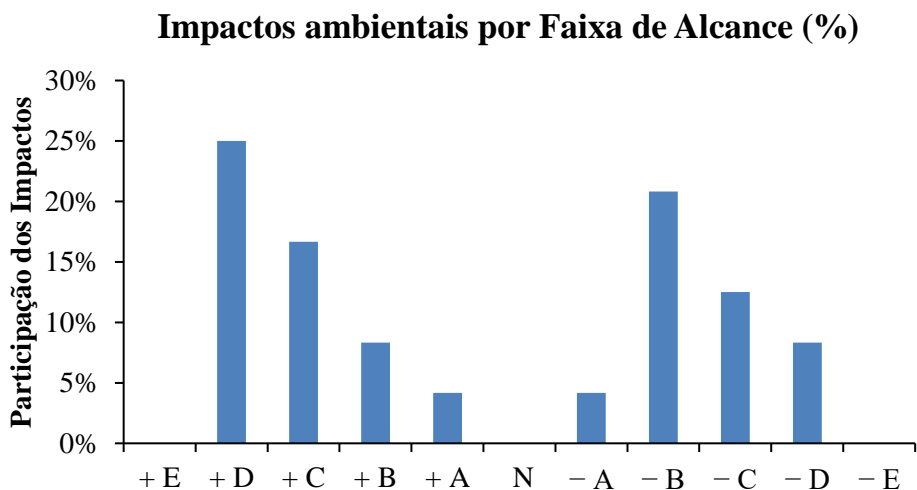


Figura 4.5: Quantitativo dos impactos ambientais por faixa de alcance.

Fonte: Autores (2021).

Como ressaltado, a maioria dos impactos elencados são positivos significativos (+D), correspondendo a 25% do total. Em seguida, os impactos negativos pouco significativos (-B) são os mais numerosos, responsáveis por 20,8%. Os impactos moderadamente positivos (+C) compreendem 16,7% do quantitativo geral, já os

moderadamente negativos (-C) 12,5%. Houve empate entre os positivos pouco significativos (+B) e os negativos significativos (-D) e entre os ligeiramente positivos e negativos (+A) e (-A), com 8,3% e 4,2%, respectivamente cada dupla. Não houve impactos considerados +E, -E ou N.

As ES da condição obtidas são descritas na Figura 4.6, subdivididas entre as quatro categorias e as faixas de alcance propostas por Pastakia e Jensen (1998). Os impactos positivos mais importantes identificados no presente trabalho foram: qualificação da mão de obra, geração de turismo científico, redução dos custos com energia elétrica, a expansão da geração de energia verde, a descarbonização da rede elétrica, e o fortalecimento do comércio local. Com relação aos impactos negativos que afligem a área estão: alteração na qualidade do ar por material particulado, perturbação, afugentamento e risco de acidentes com a fauna, e contaminação do solo e corpos hídricos.

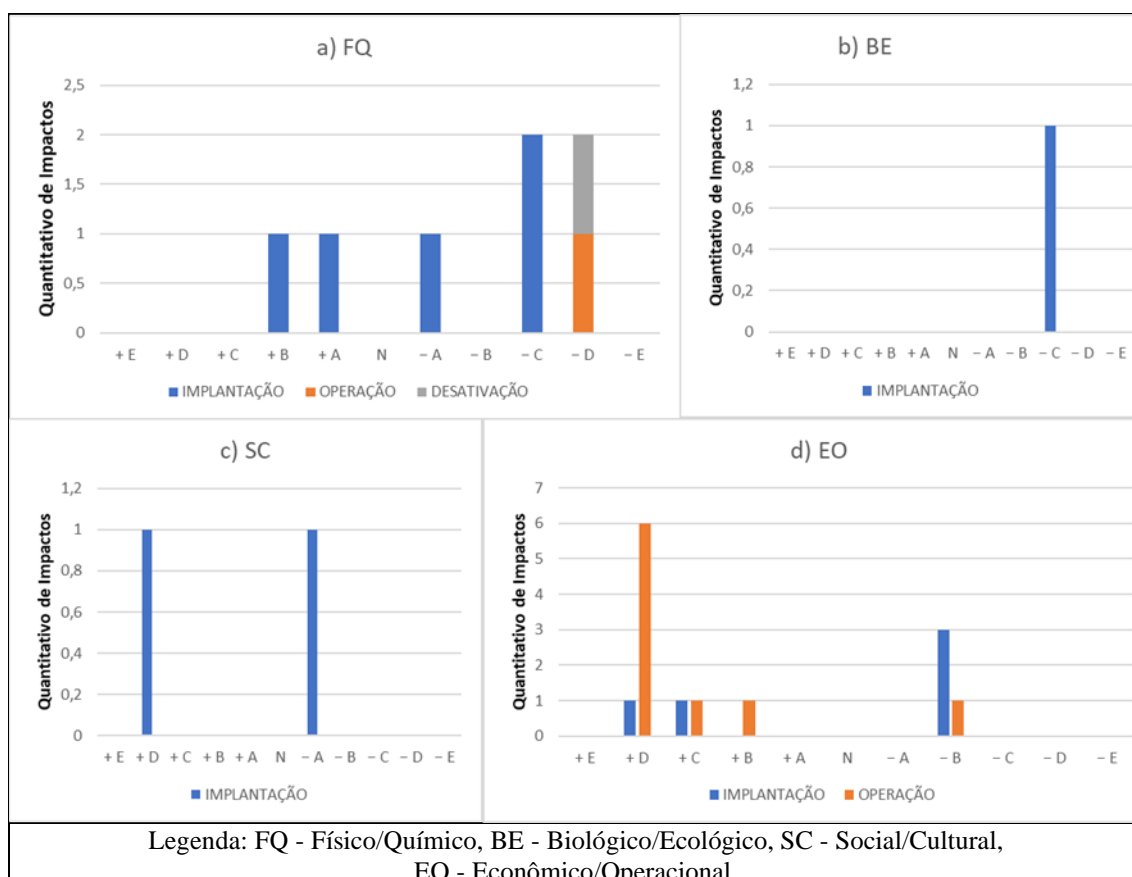


Figura 4.6: Quantitativo dos impactos ambientais durante as fases de implantação, operação e desativação do BIPV, de acordo com suas categorias e Faixas de Alcance.

Fonte: Autores (2021).

Conforme observado, a categoria mais impactada é a Econômico/Operacional – EO, com um total de 14 impactos. Dentre os ES referentes a esses impactos, 7 são classificados como nível +D, sendo um na fase de implantação e 6 da operação. Foram tipificados 2 como +C, alusivos a 1 na implantação e 1 na operação. No grupo +B há apenas 1 impacto, sendo este decorrente da fase de operação. Todos os impactos negativos dessa categoria foram qualificados como –B, sendo 3 na implantação e 1 na operação.

Os benefícios atrelados aos ESs dessa categoria referem-se à aquisição e aperfeiçoamento da mão de obra, visitação de caráter técnico-científica, retornos financeiros que abrangem do próprio empreendimento até a população local, além dos proveitos ambientais associados. Os impactos negativos apontados são estritamente relacionados aos riscos com a segurança dos trabalhadores, bem estar e qualidade de vida da população circunvizinha, e à perda de postos de trabalho ao final da instalação.

A geração elétrica proveniente de uma fonte renovável, como é o caso da fotovoltaica, possui impactos positivos em relação ao clima e as mudanças relacionadas. Essas instalações possuem o papel de reduzir as emissões de gases do efeito estufa no longo prazo e de auxiliar no consumo responsável dos recursos naturais, como substitutas das fontes convencionais e de combustíveis fósseis (VRÎNCEANU *et al.*, 2019; JENNICHES; WORRELL, 2019). Corroborando com os maiores valores de ES determinados neste estudo, Phillips (2013) afirma que a maior vantagem ambiental dessa forma de energia é a redução dos mecanismos indutores das mudanças climáticas nas emissões de GEE. Isso se refere ao resguardo dos aspectos de poluição oriundos da queima de combustíveis fósseis para o fornecimento energético (PHILLIPS, 2013).

Elenca-se ainda, que os benefícios do desenvolvimento fotovoltaico também atuam em termos de lucratividade em relação aos custos com eletricidade e o retorno financeiro do projeto. No caso desse estudo, toda a eletricidade produzida será utilizada no próprio empreendimento, o que segundo Cucchiella (2018), é mais lucrativo do que a venda dessa eletricidade. D’Adamo *et al.* (2020) afirma que as tendências das análises econômicas encontradas na literatura demonstram a lucratividade geral dos sistemas fotovoltaicos nos setores residencial, comercial e industrial, apoiando os usuários na tomada de decisão consciente.

Além disso, os bons índices de insolação local podem determinar um aumento na quantidade de energia produzida, garantindo um aumento significativo no Valor Presente Líquido – VPL, demonstrando lucro sobre o investimento inicial (D’ADAMO *et al.*, 2020). O VPL mostra a diferença líquida entre os lucros e os custos do sistema no presente

ou em valores anuais, calculado pela diferença entre o valor presente dos lucros e do valor presente dos custos (GHOLAMI; RØSTVIK; MÜLLER-EIE, 2019).

Também há a geração de oportunidades de empregos para mão de obra qualificada e não qualificada, tanto no projeto em si, como em áreas relacionadas, ainda que parte desses empregos comumente seja ocupada por trabalhadores de outras localidades. O mercado doméstico de produtos e turismo pode aumentar consideravelmente com a entrada de novos habitantes para trabalhar no projeto, e após a sua conclusão, quando deve receber visitas de pessoas interessadas no modelo apresentado (SILVA; MAGRINI; BRANCO, 2019).

A segunda categoria mais impactada foi a FQ, com um total de 7 impactos. Esses impactos são classificados em 1 +A, 1 +B, 1 -A e 2 -C na fase de implantação e 2 -D distribuídos entre as fases de operação e desativação. As particularidades dos BIPV os tornam especialmente marcantes nessa categoria, uma vez que se destaca o modo construtivo de aproveitamento das estruturas já existentes para sua instalação, a impressão visual gerada, além do risco de contaminação dos compartimentos ambientais.

Por se tratar de uma região semiárida, uma das maiores preocupações é a limitada disponibilidade de recursos hídricos, por isso a necessidade do planejamento estratégico na alocação do sistema (RUDMAN; GAUCHÉ; ESLER, 2017). O embate entre as instalações solares e o uso e qualidade da água decorre de dois fatores: o volume captado para limpeza do sistema, que não é repostado, e a utilização de produtos químicos e solventes no processo de limpeza dos equipamentos, como o ácido clorídrico, ácido nítrico, isopropanol, amônia e hidreto de selênio. Alguns desses compostos são inflamáveis, corrosivos, tóxicos e cancerígenos, necessitando de manuseio especial, uma vez que podem escoar e contaminar o solo, os corpos hídricos próximos e o lençol freático (TAWALBEH *et al.*, 2021). Os impactos potenciais na qualidade da água também podem impactar a saúde e segurança humana, através do uso de água poluída pela população ou na agricultura (VRÎNCEANU *et al.*, 2019).

Durante a fase de implantação é provável que haja emissão de material particulado, devido ao revolvimento do solo no processo construtivo, transporte de equipamentos, bem como aumento no tráfego de veículos na área (SILVA; MAGRINI; BRANCO, 2019). O solo da região é classificado como Luvissole, caracterizado pelo revestimento superficial pedregoso, e normalmente possui uma crosta superficial estreita, além de altos teores de silte, tornando-o altamente susceptíveis a processos erosivos (JACOMINE *et al.*, 1971; SANTOS *et al.*, 2008). Desta forma, partículas do solo podem

facilmente ser carregadas pelo vento, alterando a qualidade do ar e impactando na saúde dos que estiverem em contato (VRÎNCEANU *et al.*, 2019).

Além disso, a depender da disposição da instalação dos painéis solares, podem ocorrer outros embates de natureza econômica e sensitiva. Phillips (2013) afirma que a ocupação do solo pelos sistemas fotovoltaicos, bem como sua estética visual, são altamente impactantes ao projeto, ocasionando conflitos quanto ao uso da terra e interferência no valor econômico. Sacchelli *et al.* (2016) também enfatiza que um problema recorrente relacionado às plantas fotovoltaicas montadas no solo é competição do uso da terra com a produção agrícola. Logo, o BIPV pode servir como agente mitigador dessa situação, uma vez que o posicionamento, o design e o uso de cores são fatores importantes no controle sensitivo e, quando bem arquitetado, o resultado final pode garantir um efeito positivo refletido, inclusive, na valorização do imóvel (GUNERHAN; HEPBASLI; GIRESUNLU, 2008).

Outro ponto importante a ser debatido são os resíduos sólidos gerados nas diversas etapas. A composição dos próprios equipamentos, bem como os produtos de limpeza e purificação das superfícies possuem em suas composições metais pesados e produtos químicos altamente perigosos. Além disso, há a possibilidade de derramamentos de contaminantes, como lubrificantes e óleos, provenientes dos veículos e maquinários (OLOWO *et al.*, 2018; SILVA; BRANCO, 2018). Por isso são importantes as medidas para gerenciamento e destinação adequada desses resíduos.

Durante a vida útil do BIPV, os equipamentos danificados podem ser substituídos por novos de acordo com a necessidade, mantendo o *design* inicial. Já nos casos de desativação total, o suporte pode ser reaproveitado como estrutura para telhados convencionais. Através da reciclagem industrial, cerca de 80% do painel fotovoltaico pode ser reciclado, com uma taxa de recuperação do vidro, cobre e alumínio, respectivamente, de 100%, 85% e 100%, enquanto para os outros materiais, como plástico e placas de circuito, considerados resíduos perigosos, a taxa de reciclagem é de 45,4% (YU *et al.*, 2017).

Entre as categorias SC e BE, o quantitativo de impactos é bastante inferior, comparados com as categorias anteriores: 2 e 1, respectivamente. Seus impactos são apresentados exclusivamente na fase de implantação, sendo 1+D e 1 -A para a categoria SC e 1-C para BE, compreendendo as ações que interferem na qualidade de vida, positiva ou negativamente, nos meios sociocultural e ambiental natural. Nelas são descritas as perturbações à comunidade próxima e às espécies faunísticas e florísticas, durante a fase

de locação do canteiro de obras, deixando de acontecer no momento em que o sistema fotovoltaico entra em operação. Além disso, também é considerado o trabalho de qualificação profissional a ser realizado com os funcionários da obra.

Durante a primeira fase, a implantação, é possível que haja emissão de ruídos em decorrência do aumento do tráfego, bem como da utilização de maquinários, ocasionando elevados níveis de incômodo, perturbação e interferência no sono (SILVA; MAGRINI; BRANCO, 2019), MEYER *et al.*, 2019). Além disso, de acordo com Wu *et al.* (2014), o processo de alocação de um sistema fotovoltaico no solo normalmente envolve remoção da vegetação, abertura de trincheiras para cabos, terraplenagem, dentre outras ações, que podem tornar o solo frágil, propício aos processos de erosão e, conseqüentemente, aumentar a carga de sedimentos nos corpos hídricos próximos (SILVA; MAGRINI; BRANCO, 2019).

Entretanto, o modelo BIPV de instalação exige esse processo de uso e ocupação do solo, pois sua integração depende de uma estrutura já existente. Deste modo, na área de estudo não haverá o deslocamento de terras viáveis que possam ser utilizadas para agricultura, recreação ou habitação, já que o sistema será instalado como cobertura para o estacionamento.

A escolha do BIPV também pode poupar os ecossistemas locais, uma vez que não haverá modificação adicional, fragmentação e perda de seus habitats (VRÎNCEANU *et al.*, 2019). De toda forma, durante a execução do projeto, é possível que animais possam acessar o canteiro de obras e usá-lo como esconderijo, além disso, pássaros e morcegos podem voar e interagir facilmente com as instalações e alguns insetos podem ser atraídos pelo brilho emitido (SILVA; MAGRINI; BRANCO, 2019).

Através do Teste de Shapiro-Wilk foi obtido um p-valor de 0,162, aceitando-se o pressuposto da normalidade definida pela hipótese nula (SHAPIRO; WILK, 1965). No Teste de Levine, o p-valor alcançado foi aproximadamente 0,565, configurando a admissão da hipótese nula, visto que as variâncias são homogêneas quando p-valor > 0,05 (BROWN; FORSYTHE, 1974). Com esses dois testes comprovou-se que todas as condições necessárias para realização do Teste T de Student foram atendidas, uma vez que foi constatada a independência das amostras (KIM, 2015).

A análise dos dados obtidos pelo Teste T de Student mostrou que há diferença significativa entre os valores de ES referentes aos impactos positivos e negativos. A hipótese alternativa (H_1) foi considerada verdadeira, apresentando valores $t(22) = 2,154$ e um p-valor de aproximadamente 0,042, cujo valor é numericamente menor que o $\alpha =$

0,05 (KIM, 2015). Estes resultados apontam que os ES dos impactos positivos são considerados, em média, superiores aos negativos.

Ao observar a Figura 4.7, nota-se uma dispersão de dados maior para os impactos negativos, quando comparados com os positivos, com amplitudes nos valores de 36 e 32, respectivamente. Em relação à distribuição dos dados, constata-se uma distribuição assimétrica dos valores de ES dos impactos avaliados, de modo que os impactos positivos apresentam distribuição assimétrica positiva, por apresentar a parte mais longa da caixa no primeiro quartil e, assimetria negativa, para os impactos negativos, devido a maior parte dos valores estarem distribuídos no terceiro quartil. Além disso, os impactos negativos estão mais distantes da média, enquanto os positivos, mais próximos.

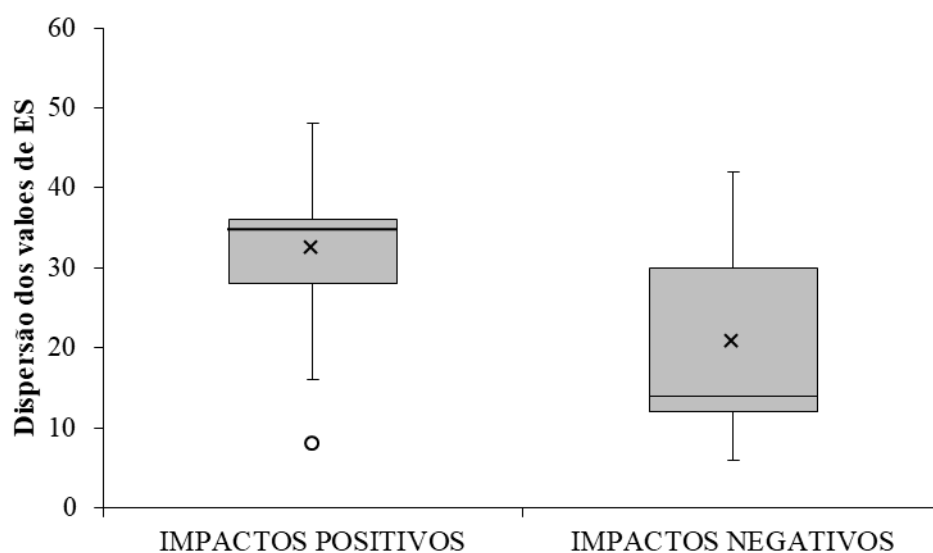


Figura 4.7: Gráfico *box plot* da distribuição dos ES obtidos.

Fonte: Autores (2021).

A utilização do Método de Matrizes de Interação permite analisar alguns critérios considerados para os cálculos dos ES, conforme ilustrado na Figura 8. Em relação à importância da condição, observa-se que os positivos possuem uma distribuição que envolve todos os níveis de importância, principalmente para as áreas imediatamente fora da condição local. Já os negativos estão divididos entre importância para as condições locais e, em sua maioria, imediatamente fora delas.

Dentre os valores atribuídos à magnitude, os impactos positivos causam, essencialmente, mudanças significativas no *status quo*, salvo 3 exceções de pequena mudança e 1 de grande mudança. Já os negativos, de forma semelhante, causam,

sobretudo, mudanças significativas no *status quo*, excetuando-se 3 grandes mudanças e 3 pequenas mudanças.

Com relação à permanência e reversibilidade, os impactos positivos se mostraram majoritariamente permanentes e irreversíveis, enquanto os negativos são, em sua maioria, temporários e reversíveis, sobretudo aqueles decorrentes da alocação do canteiro de obras durante a implantação do projeto. Nos dois grupos, a maioria dos impactos se apresentou de modo não cumulativo, onde apenas 5 impactos positivos foram cumulativos.

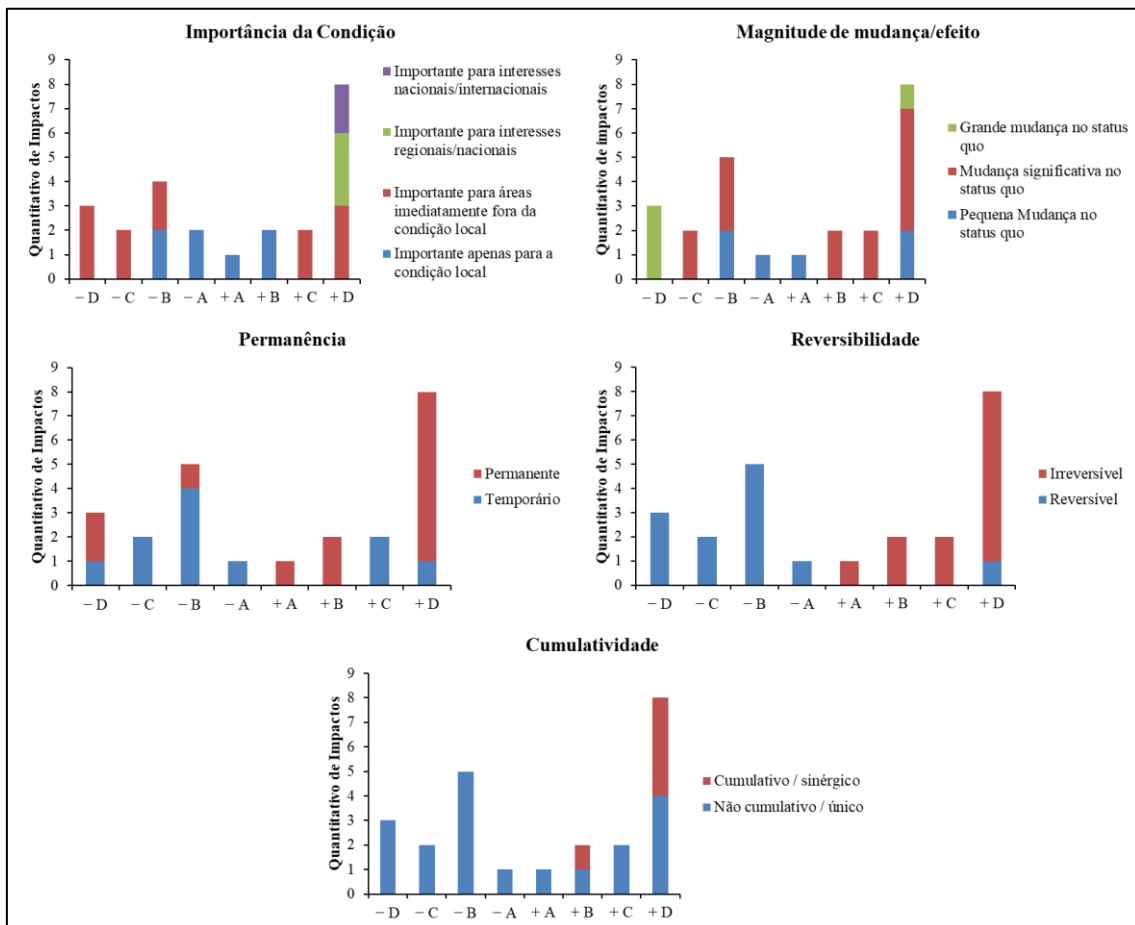


Figura 4.8: Representação dos valores obtidos pelos critérios utilizados na avaliação dos impactos ambientais.

Fonte: Autores (2021).

Muitos desses impactos negativos podem ser mitigados, minimizados e/ou compensados através de medidas de gerenciamento e monitoramento adequados (DHAR *et al.*, 2020). Exemplos destas medidas são os planos de gestão de solo e água, manejo da flora e fauna, gestão de impacto visual e paisagístico, gerenciamento de ruído de construção, gestão da qualidade do ar, gerenciamento de resíduos, dentre outros

(GUERIN, 2017). A escolha cuidadosa e a implementação dessas abordagens de mitigação contribuem para o aumento significativo do desempenho ambiental dos projetos (GHOSH; YADAV; MUKHERJEE, 2019).

4.4 CONCLUSÃO

No total, foram elencados 17 aspectos ambientais e 24 respectivos impactos, dispersos entre as fases de implantação, operação e desativação, e englobando as quatro categorias previstas na metodologia (FQ, BE, SC e EO).

Os aspectos ambientais positivos relacionaram-se, particularmente, ao desenvolvimento econômico, ao aperfeiçoamento da mão de obra e à vertente ambiental. Já os negativos estiveram associados, em especial, à redução da visão da estrutura original, ameaça à segurança dos operários, geração de resíduos e à inserção do canteiro de obras. Através da avaliação realizada foi possível ponderar os efeitos atrelados a cada um deles, bem como o modo que afetam o meio.

Os impactos positivos abrangeram todos os níveis de importância, em sua maioria, causando mudanças significativas no *status quo*, de forma permanente e irreversível. Dentre os principais, elenca-se a geração de turismo científico, geração de emprego, fortalecimento do comércio local, a rentabilidade do projeto e os interesses ambientais.

Enquanto isso, os negativos foram considerados importantes à própria condição local e para as áreas imediatamente fora dela, também ocasionando, principalmente, mudanças significativas no *status quo*, entretanto, temporárias e reversíveis. Os mais notáveis nesse caso foram a possível contaminação do solo e corpos hídricos, a perturbação, afugentamento e risco de acidentes com a fauna e a alteração na qualidade do ar, por material particulado.

Em suma, o BIPV se apresenta como uma solução para o atendimento da demanda elétrica em localidades que enfrentam conflitos de uso e ocupação do solo, devido a sua integração a edifícios ou estruturas. Esta adaptação auxilia a energia fotovoltaica a não desviar das metas de sustentabilidade, por exemplo, através da preservação da biota e serviços ecossistêmicos, que seriam mais afetados caso a planta fotovoltaica fosse instalada no solo, além da redução dos impactos em grande escala em termos de uso do solo e impactos visuais.

Dessa forma, após a avaliação qualitativa e quantitativa dos impactos elencados e a aplicação de testes estatísticos, constatou-se que, em média, o conjunto de ES referentes aos impactos positivos é significativamente superior aos negativos. O desempenho

ambiental do empreendimento ainda pode ser favorecido caso sejam instituídas medidas de mitigação e/ou compensação, bem como o monitoramento adequado.

REFERÊNCIAS

BROWN, M. B.; FORSYTHE, A. B. Robust Tests for the Equality of Variances. **Journal of The American Statistical Association**, [s.l.], v. 69, n. 346, p. 364-367, jun. 1974.

COHEN, J. J.; REICHL, J.; SCHMIDTHALER, M. Re-focussing research efforts on the public acceptance of energy infrastructure: a critical review. **Energy**, [s.l.], v. 76, p. 4-9, nov. 2014.

CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; GASTALDI, M.; STORNELLI, V.. Solar Photovoltaic Panels Combined with Energy Storage in a Residential Building: an economic analysis. **Sustainability**, [s.l.], v. 10, n. 9, p. 3117, 31 ago. 2018.

D'ADAMO, I.; FALCONE, P. M.; GASTALDI, M.; MORONE, P. The economic viability of photovoltaic systems in public buildings: evidence from Italy. **Energy**, [s.l.], v. 207, p. 118316, set. 2020.

DHAR, A.; NAETH, M. A.; JENNINGS, P. D.; EL-DIN, M. G. Perspectives on environmental impacts and a land reclamation strategy for solar and wind energy systems. **Science of the Total Environment**, [s.l.], v. 718, p. 134602-13462, maio 2020.

FERNANDO, A. L.; COSTA, J.; BARBOSA, B.; MONTI, A.; RETTENMAIER, N. Environmental impact assessment of perennial crops cultivation on marginal soils in the Mediterranean Region. **Biomass and Bioenergy**, [s.l.], v. 111, p. 174-186, abr. 2018.

GARRAÍN, D.; HERRERA, I.; RODRÍGUEZ-SERRANO, I.; LECHÓN, Y.; HEPBASLI, A.; ARAZ, M.; BIYIK, E.; YAO, R.; SHAHRESTANI, M.; ESSAH, E.; SHAO, L.; RICO, E.; LECHON, J. L.; OLIVEIRA, A. C. Sustainability indicators of a naturally ventilated photovoltaic façade system. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 266, p. 121946-121960, set. 2020.

GHOLAMI, H.; RØSTVIK, H. N.; MÜLLER-EIE, D. Holistic economic analysis of building integrated photovoltaics (BIPV) system: case studies evaluation. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 203, p. 109461-109472, nov. 2019.

GHOSH, S.; YADAV, V. K.; MUKHERJEE, V. Impact of environmental factors on photovoltaic performance and their mitigation strategies—A holistic review. **Renewable Energy Focus**, [s.l.], v. 28, p. 153-172, mar. 2019.

GUERIN, T. A case study identifying and mitigating the environmental and community impacts from construction of a utility-scale solar photovoltaic power plant in eastern Australia. **Solar Energy**, [s.l.], v. 146, p. 94-104, abr. 2017.

GUNERHAN, H.; HEPBASLI, A.; GIRESUNLU, U. Environmental Impacts from the Solar Energy Systems. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and**

Environmental Effects, [s.l.], v. 31, n. 2, p. 131-138, 2 dez. 2008.

HADIAN, S.; MADANI, K. A system of systems approach to energy sustainability assessment: are all renewables really green?. **Ecological Indicators**, [s.l.], v. 52, p. 194-206, maio 2015.

HERNANDEZ, R. R.; EASTER, S. B.; MURPHY-MARISCAL, M. L.; MAESTRE, F. T.; TAVASSOLI, M.; ALLEN, E. B.; BARROWS, C. W.; BELNAP, J.; OCHOA-HUESO, R.; RAVI, S. Environmental impacts of utility-scale solar energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 29, p. 766-779, jan. 2014.

HIRBODI, K.; ENJAVI-ARSANJANI, M.; YAGHOUBI, M. Techno-economic assessment and environmental impact of concentrating solar power plants in Iran. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 120, p. 109642-109669, mar. 2020.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Brasil**: Mapa Político do Brasil. 2018. Disponível em: <https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#mapa220344> Acesso em: 15 abr. 2020

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Brasil**: Rio Grande do Norte - Malha municipal. 2018. Disponível em: <https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#mapa219377> Acesso em: 15 abr. 2020

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pau dos Ferros – RN**. 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rn/pau-dos-ferros.html>. Acesso em: 05 de mai de 2020.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais climatológicas do Brasil**. 2021. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 01 mar. 2021.

IZADI, N.; ATAIEI, P.; KARIMI-GOUGHARI, H.; NOROUZI, A. Environmental Impact Assessment of Construction of Water Pumping Station in Bacheh Bazar Plain: a case from Iran. **International Journal of Environmental Quality**, Bologna, v. 35, n. 4, p. 13-32, out. 2019.

JACOMINE, P. K. T.; SILVA, F. B. R. e; FORMIGA, R. A.; ALMEIDA, J. C.; BELTRÃO, V. de A.; PESSOA, S. C. P.; FERREIRA, R. C. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado do Rio Grande do Norte**. Rio de Janeiro: Divisão de Pesquisa Pedológica, 1971. 531 p.

JENNICHES, S.; WORRELL, E. Regional economic and environmental impacts of renewable energy developments: solar PV in the Aachen region. **Energy for Sustainable Development**, [s.l.], v. 48, p. 11-24, fev. 2019.

KELLY, C.; SEN, B.; TATARI, O. A system dynamics analysis of the alternative roofing market and its potential impacts on urban environmental problems: a case study in Orlando, Florida. **Resources, Conservation and Recycling**, [s.l.], v. 153, p. 104556, fev. 2020.

KIM, T. K. T test as a parametric statistic. **Korean Journal of Anesthesiology**, [s.l.], v.

68, n. 6, p. 540-546, 2015.

KLUGMANN-RADZIEMSKA, E.; KUCZYŃSKA-ŁAŚEWSKA, A. The use of recycled semiconductor material in crystalline silicon photovoltaic modules production - A life cycle assessment of environmental impacts. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, [s.l.], v. 205, p. 110259-110268, fev. 2020.

KORONEOS, C. J.; NANAKI, E. A. Life cycle environmental impact assessment of a solar water heater. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 37, p. 154-161, dez. 2012.

MAANI, T.; CELIK, I.; HEBEN, M. J.; ELLINGSON, R. J.; APUL, D. Environmental impacts of recycling crystalline silicon (c-SI) and cadmium telluride (CDTE) solar panels. **Science of the Total Environment**, [s.l.], v. 735, p. 138827-138838, set. 2020.

MAHMUD, M.; HUDA, N.; FARJANA, S.; LANG, C. Environmental Impacts of Solar-Photovoltaic and Solar-Thermal Systems with Life-Cycle Assessment. **Energies**, [s.l.], v. 11, n. 9, p. 2346-2367, 5 set. 2018.

MEYER, R.; BENETTO, E.; MAUNY, F.; LAVANDIER, C. Characterization of damages from road traffic noise in life cycle impact assessment: a method based on emission and propagation models. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 231, p. 121-131, set. 2019.

MICHAEL, J. J.; SELVARASAN, I. Economic analysis and environmental impact of flat plate roof mounted solar energy systems. **Solar Energy**, [s.l.], v. 142, p. 159-170, jan. 2017.

NAHVI, A.; DAGHIGHI, A.; NAZIF, S. The environmental impact assessment of drainage systems: a case study of the karun river sugarcane development project. **Archives of Agronomy and Soil Science**, [s.l.], v. 64, n. 2, p. 185-195, 22 jun. 2017.

OLOWU, T.; SUNDARARAJAN, A.; MOGHADDAMI, M.; SARWAT, A. Future Challenges and Mitigation Methods for High Photovoltaic Penetration: a survey. **Energies**, [s.l.], v. 11, n. 7, p. 1782-1814, 6 jul. 2018.

ORCAN, F. Parametric or Non-parametric: skewness to test normality for mean comparison. **International Journal of Assessment Tools in Education**, [s.l.], p. 236-246, 10 jun. 2020.

PACESILA, M.; BURCEA, S. G.; COLESCA, S. E. Analysis of renewable energies in European Union. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 56, p. 156-170, abr. 2016.

PANDIS, N. Comparison of 2 means (independent z test or independent t test). **American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics**, [s.l.], v. 148, n. 2, p. 350-351, ago. 2015.

PASTAKIA, C. M. R.; JENSEN, A. The rapid impact assessment matrix (RIAM) for EIA. **Environmental Impact Assessment Review**, [s.l.], v. 18, n. 5, p. 461-482, set. 1998.

PHILLIPS, J. Determining the sustainability of large-scale photovoltaic solar power

- plants. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 27, p. 435-444, nov. 2013.
- PORTAL SOLAR. **Enova**. 2020. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/fornecedores/empresa-s-de-energia-solar/maranhao/sao-luis/enova>. Acesso em: 26 dez. 2020.
- RUDMAN, J.; GAUCHÉ, P.; ESLER, K. J. Direct environmental impacts of solar power in two arid biomes: an initial investigation. **South African Journal of Science**, [s.l.], v. 113, n. 11/12, p. 1-13, 29 nov. 2017.
- SACCHELLI, S.; GAREGNANI, G.; GERI, F.; GRILLI, G.; PALETTO, A.; ZAMBELLI, P.; CIOLLI, M.; VETTORATO, D.. Trade-off between photovoltaic systems installation and agricultural practices on arable lands: an environmental and socio-economic impact analysis for Italy. **Land Use Policy**, [s.l.], v. 56, p. 90-99, nov. 2016.
- SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. Á. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Distrito Federal: Embrapa, 2008. 355 p.
- SARUPRIA, M.; MANJARE, S. D.; GIRAP, M. Environmental impact assessment studies for mining area in Goa, India, using the new approach. **Environmental Monitoring and Assessment**, [s.l.], v. 191, n. 1, p. 1-17, 12 dez. 2018.
- SCOGNAMIGLIO, A. 'Photovoltaic landscapes': design and assessment. a critical review for a new transdisciplinary design vision. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 55, p. 629-661, mar. 2016.
- SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B.. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). **Biometrika**, [s.l.], v. 52, n. 3/4, p. 591-611, dez. 1965.
- SILVA, G. D. P. da; BRANCO, D. A. C. Is floating photovoltaic better than conventional photovoltaic? Assessing environmental impacts. **Impact Assessment and Project Appraisal**, [s.l.], v. 36, n. 5, p. 390-400, 28 maio 2018.
- SILVA, G. D. P. da; MAGRINI, A.; BRANCO, D. A. C. A multicriteria proposal for large-scale solar photovoltaic impact assessment. **Impact Assessment and Project Appraisal**, [s.l.], v. 38, n. 1, p. 3-15, 26 abr. 2019.
- TAWALBEH, M.; AL-OTHTMAN, A.; KAFIAH, F.; ABDELSALAM, E.; ALMOMANI, F.; ALKASRAWI, M. Environmental impacts of solar photovoltaic systems: a critical review of recent progress and future outlook. **Science of The Total Environment**, [s.l.], v. 759, p. 143528-143540, mar. 2021.
- VRÎNCEANU, A.; GRIGORESCU, I.; DUMITRAȘCU, M.; MOCANU, I.; DUMITRICĂ, C.; MICU, D.; KUCSICSA, G.; MITRICĂ, B. Impacts of Photovoltaic Farms on the Environment in the Romanian Plain. **Energies**, [s.l.], v. 12, n. 13, p. 2533-2551, 1 jul. 2019.
- WU, Z.; HOU, A.; CHANG, C.; HUANG, X.; SHI, D.; WANG, Z. Environmental impacts of large-scale CSP plants in northwestern China. **Environmental Science: Processes Impacts**, [s.l.], v. 16, n. 10, p. 2432-2441, 2014.

YU, Z.; M. A. W.; XIE, K.; LV, G.; CHEN, Z.; WU, J.; YU, J. Life cycle assessment of grid-connected power generation from metallurgical route multi-crystalline silicon photovoltaic system in China. **Applied Energy**, [s.l.], v. 185, p. 68-81, jan. 2017.

ZAIONTZ, C. **Real Statistics**. 2021. Disponível em: <https://www.real-statistics.com/free-download/>. Acesso em: 12 mar. 2021.

CAPÍTULO 5

ARTIGO: COMPARAÇÃO AMBIENTAL ENTRE SISTEMA FOTOVOLTAICO CONVENCIONAL E SEMITRANSARENTE

5.1 INTRODUÇÃO

Mesmo com a influência negativa das mudanças climáticas sobre as matrizes de energias renováveis (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC, 2014), a utilização de algumas fontes, como a solar e a eólica, ainda são uma estratégia amplamente aplicada para reduzir as emissões dos gases intensificadores do efeito estufa na atmosfera (QUEIROZ *et al.*, 2016).

De acordo com o princípio do efeito fotovoltaico, as células fotovoltaicas convertem a luz solar em eletricidade (MAGRASSI *et al.*, 2019). Este efeito ocorre devido à composição das células serem de materiais semicondutores, que permitem o fluxo de elétrons e que são liberados à medida que os fótons da luz solar são absorvidos pelo material (HUSAIN *et al.*, 2018).

O painel fotovoltaico semitransparente é uma tecnologia que vem sendo inserida no mercado de energia solar fotovoltaica. Os módulos fotovoltaicos semitransparentes diferem dos módulos fotovoltaicos convencionais, porque desempenham papéis multifuncionais. Além da geração elétrica, funcionam como elementos na construção civil, podendo ser aplicados em vidros e janelas, garantindo um design inovador (PARK *et al.*, 2010; WONG *et al.*, 2008). A translucidez facilita a inserção da radiação solar através do painel, estimulando o uso da luz solar durante o dia (WONG *et al.*, 2008). A irradiância solar, a temperatura, o sombreamento, o ângulo de instalação e a orientação dos módulos fotovoltaicos são fatores importantes a serem considerados no momento da instalação, pois a eficiência elétrica do painel fotovoltaico semitransparente pode ser altamente afetada (PARK *et al.*, 2010).

A energia solar fotovoltaica em si é considerada uma energia limpa, mas por outro lado, os materiais utilizados na produção dos painéis podem gerar impactos negativos (WU *et al.*, 2017), como o silício, vidro, metais, sistemas de cabos e equipamentos interligados ao painel. O impacto ambiental do silício na fabricação das células fotovoltaicas é elevado porque o processo metalúrgico para purificação tem uma alta demanda de energia (KLUGMANN-RADZIEMSKA, 2020). Além do impacto da produção do silício, outro ponto importante é o estágio de descarte, podendo ser menos danoso ao meio ambiente através da reciclagem ou da reutilização (KLUGMANN-RADZIEMSKA, 2020). A partir da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é possível quantificar o desempenho e os impactos negativos relacionados a um produto, processo ou serviço (GERBINET; BELBOOM; LÉONARD, 2014; WU *et al.*, 2017).

Considerando a crescente demanda do uso de painéis fotovoltaicos e os potenciais

impactos atribuídos, desde a sua produção até o momento do seu funcionamento, o desenvolvimento de ACVs é necessário para quantificar os impactos ambientais associados ao atendimento de demandas elétricas. O objetivo deste trabalho foi comparar a pegada de carbono, calculada por meio da ACV, de um sistema fotovoltaico convencional e um sistema fotovoltaico semitransparente, compreendendo um Sistema Fotovoltaico Integrado à Construção, do inglês, *Building Integrated Photovoltaic* – BIPV, avaliando seus fatores de emissão.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1 Avaliação de Ciclo de Vida

A ACV é uma metodologia recomendada para estudar os aspectos ambientais e os potenciais impactos associados a um produto, bem ou serviço por meio da elaboração de um inventário de recursos (entradas e saídas de matéria e energia), assim como a avaliação dos impactos ambientais relacionados e da interpretação dos resultados com base no objetivo do estudo (MENOUI; CHEMISANA; ROSELL, 2013).

A Organização Internacional para Padronização (International Organization for Standardization – ISO), em sua série 14000 (2006), estabelece que a ACV pode auxiliar na manutenção do equilíbrio e proteção ambiental, prevenindo a poluição e os problemas que esses poderiam trazer para a sociedade e economia. De acordo com as especificações das ISO 14040 (2006) e 14044 (2006), um estudo de ACV é composto por quatro fases: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos, e interpretação.

O escopo de uma ACV, incluindo a fronteira do sistema e o nível de detalhamento, depende do objeto e do uso pretendido para o estudo. A profundidade e a abrangência da ACV podem variar consideravelmente, dependendo do objetivo do estudo em particular, de acordo com a ISO 14040 (2006). O objeto de estudo refere-se a um sistema solar fotovoltaico com geração plena atendendo a demanda energética de 386 kWh/dia e uma potência mínima de 65 kWp, correspondente à demanda energética da área externa do Complexo Turístico Serrote do Jatobá, na cidade de Pau dos Ferros, no estado do Rio Grande do Norte, Brasil.

A fase de análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) é a segunda fase de uma ACV. Trata-se de um inventário dos dados de entradas e saídas associados ao sistema em estudo. Essa fase envolve a coleta dos dados necessários para o alcance dos objetivos do estudo em questão (ISO 14040, 2006). Para produção dos inventários utilizados a seguir,

realizou-se uma pesquisa bibliográfica, identificando o tipo e as quantidades dos materiais presentes em dois sistemas fotovoltaicos dimensionados e suas respectivas superfícies de fixação.

Este trabalho abrange os sistemas de captação, ou seja, os painéis fotovoltaicos e seu suporte. Não foram analisados inversores, cabos e sistemas de proteção, uma vez que estão presentes e são iguais em ambos os sistemas.

A terceira fase da ACV, prevista na ISO 14040 (2006), é a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV). O objetivo da AICV é prover informações adicionais para ajudar na avaliação dos resultados do ICV de um sistema de produto, visando ao melhor entendimento de sua significância ambiental. O foco desta avaliação é a comparação da pegada de carbono de um sistema fotovoltaico semitransparente e um convencional, dimensionados para suprir a mesma demanda energética.

A interpretação do ciclo de vida é o último procedimento da ACV, na qual os resultados de um ICV e/ou de uma AICV são sumarizados e discutidos como base para conclusões, recomendações e tomada de decisão de acordo com a definição de objetivo e escopo (ISO 14040, 2006).

Para a realização deste estudo, utilizou-se o software SimaPro versão 9.0.0.49 (PRÉCONSULTANTS, 2019), que fornece uma estrutura profissional para compilar, avaliar e acompanhar as consequências ambientais do objeto de estudo, modelado e analisado de acordo com as normas e recomendações das séries ISO 14040 e 14044. A base de dados Ecoinvent versão 3.5 (ECOINVENT, 2018) foi utilizada como a principal base de informações da ACV, que inclui dados de energia, transporte, construção, produtos químicos, papel e celulose, tratamento de resíduos agrícola, etc.

Existem diversas formas de mensurar impactos ambientais, dentre as quais, optou-se em analisar as alterações climáticas, pois esse desequilíbrio ambiental proporciona uma visão rápida, simplificada e mais fiável (ROYO *et al.*, 2016). As emissões de gases de efeito estufa, conhecidas como pegada de carbono, possuem uma faixa geográfica global e são quantificadas ao longo de um horizonte de 100 anos, agrupadas em dióxido de carbono equivalente (CO₂-eq) (IPCC, 2013).

Para finalizar, calculou-se o Fator de Emissão (FE), expresso na Equação 5.1 como a razão entre a pegada de carbono (kg CO₂-eq) e a geração de eletricidade (kWh) (WHITAKER *et al.*, 2012).

$$FE = \frac{GPW}{G} \therefore \left[\frac{g \text{ CO}_2 - eq}{kWh} \right] \quad (5.1)$$

Será realizada uma comparação entre o FE de dois sistemas fotovoltaicos, um convencional e um semitransparente - BIPV, permitindo avaliar o nível de emissão de cada um deles para atender a demanda energética de um segmento do Complexo Turístico Serrote do Jatobá.

5.2.2 Descrição dos sistemas

A compilação do inventário do sistema convencional foi baseada no trabalho de Carvalho *et al.* (2019) que avaliaram um sistema fotovoltaico com a utilização de painéis planos policristalinos com uma estrutura de fixação no telhado em alumínio, conforme ilustrado na Figura 5.1, entretanto realizou-se uma adaptação para alumínio reciclado, gerando condições mais similares e igualitárias entre ambos os cenários.



Figura 5.1: Representação do modelo convencional com sistema de fixação e composição.

Fonte: Adaptado de Portal Solar (2020)

O sistema BIPV foi baseado no estudo de Perez *et al.* (2012), composto por painéis solares constituídos de 131 células monocristalinas AstroPower AP-105 de 1.988 WDC, 127x127 mm² de área, com espessura de 300 μm e pesando 12,4 g cada, como representado na Figura 5.2.

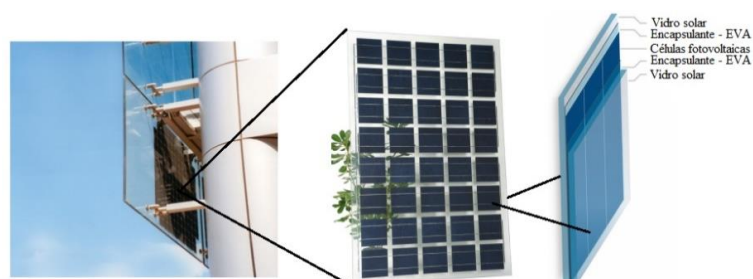


Figura 5.2: Representação do modelo semitransparente com sistema de fixação e composição.

Fonte: Adaptado de Solar Innova (2020)

Considerou-se, para esse dimensionamento, valores da radiação solar no local, obtidos através do mapa solarimétrico do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito – CRESESB, revelando um valor de Horas de Sol Pleno (HSP) de $5,94 \frac{kWh}{m^2.dia}$ (CRESESB, 2017). O HSP representa a linearidade entre a produção de energia e a irradiação horária, expressando o valor da energia solar acumulada ao longo de um dia e refletindo o número de horas o qual a irradiância solar permanece igual a 1.000 W/m^2 (PINHO; GALDINO, 2014)

Os inventários e as informações dos sistemas painéis fotovoltaicos estão mostrados nas Tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1: Composição material do sistema fotovoltaico convencional.

Descrição	Painel Convencional		
Quantidade de painéis	250		
Potência (Wp)	260		
Área requerida (m ²)	468		
Vida útil (anos)	25		
Composição dos painéis	Item	Valor Unitário	Valor Total
	Vidro solar (kg)	17,130	4.282,500
	Filme de polivinilfluoreto (kg)	0,187	46,750
	Célula fotovoltaica (multi-Si) (m ²)	1,700	486,000
	Liga de alumínio (kg)	4,470	1.117,500
	Cobre (kg)	0,190	47,500
	Etilvinilacetato (kg)	1,700	425,000
	Plástico com reforço de fibra de vidro (kg)	0,319	79,625
Composição da fixação	Liga de alumínio reciclado (kg)	2,635	658,750
	Liga de alumínio (kg)	0,465	116,250
	Aço (baixa liga) (kg)	0,280	70,000
	Polietileno de alta densidade (kg)	2,020	505,000

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

Tabela 5.2: Composição material do sistema fotovoltaico semitransparente.

Descrição	Painel Semitransparente		
Quantidade de painéis	250		
Potência (Wp)	260		
Área requerida (m ²)	688		
Vida útil (anos)	30		
Composição dos painéis	Item	Valor Unitário	Valor Total
	Vidro solar (kg)	40,085	10.021,250
	EVA Photocap (kg)	2,480	620,000
	Célula fotovoltaica (mono-Si) (m ²)	2,113	528,225
	Cobre (kg)	0,081	20,250
	Estanho (kg)	0,005	1,250
	Solda por imersão - Estanho (kg)	0,001	0,250
	Solda por imersão - Chumbo (kg)	0,001	0,250
	EVA (100- μm de espessura) (kg)	0,017	4,250
	Poliéster (125- μm de espessura) (kg)	0,032	8,000

Composição da fixação	Fluoreto de polivinila (kg)	0,006	1,500
	Camada adesiva (12- μ m de espessura) (kg)	0,002	0,500
	Fibra de vidro (kg)	4,230	1.057,500
	Resina fenol-ureia-formaldeído (kg)	0,350	87,500
	Liga de alumínio reciclado (kg)	19,650	4.912,500
	Liga de alumínio (kg)	3,468	866,912

Fonte: Adaptado de Perez *et al.* (2012).

Existe uma diferença entre as áreas requeridas para os dois sistemas, causada pelo tamanho dos painéis, uma vez que para os semitransparentes alcançarem uma potência semelhante aos convencionais, é exigido um número maior de células fotovoltaicas e, conseqüentemente, uma maior superfície, o que também explica a maior quantidade de vidro solar utilizado em sua confecção. Para as bases de fixação, optou-se por utilizar 85% de material reciclado.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 5.3 mostra a pegada de carbono para os dois sistemas fotovoltaicos, além de seus valores associados com a vida útil individual e o Fator de Emissão (FE) relacionado com a capacidade de geração elétrica de 386 kWh/dia.

Tabela 5.3: Pegada de carbono: sistema fotovoltaico convencional vs. BIPV.

	Pegada de carbono (kgCO₂-eq)	Pegada de carbono anual (kgCO₂-eq/ano)	FE (kgCO₂-eq/kWh.dia⁻¹)
Convencional	90.565,04	3.622,60	9,38
BIPV	81.784,00	2.726,13	7,06

Fonte: Autores (2020)

O FE é um parâmetro essencial na avaliação dos impactos associados às etapas estudadas (TURCONI; BOLDRIN; ASTRUP, 2013), por isso se faz necessária uma ACV detalhada dos processos de fabricação e funcionamento dos sistemas fotovoltaicos, no caso desta pesquisa. O FE total retrata o produto de cada entrada de energia ou material pelos seus respectivos fatores de emissão individual (VARUN; BHAT; PRAKASH, 2009).

Estimou-se também a contribuição de cada material para a pegada de carbono total de ambos os sistemas fotovoltaicos, bem como seus processos associados. A pegada de carbono anual é utilizada como forma de comparação entre os resultados, pois é associada entre a proporcionalidade dos valores com suas vidas úteis (BUENO; HOYOS; CAPELLÁN-PÉREZ, 2017). Em decorrência da grande variação dos resultados, alguns

se tornaram irrisórios comparados aos outros, como pode ser visto nas Figuras 5.3 e 5.4, onde observa-se que as células fotovoltaicas representam 93% e 99% de toda a carga de carbono dos sistemas estudados, respectivamente.

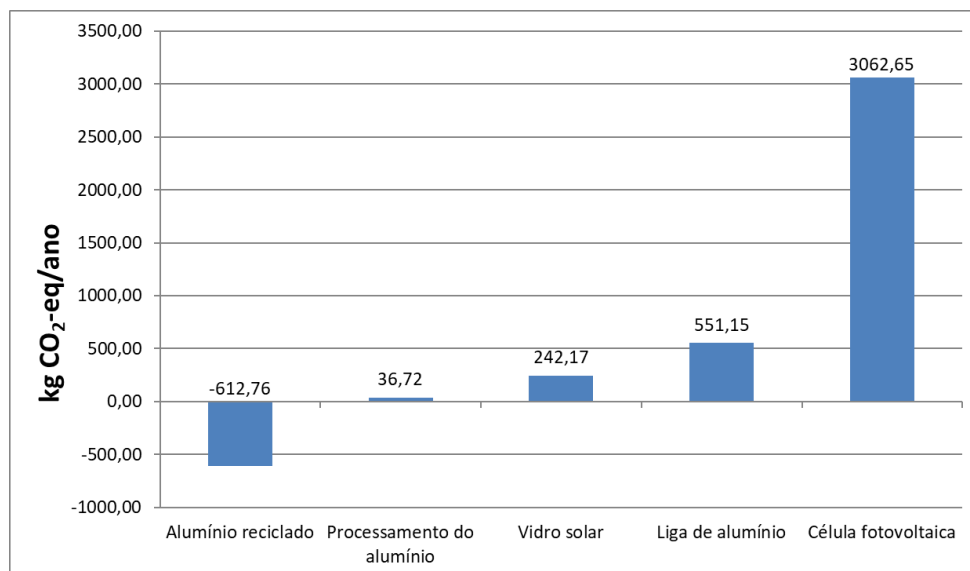


Figura 5.3: Pegada de carbono individual GWP 100a - Painel convencional.

Fonte: Autores (2020)

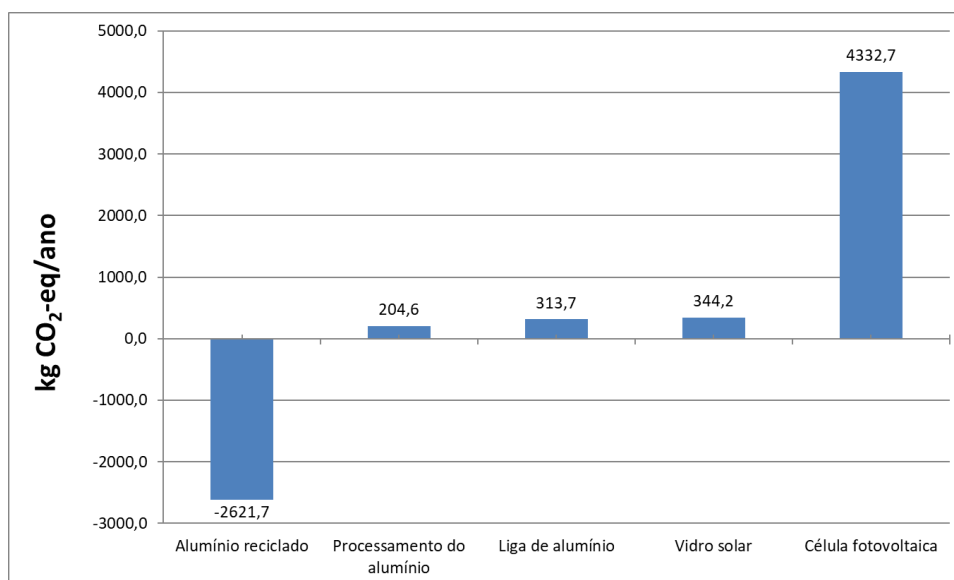


Figura 5.4: Pegada de carbono individual GWP 100a - Painel semitransparente.

Fonte: Autores (2020)

Verifica-se que as células fotovoltaicas são responsáveis pela maior contribuição para a pegada de carbono total. Isso traz à tona o impacto ambiental significativo decorrente da extração da matéria prima, processamento e utilização desses

equipamentos, principalmente quando se atenta a grande quantidade de células utilizadas nos sistemas fotovoltaicos (MENOUI; CHEMISANA; ROSELL, 2013). Os resultados encontrados se assemelham ao estudo de Wild-Scholten (2013), que concluiu que nos sistemas, mono-Si e multi-Si, toda o trabalho com a matéria prima, desde a extração do silício até a utilização do produto, é responsável pela maior colaboração na contabilização da pegada de carbono.

Outro importante contribuinte para a pegada de carbono é o vidro solar. No sistema semitransparente, a quantidade de vidro é consideravelmente maior por causa das suas dimensões, uma vez que possui um número maior de células e espaços entre elas, por onde a luz se propaga. O maior responsável por esses números são os insumos, onde a produção das chapas de vidro representa cerca de 79% da pegada de carbono, atribuída ao uso intenso de energia e liberação de CO₂, além das perdas e quebras do cotidiano (PARK; HENGEVOSS; WITTKOPF, 2018). Na pesquisa de Ludin *et al.* (2018), a fabricação dos substratos de vidro foi responsável pelo maior consumo de energia de toda ACV, levando o autor a sugerir a substituição do vidro por uma cobertura de polímero que reduziria a energia consumida em 150 MJ/m².

Os estudos de HONG *et al.* (2016) corroboram com os resultados encontrados, uma vez que os valores de CO₂-eq obtidos nesse trabalho são majoritariamente oriundos da produção de células fotovoltaicas seguido da extração e processamento do alumínio. Nos estudos do berço ao túmulo do alumínio estima-se que a energia primária constitui a maior fonte de emissões de CO₂, contabilizando, junto com as operações de mineração, 50% do total acumulado (CIACCI *et al.*, 2014).

A grande quantidade de alumínio utilizado nos sistemas aumenta significativamente a necessidade de energia, contribuindo entre 15 a 25% do consumo e promovendo a indicação de sua substituição ou redução na produção dos módulos; no caso dos módulos semitransparentes, a dispensa das molduras gera uma diminuição expressiva no consumo energético. (LUDIN *et al.*, 2018).

Para atender a demanda de mercado, a indústria de processamento de alumínio passou por adaptações, substituindo o material primário (manufaturado) por secundário (reciclado). Na Itália, por exemplo, de 1947 a 2009, mais de 60% da produção nacional de alumínio foi proveniente de matéria-prima secundária (CIACCI *et al.*, 2014).

Os resultados das Figuras 5.3 e 5.4 indicaram que a utilização de 85% de alumínio reciclado nas bases de fixação rendeu um abono significativo na carga ambiental gerada, contribuindo para o melhoramento da eficiência energética. Dados apontam que energia

consumida por uma usina de processamento de alumínio virgem se compara à energia fornecida por uma unidade de usina nuclear (maior que 1 GW) (HONG *et al.*, 2016; CLUZEL *et al.*, 2013)

O efeito da abordagem de substituição total ou parcial de material primário por secundário pode ser avaliada a partir da comparação dos créditos ambientais. Essa metodologia é baseada na métrica da demanda acumulada de energia, onde o ganho marginal é dado pela diferença entre a energia usada para reciclar o material e sua produção primária. No caso do alumínio, por exemplo, o valor da demanda acumulada de energia para o material virgem é de 194 mJ/kg, já a do reciclado é de 23,8 mJ/kg resultando em um impacto líquido de -170,2 mJ/kg. Os valores negativos indicam um ganho ambiental (GALA; RAUGEI; FULLANA-I-PALMER, 2015). Acredita-se que a depender da finalidade e arranjo da edificação, a transparência do painel possa contribuir ainda mais com a eficiência energética, pela menor dependência do uso da iluminação artificial (ALRASHIDI *et al.*, 2020).

A partir de simulações realizadas, atestou-se que, caso não houvesse a substituição dessa porcentagem da liga de alumínio por alumínio reciclado, o valor da pegada de carbono dos sistemas convencional e semitransparente atingiriam 4.660 kg CO₂-eq/ano e 7.133 kg CO₂-eq/ano, onde houve um acréscimo de 28,6% e 161,7%, respectivamente. Estes valores condizem com as discussões anteriores, onde a utilização de alumínio virgem aumenta consideravelmente o consumo de energia e, conseqüentemente, a pegada de carbono total, além da ausência do ganho ambiental equivalente. A quantidade de alumínio utilizada para suporte do sistema semitransparente resultou em uma diferença colossal entre os valores de pegada de carbono, validando a importância da reciclagem desse metal (LUDIN *et al.*, 2018).

Os índices unitários de CO₂-eq dos materiais restantes representam uma parcela pequena no contexto geral. Os impactos destes foram determinados como ínfimos, sem afetar significativamente os resultados, portanto não foram aprofundados neste estudo. Entretanto, as emissões de gases de efeito estufa contribuem para o aquecimento global. Dessa forma, é recomendado sempre buscar por novos materiais e tecnologias que impactem cada vez menos o meio ambiente, pois esse ajuste na estrutura energética implica diretamente em um grande potencial de redução de carbono (DONG *et al.*, 2013).

5.4 CONCLUSÕES

A ACV é uma metodologia desenvolvida especialmente para avaliação dos

impactos ambientais relacionados a fabricação e/ou a utilização de algum produto ou serviço, realizada através do levantamento de dados em todas as fases do ciclo de vida do objeto de estudo. Os fluxos de matéria e energia, envolvidos na etapa de fabricação e posteriores, atingem o meio ambiente dos mais diversos modos, como é o caso das emissões de gases de efeito estufa. Dessa forma, a ACV permite avaliar quais os danos e/ou benefícios, de maneira quantitativa, promovendo melhorias aos processos produtivos.

Ao identificar a pegada de carbono de cada sistema fotovoltaico analisado foi possível definir, numericamente, que o sistema semitransparente apresentou melhores valores quando comparada ao sistema convencional. Ou seja, indica um menor impacto ambiental, viabilizado principalmente pelo uso de grande parte de alumínio reciclado em sua estrutura de fixação o qual gerou créditos de carbono relevantes ao ser avaliado seu ganho ambiental.

Diante disso, por meio dos resultados interpretados e discutidos, é perceptível que a contribuição quantitativa de carbono de ambos os sistemas é influenciada, principalmente, pelas células fotovoltaicas, vidro solar e o alumínio, desde a concepção destes materiais até o funcionamento dos painéis fotovoltaicos.

REFERÊNCIAS

ALRASHIDI, H.; ISSA, W.; SELLAMI, N.; GHOSH, A.; MALLICK, T. K.; SUNDARAM, S. Performance assessment of cadmium telluride-based semi-transparent glazing for power saving in façade buildings. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 215, p. 109585, maio 2020.

BUENO, G.; HOYOS, D.; CAPELLÁN-PÉREZ, I. Evaluating the environmental performance of the high speed rail project in the Basque Country, Spain. **Research in Transportation Economics**, [s.l.], v. 62, p.44-56, jun. 2017.

CARVALHO, M.; MENEZES, V. L.; GOMES, K. C.; PINHEIRO, R. Carbon footprint associated with a mono-Si cell photovoltaic ceramic roof tile system. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, 2019.

CRESESB (Org.). **Potencial Solar: SunData v 3.0**. 2017. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>. Acesso em: 22 nov. 2019.

DONG, H. *et al.* Carbon footprint evaluation at industrial park level: A hybrid life cycle assessment approach. **Energy Policy**, [s.l.], v. 57, p.298-307, jun. 2013.

ECOINVENT. **Database, version 3.5**. 2018. Disponível em: <http://www.ecoinvent.ch>. Acesso em: 10 dez. 2019.

GALA, A. B.; RAUGEI, M.; FULLANA-I-PALMER, P. Introducing a new method for

calculating the environmental credits of end-of-life material recovery in attributional LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [s.l.], v. 20, n. 5, p.645-654, 17 fev. 2015.

GERBINET, S.; BELBOOM, S.; LÉONARD, A. Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 747–753, 2014.

HUSAIN, A. A. F. *et al.* A review of transparent solar photovoltaic technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, n. January 2017, p. 779–791, 2018.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Report Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Cambridge University Press, NY, USA, 1535 p. 2013.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Cambridge University Press; 2014.

ISO 14000. **Environmental Management System**. International Standard Organization, Geneva, Switzerland. 2006.

ISO 14040. **Environmental management – life cycle assessment – principles and framework**. International Standard Organization, Geneva, Switzerland. 2006.

ISO 14044. **Environmental management – life cycle assessment – requirements and guidelines**. International Standard Organization, Geneva, Switzerland. 2006.

KLUGMANN-RADZIEMSKA, E. **Solar Energy Materials and Solar Cells The use of recycled semiconductor material in crystalline silicon photovoltaic modules production** - A life cycle assessment of environmental impacts. v. 205, n.8, 2020.

LUDIN, N. A. *et al.* Prospects of life cycle assessment of renewable energy from solar photovoltaic technologies: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 96, p.11-28, nov. 2018.

PRÉCONSULTANTS. **Simapro software**. 2019. Disponível em: <https://simapro.com/>. Acesso em: 10 dez 2019.

MAGRASSI, F. *et al.* Hybrid solar power system versus photovoltaic plant: A comparative analysis through a life cycle approach. **Renewable Energy**, v. 130, p. 290–304, 2019.

MENOUFI, K.; CHEMISANA, D.; ROSELL, J. I. Life Cycle Assessment of a Building Integrated Concentrated Photovoltaic scheme. **Applied Energy**, [s.l.], v. 111, p.505-514, nov. 2013.

PARK, J.; HENGEVOSS, D.; WITTKOPF, S. Industrial Data-Based Life Cycle Assessment of Architecturally Integrated Glass-Glass Photovoltaics. **Buildings**, [s.l.], v. 9, n. 1, p.8-26, 29 dez. 2018.

PEREZ, M. J. R.; FTHENAKIS, V.; KIM, H.; Pereira, A. O. Façade-integrated photovoltaics: a life cycle and performance assessment case study. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, [s.l.], v. 20, n. 8, p.975-990, 9 jan. 2012.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. 2014. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em: 05 dez. 2019.

QUEIROZ, A. R. DE *et al.* Climate change impacts in the energy supply of the Brazilian hydro-dominant power system. **Renewable Energy**, v. 99, p. 379–389, 2016.

ROYO, P.; FERREIRA, V. J.; LÓPEZ-SABIRÓN, A. M.; FERREIRA, G. Hybrid diagnosis to characterise the energy and environmental enhancement of photovoltaic modules using smart materials. **Energy**, [s.l.], v. 101, p.174-189, abr. 2016.

TURCONI, R.; BOLDRIN, A.; ASTRUP, T. Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 28, p.555-565, dez. 2013.

VARUN; BHAT, I.k.; PRAKASH, R. LCA of renewable energy for electricity generation systems—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 13, n. 5, p.1067-1073, jun. 2009.

WHITAKER, M.; HEATH, G. A.; O'DONOUGHUE, P.; VORUM, M. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Coal-Fired Electricity Generation. **Journal of Industrial Ecology**, [s.l.], v. 16, p.53-72, abr. 2012.

WILD-SCHOLTEN, M. J. de. Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, [s.l.], v. 119, p.296-305, dez. 2013.

WONG, P. W. *et al.* Semi-transparent PV: Thermal performance, power generation, daylight modelling and energy saving potential in a residential application. **Renewable Energy**, v. 33, n. 5, p. 1024–1036, 2008.

WU, P. *et al.* Review on Life Cycle Assessment of Energy Payback of Solar Photovoltaic Systems and a Case Study. **Energy Procedia**, v. 105, p. 68–74, 2017.

ZHANG, T.; WANG, M.; YANG, H. A Review of the Energy Performance and Life-Cycle Assessment of Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) Systems. **Energies**, [s.l.], v. 11, n. 11, p.3157-3262, 14 nov. 2018.

CAPÍTULO 6
CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos estudos desenvolvidos no âmbito desta dissertação foi possível chegar às seguintes considerações:

Por se tratar de uma tecnologia para aproveitamento de energia renovável, o BIPV é considerado um aliado na mitigação às mudanças climáticas. Este trabalho investigou a relação entre o uso desse modelo de implantação de energia fotovoltaica e sua consonância com os conceitos da sustentabilidade. Foram estudadas as dinâmicas de pesquisa sobre o tema, a viabilidade econômica de sua implantação, os impactos ambientais associados e a sua contribuição de emissão de gases do efeito estufa. Tal modelo se apresentou como uma tendência em desenvolvimento de pesquisas, com caráter multidisciplinar, de ocorrência mundial, e que necessita de melhores políticas públicas de incentivo à sua disseminação.

Confrontando dois modelos de sistemas fotovoltaicos, um BIPV e um convencional, foi verificado que apesar de possuir um maior valor de investimento e menor retorno de VPL, o BIPV assegura uma resposta positiva quanto aos lucros. Além disso, sua versatilidade proporciona uma melhor adaptação ao local de instalação, prevenindo alguns impactos ambientais recorrentes no método convencional, e sua composição material simplificada proporciona um menor fator de emissão de gases de efeito estufa, concluindo que seu valor ultrapassa as barreiras do capital e possui um fluxo holístico entre os pilares da sustentabilidade, os conceitos de *design*, controle sensível e segurança energética.

A hipótese da análise econômica atestou a viabilidade da implantação dos dois modelos de sistemas fotovoltaicos (BIPV e convencional) em cidades determinadas para abranger os tipos climáticos predominantes no Brasil, de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, sobretudo no município de Pau dos Ferros-RN. Os resultados expressaram a influência das características climáticas no desempenho e na aplicabilidade dos sistemas.

A Avaliação de Impactos Ambientais englobou 17 aspectos ambientais e 24 respectivos impactos, referentes às fases de implantação, operação e desativação do sistema BIPV proposto. Os impactos positivos associaram-se, especialmente, à categoria Econômico/Operacional. Por outro lado, os negativos referiram-se, principalmente, a Físico/Químico. O teste estatístico aplicado apontou a amostra das pontuações dos impactos positivos como significativamente superior aos negativos.

Em virtude dos aspectos mencionados, observou-se também a importância da utilização da ACV como mecanismo de cálculo de pegada de carbono para auxílio das

conclusões quantitativas e qualitativas dos resultados da análise dos sistemas. Observou-se que a contribuição de carbono de ambos os sistemas é influenciada, principalmente, pelas células fotovoltaicas, vidro solar e o alumínio. Constatou-se, por fim, a influência da incorporação do processo de reciclagem no ciclo de vida do produto, tanto no aproveitamento para fabricação quanto para descarte.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE TODA
A DISSERTAÇÃO**

ABDALLAH, T.; DIABAT, A.; RIGTER, J. Investigating the option of installing small scale PVs on facility rooftops in a green supply chain. **International Journal of Production Economics**, [s.l.], v. 146, n. 2, p. 465-477, dez. 2013.

ABINEE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA. **Propostas para inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica Brasileira**. 2012. Disponível em: <http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/profotov.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2020.

AGRAWAL, B.; TIWARI, G. N. Life cycle cost assessment of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) systems. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 42, n. 9, p. 1472-1481, set. 2010.

AHMAD, I.; AHMAD, B.; BOOTE, K.; HOOGENBOOM, G. Adaptation strategies for maize production under climate change for semi-arid environments. **European Journal of Agronomy**, [s.l.], v. 115, p. 126040, abr. 2020.

ALNASER, N. W.; FLANAGAN, R.; ALNASER, W. E. Model for calculating the sustainable building index (SBI) in the kingdom of Bahrain. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 40, n. 11, p. 2037-2043, jan. 2008.

ALNASER, N.W.; FLANAGAN, R.; ALNASER, W. E. Potential of making—Over to sustainable buildings in the Kingdom of Bahrain. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 40, n. 7, p. 1304-1323, jan. 2008.

ALRASHIDI, H.; ISSA, W.; SELLAMI, N.; GHOSH, A.; MALLICK, T. K.; SUNDARAM, S. Performance assessment of cadmium telluride-based semi-transparent glazing for power saving in façade buildings. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 215, p. 109585, maio 2020.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [s.l.], v. 22, n. 6, p. 711-728, 1 dez. 2013.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 482/2012**. 2012. 13p.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Empresas de Energia Elétrica Nacionais**. 2020. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/link/DefaultDetail.cfm?idLinkCategoria=14>. Acesso em: 24 abr. 2020.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Incidência de ICMS nas tarifas de energia elétrica**. 2020. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjA0ZjQxZjItMDI4Ni00NWY0LThlZjUtNjVkNTY3ZmMzNmZnMwIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYU90NDZhMj05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBiMSIsImMiOiR9>. Acesso em: 17 set. 2020.

ARISTIZÁBAL, A. J.; PÁEZ, C. A. Power quality analysis of 6 kW building-integrated photovoltaic system and economic evaluation using RETScreenTM. **International Journal of Ambient Energy**, [s.l.], v. 39, n. 8, p. 813-822, 21 jul. 2017.

ASAE, S. R.; NIKOOFARD, S.; UGURSAL, V. I.; BEAUSOLEIL-MORRISON, I.

Techno-economic assessment of photovoltaic (PV) and building integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) system retrofits in the Canadian housing stock. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 152, p. 667-679, out. 2017.

ASCENCIO-VÁSQUEZ, J.; BRECL, K.; TOPIČ, M. Methodology of Köppen-Geiger-Photovoltaic climate classification and implications to worldwide mapping of PV system performance. **Solar Energy**, [s.l.], v. 191, p. 672-685, out. 2019.

ASDRUBALI, F.; BURATTI, C.; COTANA, F.; BALDINELLI, G.; GORETTI, M.; MORETTI, E.; BALDASSARRI, C.; BELLONI, E.; BIANCHI, F.; ROTILI, A. Evaluation of Green Buildings' Overall Performance through in Situ Monitoring and Simulations. **Energies**, [s.l.], v. 6, n. 12, p. 6525-6547, 17 dez. 2013.

AZEVÊDO, R. de O.; ROTELA JUNIOR, P.; ROCHA, L. C. S.; CHICCO, G.; AQUILA, G.; PERUCHI, R. S. Identification and Analysis of Impact Factors on the Economic Feasibility of Photovoltaic Energy Investments. **Sustainability**, [s.l.], v. 12, n. 17, p. 7173-7213, 2 set. 2020.

BEZERRA, M. C. da C.; GOHR, C. F.; MORIOKA, S. N. Organizational capabilities towards corporate sustainability benefits: a systematic literature review and an integrative framework proposal. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 247, p. 119114-119132, fev. 2020.

BIANCHINI, A.; GAMBUTI, M.; PELLEGRINI, M.; SACCANI, C. Performance analysis and economic assessment of different photovoltaic technologies based on experimental measurements. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 85, p. 1-11, jan. 2016.

BONOMO, P.; FRONTINI, F.; BERARDINIS, P. D; DONSANTE, I. BIPV: building envelope solutions in a multi-criteria approach. A method for assessing life-cycle costs in the early design phase. **Advances in Building Energy Research**, [s.l.], v. 11, n. 1, p. 104-129, 30 mar. 2016.

BP - BRITISH PETROLEUM. **BP Statistical Review of World Energy 2019**. 68. ed. Londres: BP p.l.c., 2019. 64 p.

BROWN, M, B.; FORSYTHE, A. B. Robust Tests for the Equality of Variances. **Journal of The American Statistical Association**, [s.l.], v. 69, n. 346, p. 364-367, jun. 1974.

BUENO, G.; HOYOS, D.; CAPELLÁN-PÉREZ, I. Evaluating the environmental performance of the high speed rail project in the Basque Country, Spain. **Research in Transportation Economics**, [s.l.], v. 62, p.44-56, jun. 2017.

CALISE, F.; CAPPIELLO, F. L.; D'ACCADIA, M. D.; VICIDOMINI, M. Dynamic simulation, energy and economic comparison between BIPV and BIPVT collectors coupled with micro-wind turbines. **Energy**, [s.l.], v. 191, p. 116439-116484, jan. 2020.

CARSTENS, D. D. dos S.; CUNHA, S. K. da. Challenges and opportunities for the growth of solar photovoltaic energy in Brazil. **Energy Policy**, [s.l.], v. 125, p. 396-404, fev. 2019.

CARVALHO, F. I. A. de; ABREU, M. C. S. de; CORREIA NETO, J. F. Financial alternatives to enable distributed microgeneration projects with photovoltaic solar power.

- RAM. Revista de Administração Mackenzie**, [s.l.], v. 18, n. 1, p. 120-147, fev. 2017.
- CARVALHO, M.; MENEZES, V. L.; GOMES, K. C.; PINHEIRO, R. Carbon footprint associated with a mono-Si cell photovoltaic ceramic roof tile system. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, 2019.
- CASTALDO, V. L.; PIGLIAUTILE, I.; ROSSO, F.; COTANA, F.; GIORGIO, F. de; PISELLO, A. L. How subjective and non-physical parameters affect occupants' environmental comfort perception. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 178, p. 107-129, nov. 2018.
- CHEL, A.; TIWARI, G. N.; CHANDRA, A. Simplified method of sizing and life cycle cost assessment of building integrated photovoltaic system. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 41, n. 11, p. 1172-1180, nov. 2009.
- COHEN, J. J.; REICHL, J.; SCHMIDTHALER, M. Re-focussing research efforts on the public acceptance of energy infrastructure: a critical review. **Energy**, [s.l.], v. 76, p. 4-9, nov. 2014.
- CORRIA, M. E.; COBAS, V. M.; LORA, E. S. Perspectives of Stirling engines use for distributed generation in Brazil. **Energy Policy**, [s.l.], v. 34, n. 18, p. 3402-3408, dez. 2006
- CRAWFORD, R. H; TRELOAR, G. J.; FULLER, R. J.; BAZILIAN, M. Life-cycle energy analysis of building integrated photovoltaic systems (BiPVs) with heat recovery unit. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 10, n. 6, p. 559-575, dez. 2006.
- CRESESB (Org.). **Potencial Solar: SunData v 3.0**. 2017. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>. Acesso em: 22 nov. 2019.
- CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; GASTALDI, M.; KOH, S.C. Lenny. Renewable energy options for buildings: performance evaluations of integrated photovoltaic systems. **Energy and Buildings**, [S.L.], v. 55, p. 208-217, dez. 2012.
- CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; GASTALDI, M.; STORNELLI, V. Solar Photovoltaic Panels Combined with Energy Storage in a Residential Building: an economic analysis. **Sustainability**, [s.l.], v. 10, n. 9, p. 3117, 31 ago. 2018.
- CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; KOH, S. C. L. Environmental and economic analysis of building integrated photovoltaic systems in Italian regions. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 98, p. 241-252, jul. 2015.
- CUCE, E.; CUCE, P. M.; BALI, T. An experimental analysis of illumination intensity and temperature dependency of photovoltaic cell parameters. **Applied Energy**, [s.l.], v. 111, p. 374-382, nov. 2013.
- CUI, Y.; ZHU, J.; MENG, F.; ZORAS, S.; MCKECHNIE, J.; CHU, J. Energy assessment and economic sensitivity analysis of a grid-connected photovoltaic system. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 150, p. 101-115, maio 2020.
- D'ADAMO, I.; FALCONE, P. M.; GASTALDI, M.; MORONE, P. The economic

viability of photovoltaic systems in public buildings: evidence from Italy. **Energy**, [s.l.], v. 207, p. 118316, set. 2020.

DEHKORDI, E. R.; KARIMI, A.; KARIMI, R.; BEYGI, M. A. Sustainable design for airport terminals, by integrated photovoltaic (PV) system (adopting bench-marking approach). **International Journal of Green Energy**, [s.l.], v. 16, n. 15, p. 1611-1616, 19 out. 2019.

DHAR, A.; NAETH, M. A.; JENNINGS, P. D.; EL-DIN, M. G. Perspectives on environmental impacts and a land reclamation strategy for solar and wind energy systems. **Science of the Total Environment**, [s.l.], v. 718, p. 134602-13462, maio 2020.

DONG, H. *et al.* Carbon footprint evaluation at industrial park level: A hybrid life cycle assessment approach. **Energy Policy**, [s.l.], v. 57, p.298-307, jun. 2013.

ECHEGARAY, F. Understanding stakeholders' views and support for solar energy in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 63, p. 125-133, jan. 2014.

ECOINVENT. **Database, version 3.5**. 2018. Disponível em: <http://www.ecoinvent.ch>. Acesso em: 10 dez. 2019.

ELIBOL, E., ÖZMEN, Ö.T., TUTKUN, N., KÖYSAL, O. Outdoor performance analysis of different PV panel types. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 67, p. 651-661, jan. 2017.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. MME – Ministério de Minas e Energia. **Balçoço Energético Nacional**. Rio de Janeiro: EPE, 2019. 67 p.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. MME – Ministério de Minas e Energia. **NOTA TÉCNICA DEA 016/2019** - Modelo de Mercado da Micro e Minigeração Distribuída (4MD). Rio de Janeiro: EPE, 2019. 26 p. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-423/topico-488/NT_Metodologia_4MD_PDE_2029.pdf. Acesso em: 03 nov 2020.

EVOLA, G.; MARGANI, G. Renovation of apartment blocks with BIPV: energy and economic evaluation in temperate climate. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 130, p. 794-810, out. 2016.

FARGHALY, Y.; HASSAN, F. A Simulated Study of Building Integrated Photovoltaics (BIPV) as an Approach for Energy Retrofit in Buildings. **Energies**, [s.l.], v. 12, n. 20, p. 3946, 17 out. 2019.

FARIAS-ROCHA, A. P.; HASSAN, K. M. K.; MALIMATA, J. R. R.; SÁNCHEZ-CUBEDO, G. A.; ROJAS-SOLÓRZANO, L. R. Solar photovoltaic policy review and economic analysis for on-grid residential installations in the Philippines. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 223, p. 45-56, jun. 2019.

FERNANDO, A. L.; COSTA, J.; BARBOSA, B.; MONTI, A.; RETTENMAIER, N. Environmental impact assessment of perennial crops cultivation on marginal soils in the Mediterranean Region. **Biomass and Bioenergy**, [s.l.], v. 111, p. 174-186, abr. 2018.

FOUAD, M. M.; SHIHATA, L. A.; MORGAN, E. I. An integrated review of factors

influencing the performance of photovoltaic panels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 80, p. 1499-1511, dez. 2017.

GALA, A. B.; RAUGEI, M.; FULLANA-I-PALMER, P. Introducing a new method for calculating the environmental credits of end-of-life material recovery in attributional LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [s.l.], v. 20, n. 5, p.645-654, 17 fev. 2015.

GARRAÍN, D.; HERRERA, I.; RODRÍGUEZ-SERRANO, I.; LECHÓN, Y.; HEPBASLI, A.; ARAZ, M.; BIYIK, E.; YAO, R.; SHAHRESTANI, M.; ESSAH, E.; SHAO, L.; RICO, E.; LECHON, J. L.; OLIVEIRA, A. C. Sustainability indicators of a naturally ventilated photovoltaic façade system. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 266, p. 121946-121960, set. 2020.

GERBINET, S.; BELBOOM, S.; LÉONARD, A. Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 747–753, 2014.

GHOLAMI, H.; RØSTVIK, H. N.; MÜLLER-EIE, D. Holistic economic analysis of building integrated photovoltaics (BIPV) system: case studies evaluation. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 203, p. 109461-109472, nov. 2019.

GHOSH, A.; SARMAH, N.; SUNDARAM, S.; MALLICK, T. K. Numerical studies of thermal comfort for semi-transparent building integrated photovoltaic (BIPV)-vacuum glazing system. **Solar Energy**, [s.l.], v. 190, p. 608-616, set. 2019.

GHOSH, S.; YADAV, V. K.; MUKHERJEE, V. Impact of environmental factors on photovoltaic performance and their mitigation strategies—A holistic review. **Renewable Energy Focus**, [s.l.], v. 28, p. 153-172, mar. 2019.

GOOGLE. **Google Earth Pro**. 2019. Disponível em: <https://www.google.com.br/earth/download/gep/agree.html>. Acesso em: 10 maio 2020.

GUERIN, T. A case study identifying and mitigating the environmental and community impacts from construction of a utility-scale solar photovoltaic power plant in eastern Australia. **Solar Energy**, [s.l.], v. 146, p. 94-104, abr. 2017.

GUNERHAN, H.; HEPBASLI, A.; GIRESUNLU, U. Environmental Impacts from the Solar Energy Systems. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, [s.l.], v. 31, n. 2, p. 131-138, 2 dez. 2008.

GUPTA, N.; TIWARI, G. N. Energy Matrices of Building Integrated Photovoltaic Thermal Systems: case study. **Journal of Architectural Engineering**, [s.l.], v. 23, n. 4, p. 05017006, dez. 2017.

HADIAN, S.; MADANI, K. A system of systems approach to energy sustainability assessment: are all renewables really green?. **Ecological Indicators**, [s.l.], v. 52, p. 194-206, maio 2015.

HAM-BALOYI, W. T.; JORDAN, P. Systematic review as a research method in post-graduate nursing education. **Health SA Gesondheid**, [s.l.], v. 21, p. 120-128, dez. 2016.

HAMMOND, G. P.; HARAJLI, H. A.; JONES, C. I.; WINNETT, A. B. Integrated appraisal of a building integrated photovoltaic (BIPV) system. **International Conference on Sustainable Power Generation and Supply**, [s.l.], p. 1-9, abr. 2009.

HAN, X.; ZHANG, H.; YU, X.; WANG, L. Economic evaluation of grid-connected micro-grid system with photovoltaic and energy storage under different investment and financing models. **Applied Energy**, [s.l.], v. 184, p. 103-118, dez. 2016.

HERNANDEZ, R. R.; EASTER, S. B.; MURPHY-MARISCAL, M. L.; MAESTRE, F. T.; TAVASSOLI, M.; ALLEN, E. B.; BARROWS, C. W.; BELNAP, J.; OCHOA-HUESO, R.; RAVI, S. Environmental impacts of utility-scale solar energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 29, p. 766-779, jan. 2014.

HIRBODI, K.; ENJAVI-ARSANJANI, M.; YAGHOUBI, M. Techno-economic assessment and environmental impact of concentrating solar power plants in Iran. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 120, p. 109642-109669, mar. 2020.

HONG, T.; KOO, C.; OH, J.; JEONG, K. Nonlinearity analysis of the shading effect on the technical-economic performance of the building-integrated photovoltaic blind. **Applied Energy**, [s.l.], v. 194, p. 467-480, maio 2017.

HUSAIN, A. A. F. *et al.* A review of transparent solar photovoltaic technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, n. January 2017, p. 779–791, 2018.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Brasil**: Mapa Político do Brasil. 2018. Disponível em: <https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#mapa220344> Acesso em: 15 abr. 2020

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Brasil**: Rio Grande do Norte - Malha municipal. 2018. Disponível em: <https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#mapa219377> Acesso em: 15 abr. 2020

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Brasil**: Unidades da Federação. 2018. Disponível em: <https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#mapa220344>. Acesso em: 23 abr. 2020

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pau dos Ferros – RN**. 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rn/pau-dos-ferros.html>. Acesso em: 05 de mai de 2020.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **BDMEP** - Dados Históricos. 2019. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>. Acesso em: 25 abr. 2020.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais climatológicas do Brasil**. 2021. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 01 mar. 2021.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Cambridge University Press; 2014.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Report Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Cambridge University Press, NY, USA, 1535 p. 2013.

IRSHAD, K.; HABIB, K.; ALGARNI, S.; SAHA, B. B.; JAMIL, B. Sizing and life-cycle assessment of building integrated thermoelectric air cooling and photovoltaic wall system. **Applied Thermal Engineering**, [s.l.], v. 154, p. 302-314, maio 2019.

ISO 14000. **Environmental Management System**. International Standard Organization, Geneva, Switzerland. 2006.

ISO 14040. **Environmental management – life cycle assessment – principles and framework**. International Standard Organization, Geneva, Switzerland. 2006.

ISO 14044. **Environmental management – life cycle assessment – requirements and guidelines**. International Standard Organization, Geneva, Switzerland. 2006.

IZADI, N.; ATAELI, P.; KARIMI-GOUGHERI, H.; NOROUZI, A. Environmental Impact Assessment of Construction of Water Pumping Station in Bacheh Bazar Plain: a case from Iran. **International Journal of Environmental Quality**, Bologna, v. 35, n. 4, p. 13-32, out. 2019.

JACOMINE, P. K. T.; SILVA, F. B. R. e; FORMIGA, R. A.; ALMEIDA, J. C.; BELTRÃO, V. de A.; PESSOA, S. C. P.; FERREIRA, R. C. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado do Rio Grande do Norte**. Rio de Janeiro: Divisão de Pesquisa Pedológica, 1971. 531 p.

JAHANFAR, A.; SLEEP, B.; DRAKE, J. Energy and Carbon-Emission Analysis of Integrated Green-Roof Photovoltaic Systems: probabilistic approach. **Journal of Infrastructure Systems**, [s.l.], v. 24, n. 1, p. 04017044, mar. 2018.

JENNICHES, S.; WORRELL, E. Regional economic and environmental impacts of renewable energy developments: solar PV in the Aachen region. **Energy for Sustainable Development**, [s.l.], v. 48, p. 11-24, fev. 2019.

JHA, A.; TRIPATHY, P.P. Heat transfer modeling and performance evaluation of photovoltaic system in different seasonal and climatic conditions. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 135, p. 856-865, maio 2019.

KELLY, C.; SEN, B.; TATARI, O. A system dynamics analysis of the alternative roofing market and its potential impacts on urban environmental problems: a case study in Orlando, Florida. **Resources, Conservation and Recycling**, [s.l.], v. 153, p. 104556, fev. 2020.

KEOLEIAN, G. A.; LEWIS, G. M. Modeling the life cycle energy and environmental performance of amorphous silicon BIPV roofing in the US. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 28, n. 2, p. 271-293, fev. 2003.

KIM, T. K. T test as a parametric statistic. **Korean Journal of Anesthesiology**, [s.l.], v. 68, n. 6, p. 540-546, 2015.

KITTNER, N.; GHEEWALA, S. H.; KAMENS, R. M. An environmental life cycle comparison of single-crystalline and amorphous-silicon thin-film photovoltaic systems in

Thailand. **Energy for Sustainable Development**, [s.l.], v. 17, n. 6, p. 605-614, dez. 2013.

KLUGMANN-RADZIEMSKA, E. **Solar Energy Materials and Solar Cells The use of recycled semiconductor material in crystalline silicon photovoltaic modules production** - A life cycle assessment of environmental impacts. v. 205, n.8, 2020.

KLUGMANN-RADZIEMSKA, E.; KUCZYŃSKA-ŁAŚEWSKA, A. The use of recycled semiconductor material in crystalline silicon photovoltaic modules production - A life cycle assessment of environmental impacts. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, [s.l.], v. 205, p. 110259-110268, fev. 2020.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Handbuch der Klimatologie**. (Eds.). Berlin: Editora Gebrüder Borntraeger, 1936. v.1, parte C, p. 44.

KORONEOS, C. J.; NANAKI, E. A. Life cycle environmental impact assessment of a solar water heater. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 37, p. 154-161, dez. 2012.

KOTHARI, C. R. **Research methodology: methods and techniques**. 2. ed. Nova Delhi: New Age International Limited, 2004. 414 p.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, [s.l.], v. 15, n. 3, p. 259-263, 10 jul. 2006.

KOURKOUMPAS, D.; BENEKOS, G.; NIKOLOPOULOS, N.; KARELLAS, S.; GRAMMELIS, P.; KAKARAS, E. A review of key environmental and energy performance indicators for the case of renewable energy systems when integrated with storage solutions. **Applied Energy**, [s.l.], v. 231, p. 380-398, dez. 2018.

KRISTJANSDOTTIR, T. F.; GOOD, C. S.; INMAN, M. R.; SCHLANBUSCH, R. D.; ANDRESEN, I. Embodied greenhouse gas emissions from PV systems in Norwegian residential Zero Emission Pilot Buildings. **Solar Energy**, [s.l.], v. 133, p. 155-171, ago. 2016.

LAMNATOU, C.; BAIG, H.; CHEMISANA, D.; MALLICK, T. K. Dielectric-based 3D building-integrated concentrating photovoltaic modules: an environmental life-cycle assessment. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 138, p. 514-525, mar. 2017.

LAMNATOU, C.; BAIG, H.; CHEMISANA, D.; MALLICK, T. k. Environmental assessment of a building-integrated linear dielectric-based concentrating photovoltaic according to multiple life-cycle indicators. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 131, p. 773-784, set. 2016.

LAMNATOU, C.; BAIG, H.; CHEMISANA, D.; MALLICK, T. K. Life cycle energy analysis and embodied carbon of a linear dielectric-based concentrating photovoltaic appropriate for building-integrated applications. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 107, p. 366-375, nov. 2015.

LAMNATOU, C.; CHEMISANA, D. Photovoltaic/thermal (PVT) systems: a review with emphasis on environmental issues. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 105, p. 270-287, maio 2017.

LAMNATOU, C.; NOTTON, G.; CHEMISANA, D.; CRISTOFARI, C. Storage systems

for building-integrated photovoltaic (BIPV) and building-integrated photovoltaic/thermal (BIPVT) installations: environmental profile and other aspects. **Science of The Total Environment**, [s.l.], v. 699, p. 134269, jan. 2020.

LAMNATOU, C.; SMYTH, M.; CHEMISANA, D. Building-Integrated Photovoltaic/Thermal (BIPVT): Ica of a façade-integrated prototype and issues about human health, ecosystems, resources. **Science of The Total Environment**, [s.l.], v. 660, p. 1576-1592, abr. 2019.

LEVY, Y.; ELLIS, T. J. A system approach to conduct na effective literature review in suport of information systems research. **Informing Science Journal**, v. 9, p. 181-212, 2006.

LI, D. D. W.; CHOW, S. K. H.; LEE, E. W. M. An analysis of a medium size grid-connected building integrated photovoltaic (BIPV) system using measured data. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 60, p. 383-387, maio 2013.

LI, D. H. W.; YANG, L.; LAM, J. C. Zero energy buildings and sustainable development implications – A review. **Energy**, [s.l.], v. 54, p. 1-10, jun. 2013.

LI, H.; AN, H.; WANG, Y.; HUANG, J.; GAO, X. Evolutionary features of academic articles co-keyword network and keywords co-occurrence network: based on two-mode affiliation network. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, [s.l.], v. 450, p. 657-669, maio 2016.

LI, T.; ROSKILLY, A. P.; WANG, Y. Life cycle sustainability assessment of grid-connected photovoltaic power generation: a case study of northeast england. **Applied Energy**, [s.l.], v. 227, p. 465-479, out. 2018.

LI, X.; STREZOV, V. Energy and Greenhouse Gas Emission Assessment of Conventional and Solar Assisted Air Conditioning Systems. **Sustainability**, [s.l.], v. 7, n. 11, p. 14710-14728, 3 nov. 2015.

LU, L.; YANG, H. X. Environmental payback time analysis of a roof-mounted building-integrated photovoltaic (BIPV) system in Hong Kong. **Applied Energy**, [s.l.], v. 87, n. 12, p. 3625-3631, dez. 2010.

LUDIN, N. A. *et al.* Prospects of life cycle assessment of renewable energy from solar photovoltaic technologies: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 96, p.11-28, nov. 2018.

MAANI, T.; CELIK, I.; HEBEN, M. J.; ELLINGSON, R. J.; APUL, D. Environmental impacts of recycling crystalline silicon (c-SI) and cadmium telluride (CDTE) solar panels. **Science of the Total Environment**, [s.l.], v. 735, p. 138827-138838, set. 2020.

MAGRASSI, F. *et al.* Hybrid solar power system versus photovoltaic plant: A comparative analysis through a life cycle approach. **Renewable Energy**, v. 130, p. 290–304, 2019.

MAHMUD, M.; HUDA, N.; FARJANA, S.; LANG, C. Environmental Impacts of Solar-Photovoltaic and Solar-Thermal Systems with Life-Cycle Assessment. **Energies**, [s.l.], v. 11, n. 9, p. 2346-2367, 5 set. 2018.

MANGIERO, G. A.; KRATEN, M. NPV Sensitivity Analysis: a dynamic excel approach. **American Journal of Business Education**, [s.l.], v. 10, n. 3, p. 113-126, 30 jun. 2017

MENDIS, T.; HUANG, Z.; XU, S.; ZHANG, W. Economic potential analysis of photovoltaic integrated shading strategies on commercial building facades in urban blocks: a case study of colombo, sri lanka. **Energy**, [s.l.], v. 194, p. 116908, mar. 2020.

MENOUEFI, K.; CHEMISANA, D.; ROSELL, J. I. Life Cycle Assessment of a Building Integrated Concentrated Photovoltaic scheme. **Applied Energy**, [s.l.], v. 111, p. 505-514, nov. 2013.

MEYER, R.; BENETTO, E.; MAUNY, F.; LAVANDIER, C. Characterization of damages from road traffic noise in life cycle impact assessment: a method based on emission and propagation models. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 231, p. 121-131, set. 2019.

MICHAEL, J. J.; SELVARASAN, I. Economic analysis and environmental impact of flat plate roof mounted solar energy systems. **Solar Energy**, [s.l.], v. 142, p. 159-170, jan. 2017.

MINITAB (EUA). **Minitab® Statistical Software**. 2021. Disponível em: <https://www.minitab.com/pt-br/>. Acesso em: 19 jun. 2021.

MIRZAEI, M.; MOHIABADI, M. Z. A comparative analysis of long-term field test of monocrystalline and polycrystalline PV power generation in semi-arid climate conditions. **Energy For Sustainable Development**, [s.l.], v. 38, p. 93-101, jun. 2017.

MONTOYA, F. G.; BAÑOS, R.; MEROÑO, J. E.; MANZANO-AGUGLIARO, F. The research of water use in Spain. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 112, p. 4719-4732, jan. 2016.

NAHVI, A.; DAGHIGHI, A; NAZIF, S. The environmental impact assessment of drainage systems: a case study of the karun river sugarcane development project. **Archives of Agronomy and Soil Science**, [s.l.], v. 64, n. 2, p. 185-195, 22 jun. 2017.

NG, P. K.; MITHRARATNE, N. Lifetime performance of semi-transparent building-integrated photovoltaic (BIPV) glazing systems in the tropics. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 31, p. 736-745, mar. 2014.

OH, J.; KOO, C.; HONG, T.; J., K.; LEE, M. An economic impact analysis of residential progressive electricity tariffs in implementing the building-integrated photovoltaic blind using an advanced finite element model. **Applied Energy**, [s.l.], v. 202, p. 259-274, set. 2017.

OLIVER, M.; JACKSON, T. The evolution of economic and environmental cost for crystalline silicon photovoltaics. **Energy Policy**, [s.l.], v. 28, n. 14, p. 1011-1021, nov. 2000.

OLOWU, T.; SUNDARARAJAN, A.; MOGHADDAMI, M.; SARWAT, A. Future Challenges and Mitigation Methods for High Photovoltaic Penetration: a survey. **Energies**, [s.l.], v. 11, n. 7, p. 1782-1814, 6 jul. 2018.

ORACLE. **Crystal Ball**. Disponível em: <https://www.oracle.com/br/applications/crystalball/>. Acesso em: 25 abr. 2020.

ORCAN, F. Parametric or Non-parametric: skewness to test normality for mean comparison. **International Journal of Assessment Tools in Education**, [s.l.], p. 236-246, 10 jun. 2020.

PACESILA, M.; BURCEA, S. G.; COLESCA, S. E. Analysis of renewable energies in European Union. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 56, p. 156-170, abr. 2016.

PALACIOS-JAIMES, G. Y.; MARTÍN-RAMOS, P.; REY-MARTÍNEZ, F. J.; FERNÁNDEZ-COPPEL, I. A. Transformation of a University Lecture Hall in Valladolid (Spain) into a NZEB: lca of a bipv system integrated in its façade. **International Journal of Photoenergy**, [s.l.], v. 2017, p. 1-11, 2017.

PANDIS, N. Comparison of 2 means (independent z test or independent t test). **American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics**, [s.l.], v. 148, n. 2, p. 350-351, ago. 2015.

PARK, J.; HENGEVOSS, D.; WITTKOPF, S. Industrial Data-Based Life Cycle Assessment of Architecturally Integrated Glass-Glass Photovoltaics. **Buildings**, [s.l.], v. 9, n. 1, p.8-26, 29 dez. 2018.

PASTAKIA, C. M. R.; JENSEN, A. The rapid impact assessment matrix (RIAM) for EIA. **Environmental Impact Assessment Review**, [s.l.], v. 18, n. 5, p. 461-482, set. 1998.

PATTERSON, T.; KELSO, N. V. **Natural Earth raster + vector map data**. 2020. Disponível em: <https://www.naturalearthdata.com/downloads/10m-cultural-vectors/10m-admin-0-countries/>. Acesso em: 11 maio 2020.

PENG, J.; LU, L. Investigation on the development potential of rooftop PV system in Hong Kong and its environmental benefits. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 27, p. 149-162, nov. 2013.

PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 88 p.

PEREZ, M. J. R.; FTHENAKIS, V.; KIM, H.; Pereira, A. O. Façade-integrated photovoltaics: a life cycle and performance assessment case study. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, [s.l.], v. 20, n. 8, p.975-990, 9 jan. 2012.

PHILLIPS, J. Determining the sustainability of large-scale photovoltaic solar power plants. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 27, p. 435-444, nov. 2013.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. 2014. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em: 05 dez. 2019.

PORTAL SOLAR. **Enova**. 2020. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/forneceadores/empresa-s-de-energia-solar/maranhao/sao-luis/enova>. Acesso em: 26 dez. 2020.

PRANADI, A. D.; HARAMAINI, Q.; SETIAWAN, A.; SETIAWAN, E. A.; ALI, C. Sensitivity Analysis of Financial Parameters in Varying PV Penetrations in the Optimum Location of a Feeder. **Energy Procedia**, [s.l.], v. 156, p. 95-99, jan. 2019.

PRÉCONSULTANTS. **Simapro software**. 2019. Disponível em: <https://simapro.com/>. Acesso em: 10 dez 2019.

QGIS. **QGIS**. 2020. Disponível em: <https://qgis.org/en/site/>. Acesso em: 10 maio 2020.

QUEIROZ, A. R. DE *et al.* Climate change impacts in the energy supply of the Brazilian hydro-dominant power system. **Renewable Energy**, v. 99, p. 379–389, 2016.

RADHI, H. Energy analysis of façade-integrated photovoltaic systems applied to UAE commercial buildings. **Solar Energy**, [s.l.], v. 84, n. 12, p. 2009-2021, dez. 2010.

RADHI, H. Trade-off between environmental and economic implications of PV systems integrated into the UAE residential sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 16, n. 5, p. 2468-2474, jun. 2012.

RAMSHANI, M.; LI, X.; KHOJANDI, A.; OMITAOMU, O. An agent-based approach to study the diffusion rate and the effect of policies on joint placement of photovoltaic panels and green roof under climate change uncertainty. **Applied Energy**, [s.l.], v. 261, p. 114402-114418, mar. 2020.

RITZEN, M. J.; HOUBEN, J. J. M.; ROVERS, R.; VROON, Z. A. E. P; GEURTS, C. P. W. Carrying capacity based environmental impact assessment of Building Integrated Photovoltaics. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, [s.l.], v. 31, p. 212-220, fev. 2019.

RITZEN, M. J.; VROON, Z. A. E. P.; ROVERS, R.; LUPÍLEK, A.; GEURTS, C. P.W. Environmental impact comparison of a ventilated and a non-ventilated building-integrated photovoltaic rooftop design in the Netherlands: electricity output, energy payback time, and land claim. **Solar Energy**, [s.l.], v. 155, p. 304-313, out. 2017.

ROCHA, L. C. S.; AQUILA, G.; PAMPLONA, E. de O.; PAIVA, A. P. de; CHIEREGATTI, B. G.; LIMA, J. de S. B. Photovoltaic electricity production in Brazil: a stochastic economic viability analysis for small systems in the face of net metering and tax incentives. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 168, p. 1448-1462, dez. 2017.

ROTELA JUNIOR, P.; FISCHETTI, E.; ARAÚJO, V. G.; PERUCHI, R. S.; AQUILA, G.; ROCHA, L. C. S.; LACERDA, L. S. Wind Power Economic Feasibility under Uncertainty and the Application of ANN in Sensitivity Analysis. **Energies**, [s.l.], v. 12, n. 12, p. 2281-2291, 14 jun. 2019.

ROY, A.; GHOSH, A.; BHANDARI, S.; SELVARAJ, P.; SUNDARAM, S.; MALLICK, T. K. Color Comfort Evaluation of Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC) Based Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) Glazing after 2 Years of Ambient Exposure. **The Journal of Physical Chemistry C**, [s.l.], v. 123, n. 39, p. 23834-23837, 20 ago. 2019.

ROYO, P.; FERREIRA, V. J.; LÓPEZ-SABIRÓN, A. M.; FERREIRA, G. Hybrid diagnosis to characterise the energy and environmental enhancement of photovoltaic modules using smart materials. **Energy**, [s.l.], v. 101, p.174-189, abr. 2016.

RUDMAN, J.; GAUCHÉ, P.; ESLER, K. J. Direct environmental impacts of solar power in two arid biomes: an initial investigation. **South African Journal of Science**, [s.l.], v. 113, n. 11/12, p. 1-13, 29 nov. 2017.

SACCHELLI, S.; GAREGNANI, G.; GERI, F.; GRILLI, G.; PALETTO, A.; ZAMBELLI, P.; CIOLLI, M.; VETTORATO, D. Trade-off between photovoltaic systems installation and agricultural practices on arable lands: an environmental and socio-economic impact analysis for Italy. **Land Use Policy**, [s.l.], v. 56, p. 90-99, nov. 2016.

SAGANI, A.; MIHELIS, J.; DEDOISSIS, V. Techno-economic analysis and life-cycle environmental impacts of small-scale building-integrated PV systems in Greece. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 139, p. 277-290, mar. 2017.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. Á. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Distrito Federal: Embrapa, 2008. 355 p.

SANTOS, Í. P. dos; RÜTHER, R. Limitations in solar module azimuth and tilt angles in building integrated photovoltaics at low latitude tropical sites in Brazil. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 63, p. 116-124, mar. 2014.

SANTOS, Í. P. dos; RÜTHER, R. The potential of building-integrated (BIPV) and building-applied photovoltaics (BAPV) in single-family, urban residences at low latitudes in Brazil. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 50, p. 290-297, jul. 2012

SARUPRIA, M.; MANJARE, S. D.; GIRAP, M. Environmental impact assessment studies for mining area in Goa, India, using the new approach. **Environmental Monitoring and Assessment**, [s.l.], v. 191, n. 1, p. 1-17, 12 dez. 2018.

SCHILLING, M.; CHIANG, L. The effect of natural resources on a sustainable development policy: the approach of non-sustainable externalities. **Energy Policy**, [s.l.], v. 39, n. 2, p. 990-998, fev. 2011.

SCHUETZE, T.; WILLKOMM, W.; ROOS, M. Development of a Holistic Evaluation System for BIPV Façades. **Energies**, [s.l.], v. 8, n. 6, p. 6135-6152, 19 jun. 2015.

SCOGNAMIGLIO, A. 'Photovoltaic landscapes': design and assessment. a critical review for a new transdisciplinary design vision. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 55, p. 629-661, mar. 2016.

SENG, L. Y.; LALCHAND, G.; LIN, G. M. S. Economical, environmental and technical analysis of building integrated photovoltaic systems in Malaysia. **Energy Policy**, [s.l.], v. 36, n. 6, p. 2130-2142, jun. 2008.

SERRANO-LUJÁN, L.; GARCÍA-VALVERDE, R.; ESPINOSA, N. I.; GARCÍA-CASCALES, M. S.; SÁNCHEZ-LOZANO, J. M.; URBINA, A. Environmental benefits of parking-integrated photovoltaics: a 222 kwp experience. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, [s.l.], v. 23, n. 2, p. 253-264, 17 set. 2013.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete

Samples). **Biometrika**, [s.l.], v. 52, n. 3/4, p. 591-611, dez. 1965.

SHARMA, P.; KOLHE, M.; SHARMA, A. Economic performance assessment of building integrated photovoltaic system with battery energy storage under grid constraints. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 145, p. 1901-1909, jan. 2020.

SHIRAZI, A. M.; ZOMORODIAN, Z. S.; TAHSILDOOST, M. Techno-economic BIPV evaluation method in urban areas. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 143, p. 1235-1246, dez. 2019.

SHUKLA, A. K.; SUDHAKAR, K.; BARENDAR, P.; MAMAT, R. Solar PV and BIPV system: barrier, challenges and policy recommendation in india. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 82, p. 3314-3322, fev. 2018.

SHUKLA, A.; SUDHAKAR, K.; BARENDAR, P. Recent advancement in BIPV product technologies: a review. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 140, p. 188-195, abr. 2017.

SILVA, G. D. P. da; BRANCO, D. A. C. Is floating photovoltaic better than conventional photovoltaic? Assessing environmental impacts. **Impact Assessment and Project Appraisal**, [s.l.], v. 36, n. 5, p. 390-400, 28 maio 2018.

SILVA, G. D. P. da; MAGRINI, A.; BRANCO, D. A. C. A multicriteria proposal for large-scale solar photovoltaic impact assessment. **Impact Assessment and Project Appraisal**, [s.l.], v. 38, n. 1, p. 3-15, 26 abr. 2019.

SORGATO, M. J.; SCHNEIDER, K.; RÜTHER, R. Technical and economic evaluation of thin-film CdTe building-integrated photovoltaics (BIPV) replacing façade and rooftop materials in office buildings in a warm and sunny climate. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 118, p. 84-98, abr. 2018.

SOTARAUTA, M.; BEER, A.; GIBNEY, J. Making sense of leadership in urban and regional development. **Regional Studies**, [s.l.], v. 51, n. 2, p. 187-193, 1 fev. 2017.

TAWALBEH, M.; AL-OTHMAN, A.; KAFIAH, F.; ABDELSALAM, E.; ALMOMANI, F.; ALKASRAWI, M. Environmental impacts of solar photovoltaic systems: a critical review of recent progress and future outlook. **Science of The Total Environment**, [s.l.], v. 759, p. 143528-143540, mar. 2021.

TIBA, C *et al.* (Coord.). **Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados terrestres**. 2. ed. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2000. 116 p.

TOBOSO-CHAVERO, S.; NADAL, A.; PETIT-BOIX, A.; PONS, O.; VILLALBA, G.; GABARRELL, Xavier; J., A.; RIERADEVALL, J. Towards Productive Cities: environmental assessment of the food-energy-water nexus of the urban roof mosaic. **Journal of Industrial Ecology**, [s.l.], v. 23, n. 4, p. 767-780, 26 nov. 2018.

TOMAR, V.; TIWARI, G. N. Techno-economic evaluation of grid connected PV system for households with feed in tariff and time of day tariff regulation in New Delhi – A sustainable approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 70, p. 822-835, abr. 2017.

TRIPATHY, M.; JOSHI, H.; PANDA, S. K. Energy payback time and life-cycle cost

analysis of building integrated photovoltaic thermal system influenced by adverse effect of shadow. **Applied Energy**, [s.l.], v. 208, p. 376-389, dez. 2017.

TRIPATHY, M.; SADHU, P. K.; PANDA, S. K. A critical review on building integrated photovoltaic products and their applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 61, p. 451-465, ago. 2016.

TURCONI, R.; BOLDRIN, A.; ASTRUP, T. Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 28, p.555-565, dez. 2013.

URBANETZ, J.; ZOMER, C. D.; RÜTHER, R. Compromises between form and function in grid-connected, building-integrated photovoltaics (BIPV) at low-latitude sites. **Building and Environment**, [s.l.], v. 46, n. 10, p. 2107-2113, out. 2011.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Leiden University's Centre for Science and Technology Studies. **VOSviewer**. 2020. Disponível em: <https://www.vosviewer.com/>. Acesso em: 13 abr. 2020.

VARUN; BHAT, I.k.; PRAKASH, R. LCA of renewable energy for electricity generation systems—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 13, n. 5, p.1067-1073, jun. 2009.

VRÎNCEANU, A.; GRIGORESCU, I.; DUMITRAȘCU, M.; MOCANU, I.; DUMITRICĂ, C.; MICU, D.; KUCSICSA, G.; MITRICĂ, B. Impacts of Photovoltaic Farms on the Environment in the Romanian Plain. **Energies**, [s.l.], v. 12, n. 13, p. 2533-2551, 1 jul. 2019.

WANG, W.; LIU, Y.; WU, X.; XU, Y.; YU, W.; ZHAO, C.; ZHONG, Y. Environmental assessments and economic performance of BAPV and BIPV systems in Shanghai. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 130, p. 98-106, out. 2016.

WENG, Q.; FIROZJAEI, M. K.; KIAVARZ, M.; ALAVIPANAH, S. K.; HAMZEH, S. Normalizing land surface temperature for environmental parameters in mountainous and urban areas of a cold semi-arid climate. **Science of the Total Environment**, [s.l.], v. 650, p. 515-529, fev. 2019.

WHITAKER, M.; HEATH, G. A.; O'DONOUGHUE, P.; VORUM, M. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Coal-Fired Electricity Generation. **Journal of Industrial Ecology**, [s.l.], v. 16, p.53-72, abr. 2012.

WILD-SCHOLTEN, M. J. de. Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, [s.l.], v. 119, p.296-305, dez. 2013.

WONG, P. W. *et al.* Semi-transparent PV: Thermal performance, power generation, daylight modelling and energy saving potential in a residential application. **Renewable Energy**, v. 33, n. 5, p. 1024–1036, 2008.

WU, P. *et al.* Review on Life Cycle Assessment of Energy Payback of Solar Photovoltaic Systems and a Case Study. **Energy Procedia**, v. 105, p. 68–74, 2017.

WU, Y.; WEN, M. D.; YOUNG, L.; HSU, I. LCA-Based Economic Benefit Analysis for Building Integrated Photovoltaic (BIPV) Façades: a case study in taiwan. **International Journal of Green Energy**, [s.l.], v. 15, n. 1, p. 8-12, 18 jul. 2017.

WU, Z.; HOU, A.; CHANG, C.; HUANG, X.; SHI, D.; WANG, Z. Environmental impacts of large-scale CSP plants in northwestern China. **Environmental Science: Processes Impacts**, [s.l.], v. 16, n. 10, p. 2432-2441, 2014.

XU, R.; WITTKOPF, S.; ROESKE, C. Quantitative Evaluation of BIPV Visual Impact in Building Retrofits Using Saliency Models. **Energies**, [s.l.], v. 10, n. 5, p. 1-16, 10 maio 2017.

YE, S.; TIONG, R. L. K. NPV-at-Risk Method in Infrastructure Project Investment Evaluation. **Journal Of Construction Engineering and Management**, [s.l.], v. 126, n. 3, p. 227-233, maio 2000.

YOO, S. Optimization of a BIPV system to mitigate greenhouse gas and indoor environment. **Solar Energy**, [s.l.], v. 188, p. 875-882, ago. 2019.

YU, Z.; M. A. W.; XIE, K.; LV, G.; CHEN, Z.; WU, J.; YU, J. Life cycle assessment of grid-connected power generation from metallurgical route multi-crystalline silicon photovoltaic system in China. **Applied Energy**, [s.l.], v. 185, p. 68-81, jan. 2017.

YUE, C.; HUANG, G. An evaluation of domestic solar energy potential in Taiwan incorporating land use analysis. **Energy Policy**, [s.l.], v. 39, n. 12, p. 7988-8002, dez. 2011.

ZAIONTZ, C. **Real Statistics**. 2021. Disponível em: <https://www.real-statistics.com/free-download/>. Acesso em: 12 mar. 2021.

ZAMAN, M. B.; PRIYANTA, D.; TRISILO, F. Risk Assessment in Financial Feasibility of Tanker Project Using Monte Carlo Simulation. **International Journal of Marine Engineering Innovation and Research**, [s.l.], v. 1, n. 4, p. 303-316, 24 ago. 2017.

ZHANG, Q.; MA, J.; QIU, G.; LI, L.; GENG, S.; HASI, E.; LI, C.; WANG, G.; LI, X. Potential energy production from algae on marginal land in China. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 109, p. 252-260, abr. 2012.

ZHANG, T.; WANG, M.; YANG, H. A Review of the Energy Performance and Life-Cycle Assessment of Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) Systems. **Energies**, [s.l.], v. 11, n. 11, p. 3157, 14 nov. 2018.

ZHANG, Z.; ZHANG, Z.; WANG, X.; LIU, H.; WANG, Y.; WANG, W. Models for economic evaluation of multi-purpose apple harvest platform and software development. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, [s.l.], v. 12, n. 1, p. 74-83, 2019.