UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ECOSSISTEMA CIRCULAR: UMA ANÁLISE DOS ATORES E DE SUAS INICIATIVAS CIRCULARES NO SETOR DE ENERGIA FOTOVOLTAICA DO ESTADO DA PARAÍBA.

Túlio César Siqueira Venâncio

João Pessoa – PB
2023

Túlio César Siqueira Venâncio

ECOSSISTEMA CIRCULAR: UMA ANÁLISE DOS ATORES E DE SUAS INICIATIVAS CIRCULARES NO SETOR DE ENERGIA FOTOVOLTAICA DO ESTADO DA PARAÍBA.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia de Produção Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Bolis

Coorientador: Profa. Dra. Sandra Naomi Morioka

João Pessoa – PB
2023

Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

V448e Venancio, Tulio Cesar Siqueira.
ECOSSISTEMA CIRCULAR: UMA ANÁLISE DOS ATORES E DE SUAS INICIATIVAS CIRCULARES NO SETOR DE ENERGIA FOTOVOLTAICA DO ESTADO DA PARAÍBA. / Tulio Cesar Siqueira Venancio. - João Pessoa, 2023.
69 f. : il.

Orientação: Ivan Bolis.
Coorientação: Sandra Naomi Morioka.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Ecossistema circular. 2. Economia circular. 3. Energia solar fotovoltaica. I. Bolis, Ivan. II. Morioka, Sandra Naomi. III. Título.

UFPB/CT/BSCT CDU 658.5:621(043.2)

Elaborado por ONEIDA DIAS DE PONTES - CRB-15/198

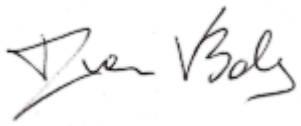
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

FOLHA DE APROVAÇÃO

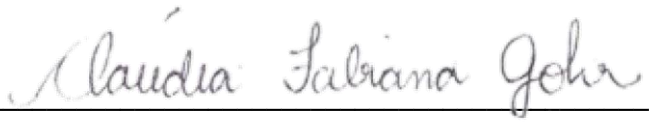
Aluno: TÚLIO CÉSAR SIQUEIRA VENÂNCIO

Título do trabalho: ECOSSISTEMA CIRCULAR: UMA ANÁLISE DOS ATORES E DE SUAS INICIATIVAS CIRCULARES NO SETOR DE ENERGIA FOTOVOLTAICA DO ESTADO DA PARAÍBA.

Trabalho de Conclusão do Curso defendido e aprovado em 06 de novembro de 2023 pela banca examinadora:



Profº. Dr. IVAN BOLIS - Orientador - DEP/CT/UFPB



Profª. Drª. CLÁUDIA FABIANA GOHR - Membro - DEP/CT/UFPB

Profº. Dr. ÍTALO ANDRÉ CAVALCANTI DE OLIVEIRA - Membro - DEE/CEAR/UFPB

À Deus, minha família, e amigos que garantiram o sucesso da minha jornada até o presente momento.

AGRADECIMENTOS

À Deus por todas as oportunidades, força e saúde para seguir em frente.

Aos meus pais, por todo apoio, amor, carinho e esforço para educar seus filhos e sempre acreditar em nossos sonhos.

A meu único irmão, meu maior companheiro, por todo apoio e força em nossas batalhas.

Aos meus avós, tios e primos por todo o incentivo, apoio e carinho.

Aos meus amigos e colegas por todos os momentos compartilhados, por todo apoio e incentivo durante essa caminhada, e principalmente por todo o esforço, dicas e contribuições que com certeza contribuíram para a minha jornada.

Aos professores que passaram e deixaram em mim um pouco de conhecimento durante toda a minha vida.

RESUMO

Um dos setores de maior expansão na atualidade é o de energia solar fotovoltaica, e um dos seus maiores desafios é a falta de destinação adequada para os componentes e módulos defeituosos e em final de vida útil. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo analisar o ecossistema do setor de energia solar fotovoltaica no estado da Paraíba (Brasil), sob a perspectiva da economia circular. Essa escolha ocorreu, pois, à Paraíba está situada em uma das regiões de maior potencial de geração solar do país. Em busca de atingir o objetivo geral, o presente trabalho analisou dois objetivos específicos distintos, sendo eles: 1 – Identificar os principais atores envolvidos no setor de energia solar fotovoltaica no estado da Paraíba (Brasil), suas responsabilidades e inter-relações sob a perspectiva de um ecossistema circular; 2 – Identificar as iniciativas circulares dos atores envolvidos no setor de energia solar fotovoltaica no estado da Paraíba (Brasil) e seus facilitadores e barreiras para as iniciativas da economia circular nesse ecossistema. Neste trabalho, foram analisados artigos acadêmicos, documentos administrativos, além de entrevistas com integrantes do setor. Os resultados apontam para um ecossistema paraibano do setor de energia fotovoltaica de relações predominantemente comercial, regulatória e técnica. Também possui presença de parcerias de pesquisa e desenvolvimento de soluções. Além disso, os tipos de atores analisados apresentam participações em algumas ações circulares, sejam elas de liderança, ou indiretamente com outras funções, apresentando como o ecossistema começa a se integrar em busca de soluções ecologicamente sustentáveis. Por fim, o trabalho contribui com a abordagem da recente teoria de ecossistema circular e apresenta uma contribuição prática de mapeamento do ecossistema circular, visto que trabalhos com a temática são escassos. Também abre espaço para novas pesquisas no setor, novos mapeamentos em outros setores, refinamento do mapeamento aqui realizado e busca de novas soluções e parcerias para o ecossistema atual.

Palavras-chaves: Ecossistema circular; Economia circular; Energia solar fotovoltaica.

ABSTRACT

One of the fastest growing sectors today is photovoltaic solar energy, and one of its biggest challenges is the lack of adequate disposal for defective components and modules at the end of their useful life. Therefore, the present work aims to analyze the ecosystem of the photovoltaic solar energy sector in the state of Paraíba (Brazil), from the perspective of the circular economy. This choice was made because Paraíba is in one of the regions with the greatest potential for solar generation in the country. In search of achieving the general objective, this work analyzed two distinct specific objectives, namely: 1 – Identify the main actors involved in the photovoltaic solar energy sector in the state of Paraíba (Brazil), their responsibilities and interrelations from the perspective of a circular ecosystem; 2 – Identify the circular initiatives of actors involved in the photovoltaic solar energy sector in the state of Paraíba (Brazil) and their facilitators and barriers to circular economy initiatives in this ecosystem. In this work, academic articles, administrative documents were analyzed, as well as interviews with members of the sector. The results point to an ecosystem in the photovoltaic energy sector in Paraíba with predominantly commercial, regulatory, and technical relationships. It also has a presence of research and solution development partnerships. Furthermore, the types of actors analyzed present participation in some circular actions, whether leadership, or indirectly with other functions, showing how the ecosystem begins to integrate in search of ecologically sustainable solutions. Finally, the work contributes to the approach of the recent circular ecosystem theory and presents a practical contribution to mapping the circular ecosystem, as studies on the subject are scarce. It also opens space for new research in the sector, new mapping in other sectors, refinement of the mapping carried out here, and search for new solutions and partnerships for the current ecosystem.

Keywords: Circular ecosystem; Circular economy; Photovoltaic solar energy.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ONU – Organização das Nações Unidas

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

SEIA – *Solar Energy Industries Association*

EVA – Etil Vinil Acetato

MWP – Mega Watt Pico

kW – Quilo Watt

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

LAISE – Legislação Ambiental de Interesse do Setor Elétrico

PBAVC – Programa Brasileiro de Avaliação de Ciclo de Vida

PNRS – Programa Nacional de Resíduos Sólidos

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

kVA – Quilo Volt-Ampére

N/E – Não Encontrado

SUDEMA – Superintendência de Administração do Meio Ambiente

UFPB – Universidade Federal da Paraíba

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura do trabalho 16
Figura 2: Diagrama borboleta 19
Figura 3: Estrutura conceitual do ecossistema circular 21
Figura 4: Matriz elétrica brasileira 23
Figura 5: Média anual de insolação diária 26
Figura 6: Geração centralizada no Brasil 27
Figura 7: Roteiro de entrevistas 38
Figura 8: Relações diretas entre os tipos de atores 43
Figura 9: Mapa visual do ecossistema circular 57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Número de citações e principal tipo de relações entre os atores 44
Tabela 2: Influência dos facilitadores da economia circular nos tipos de atores 52
Tabela 3: Influência das barreiras da economia circular nos tipos de atores 55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Iniciativas circulares da fundamentação teórica 18
Quadro 2: Lista de legislações 28
Quadro 3: Etapas do trabalho 32
Quadro 4: Lista de entrevistados 33
Quadro 5: Tipos de atores do setor no estado da Paraíba 34
Quadro 6: Iniciativas circulares codificadas 34
Quadro 7: Facilitadores da economia circular no setor fotovoltaico 35
Quadro 8: Barreiras da economia circular no setor fotovoltaico 35
Quadro 9: Facilitadores da economia circular codificadas 36
Quadro 10: Barreiras da economia circular codificadas 37
Quadro 11: Lista de atores 40
Quadro 12: Ações e envolvimento dos tipos de atores nas iniciativas circulares 48

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 13
1.1. OBJETIVO GERAL 15
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 15
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO 16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 17
2.1. ECOSSISTEMA CIRCULAR 17
2.2. ECONOMIA CIRCULAR NO SETOR DE ENERGIA FOTOVOLTAICA 22
2.3. SETOR FOTOVOLTAICO NA PARAÍBA 25
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS 31
4. RESULTADOS 40
4.1. ANÁLISE DOS ATORES E SUAS RESPONSABILIDADES 40
4.2. ANÁLISE DAS INICIATIVAS CIRCULARES, FACILITADORES E BARREIRAS 47
5. DISCUSSÕES 58
6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS 62

1. INTRODUÇÃO

As constantes buscas por fontes renováveis de energia tem levado o mundo a investir em geração de energia solar fotovoltaica, tornando a tecnologia cada vez mais presente no mercado. Esse aumento de potencial produtivo contribui para a geração de energia sem emissões de gases poluentes na atmosfera. Entretanto, outro problema ambiental está em curso devido à falta de destinação adequada dos equipamentos em fim de vida útil e falta de matéria prima para a produção de novos componentes (Xu *et al.*, 2018).

O crescimento do setor de energia solar e o alto consumo de equipamentos de geração de energia têm levantado um debate sobre a geração de *e-waste* (lixo eletrônico) nos próximos anos. Segundo o *Renewables Global Status Repor*t *2020* (REN21, 2020), o crescimento mundial dessa tecnologia em 2019 foi de 115GW, ou cerca de 22,5% de crescimento anual.

Somado a isso, estima-se que 10% de todo o resíduo eletrônico em 2050 seja proveniente de placas solares (Farrell *et al.*, 2020), o que indica um valor aproximado de 195.332 quilo toneladas de resíduos de painéis e componentes fotovoltaicos até 2050 (May; Davidson; Monahov, 2018). Entretanto, a geração de energia limpa deve contar com os menores impactos possíveis e a economia circular apresenta um conjunto de conceitos que podem auxiliar na redução desses impactos (Visser *et al.*, 2020).

Diante disso, analisar o setor atual e as relações entre os envolvidos apresentando uma visão sistêmica do seu funcionamento, delimitando os atores participantes do ecossistema, verificando suas similaridades, relacionamentos e entrega comum de valor é uma discussão extremamente relevante (Köhler *et al.*, 2019). Dentro desse contexto, ações com base em iniciativas circulares como o *slowing* (maior durabilidade ou vida útil dos produtos), *narrowing* (menor uso de recursos, reparo e remanufatura), *closing* (reuso/reaproveitamento/reciclagem de recursos) e *intensifying* (máxima utilização/compartilhamento do produto) podem servir como caminho para os objetivos em comum do ecossistema e impulsionar as iniciativas circulares nas empresas (Bocken *et al.*, 2016).

Todo processo de transição é de fato complexo. As empresas, governos, sociedade e outros atores desempenham papeis críticos. Além disso, os atores

envolvidos em uma transição possuem interesses, estratégias e recursos distintos, o que torna todo processo complexo (Köhler *et al.*, 2019). Com essa visão, foi considerado analisar o setor por meio de uma perspectiva ecossistêmica devido a sua complexidade, bem como identificar iniciativas circulares utilizadas pelo setor, considerando as estratégias de *slowing* (maior durabilidade ou vida útil dos produtos), *narrowing* (menor uso de recursos, reparo e remanufatura), *closing* (reuso/reaproveitamento/reciclagem de recursos) e *intensifying* (máxima utilização/compartilhamento do produto) tendo em vista a busca de soluções para um problema que envolve grande utilização de recursos e energia.

Um ecossistema é um conjunto de atores que possuam relações interdependentes entre si, ou seja, um conjunto de atores conectados a uma rede de ações, parcerias e vínculos em busca de equilíbrio e relações de benefícios mútuos (Jacobides; Cennamo; Gawer, 2018). Analisando um ambiente de empresas e organizações dentro do setor de energia solar fotovoltaica, é visível a definição de um ecossistema de negócios.

Nesse caso, um ecossistema de negócios envolve um conjunto de organizações e indivíduos que geram e consomem bens e serviços. Esses atores estão interconectados, estabelecendo relações de competição, cooperação, compartilhamento de ideias e informações, com o objetivo de entregar valor aos seus clientes (Moore, 1996).

Entretanto, para que um conjunto de atores possa formar um ecossistema circular, os indivíduos e as organizações devem fazer parte de um sistema regenerativo, buscando fechar o ciclo material com base em ações de ganha-ganha (Homrich *et al.*, 2018; Kirchherr; Reike; Hekkert, 2017; Trevisan *et al.*, 2022). Nesse caso, um ecossistema circular busca a criação de valor e a realização de interações orientadas por iniciativas circulares (Pieroni; McAloone; Pigosso, 2019).

Estudos recentes sobre ecossistema circular mostram que há uma certa dificuldade de encontrar trabalhos para a temática, principalmente no que se refere ao mapeamento de setores com base nas definições da literatura (Trevisan *et al.*, 2022). Diante disso, é possível concluir que grande parte dos trabalhos acadêmicos apresentam uma visão pouco abrangente das organizações, dos impactos de suas ações e das relações com seus atores em uma perspectiva de interações com base nos princípios da economia circular. Ou seja, poucos são os estudos da economia circular em uma visão ecossistêmica.

Com base nessa visão, este trabalho busca responder a seguinte pergunta: **Quem são os principais atores de um ecossistema circular no setor de energia fotovoltaica e quais são as suas responsabilidades, bem como os facilitadores e as barreiras presentes no ecossistema que permitirão uma transição para a economia circular?**

A finalidade é obter uma visão sistêmica do ambiente de trabalho/estudo, analisar a situação de forma crítica, compilar dados e apresentar uma visão atual do setor baseado nos resultados. Além disso, é importante mostrar que o engenheiro deve trabalhar integrado a uma visão de sustentabilidade, já que toda ação tem impactos sociais, econômicos e ambientais seguindo a visão do *triple bottom line* em busca de equilíbrio ambiental, social e econômico (ELKINGTON, 1998).

Diante disso, o presente escrito aborda o conceito de ecossistema circular, em busca de realizar uma análise do setor de energia solar fotovoltaica da Paraíba (Brasil) de acordo com as características do ecossistema. Essa análise identificou atores dentro do ecossistema e suas responsabilidades, e através de entrevistas mapeou suas relações, iniciativas circulares, facilitadores e barreiras para a implementação de ações circulares no setor, que permitirão uma transição para a economia circular.

1.1. OBJETIVO GERAL

- Analisar o ecossistema do setor de energia solar fotovoltaica no estado da Paraíba (Brasil) sob a perspectiva da economia circular e de suas iniciativas.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

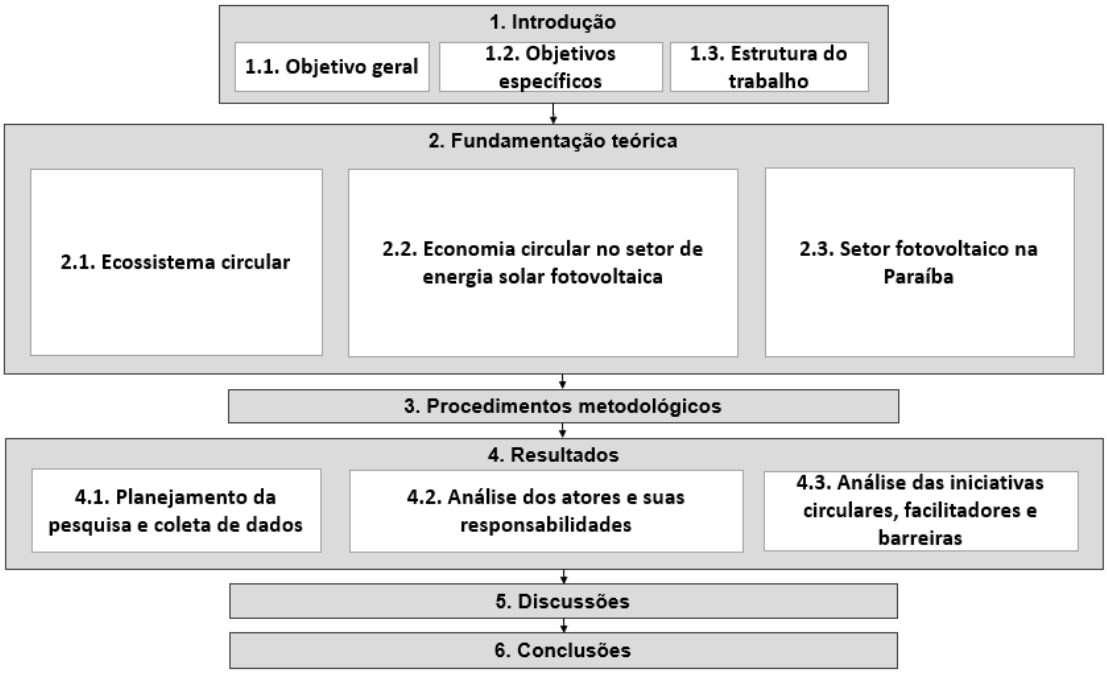
- Objetivo específico 1: Identificar os principais atores envolvidos no setor de energia solar fotovoltaica no estado da Paraíba (Brasil), suas responsabilidades e inter-relações sob a perspectiva de um ecossistema circular.
- Objetivo específico 2: Identificar as iniciativas circulares dos atores envolvidos no setor de energia solar fotovoltaica no estado da Paraíba (Brasil) e seus facilitadores e barreiras para as iniciativas da economia circular nesse ecossistema.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos (Figura 01), no qual a introdução (capítulo 1) apresenta uma breve fundamentação e os objetivos que serão analisados ao longo do trabalho. Posteriormente, será apresentado a fundamentação teórica (capítulo 2) que serve como base para a pesquisa, separada em três seções (2.1; 2.2 e 2.3).

Seguindo a fundamentação teórica, o capítulo 3 apresentará os procedimentos metodológicos do trabalho, do planejamento, coleta de dados, análise e apresentação dos resultados. A contribuição da fundamentação e planejamento seguido dos procedimentos e coleta dos dados levam aos resultados no capítulo 4, discussões (capítulo5) e conclusões (capítulo 6) em relação aos resultados obtidos e os objetivos da introdução.

Figura 1*:* Estrutura do trabalho



Fonte: Autor

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A presente fundamentação teórica aborda o conceito de ecossistema circular (seção 2.1), apresentando inicialmente a definição de ecossistema, passando por ecossistema de inovação, conceitos da economia circular e por fim o conceito de ecossistema circular.

Na medida que a economia circular será analisada no setor de energia solar fotovoltaica, a seção 2.2 aborda o que apresenta os trabalhos acadêmicos e estudos entre a relação da economia circular e suas iniciativas dentro do setor.

Por fim, a seção 2.3 apresenta informações do setor no estado da Paraíba (Brasil) atualmente, onde a análise será realizada.

2.1. ECOSSISTEMA CIRCULAR

Segundo Pieroni (2019), o conceito de ecossistema circular aborda a criação de valor com base em iniciativas da economia circular entre os atores e suas relações. Estudos como o de Trevisan et al.(2022) abordam o conceito de ecossistema circular como uma estrutura colaborativa, assim como no ecossistema de negócios. Essa estrutura possui atores que se relacionam e interagem em busca de criar e entregar valor em conjunto, visando a transição circular dos atores e de seus relacionamentos no setor.

O ecossistema circular é analisado como um sistema de relações complexas e adaptativas. Isso ocorre por consequência do alto número de interações entre os atores em vários níveis de organização, o que faz surgir uma série de comportamentos complexos (Chan, 2001; Levin, 1998). Segundo Arthur; Durlauf e Lane (1997), sistemas do tipo adaptativo e complexos ocorrem devido a seis propriedades que estão presentes na economia, são elas: interação dispersa, ausência de um controlador global, organização hierárquica transversal, adaptação contínua, novidade perpétua e dinâmica de equilíbrio. A análise, portanto, adota uma abordagem de pensamento sistêmico, concentrando-se no sistema como um todo e nas relações entre os atores, em vez de analisar somente partes individuais de um sistema separadamente.

Enquanto isso, o conceito de economia circular está presente desde a década de 1960 e, incialmente, foi abordado em áreas de ecologia industrial e economia

ecológica (Baldassarre *et al.*, 2019). Desde a década de 2010, o conceito ganhou força na indústria e nas autoridades de governança empresarial, tendo como justificativa de expansão os trabalhos realizados pela *Ellen MacArthur Foundation* (EMAF), com foco em pesquisa e desenvolvimento do tema em busca de acelerar a transição das organizações para a economia circular (EMAF, 2013).

Os fundamentos ou iniciativas da economia circular (Quadro 1) buscam minimizar o uso de materiais virgens e eliminar o desperdício das cadeias de valor por meio de diferentes estratégias, como a fabricação mais eficiente de produtos, prolongamento da vida útil do produto e aplicação útil de materiais. Isso ocorre por meio dos princípios de *slowing* (maior durabilidade ou vida útil dos produtos), *narrowing* (menor uso de recursos), *closing* (reuso/reaproveitamento/reciclagem de recursos) e *intensifying* (máxima utilização do produto) (Pieroni; McAloone; Pigosso, 2019).

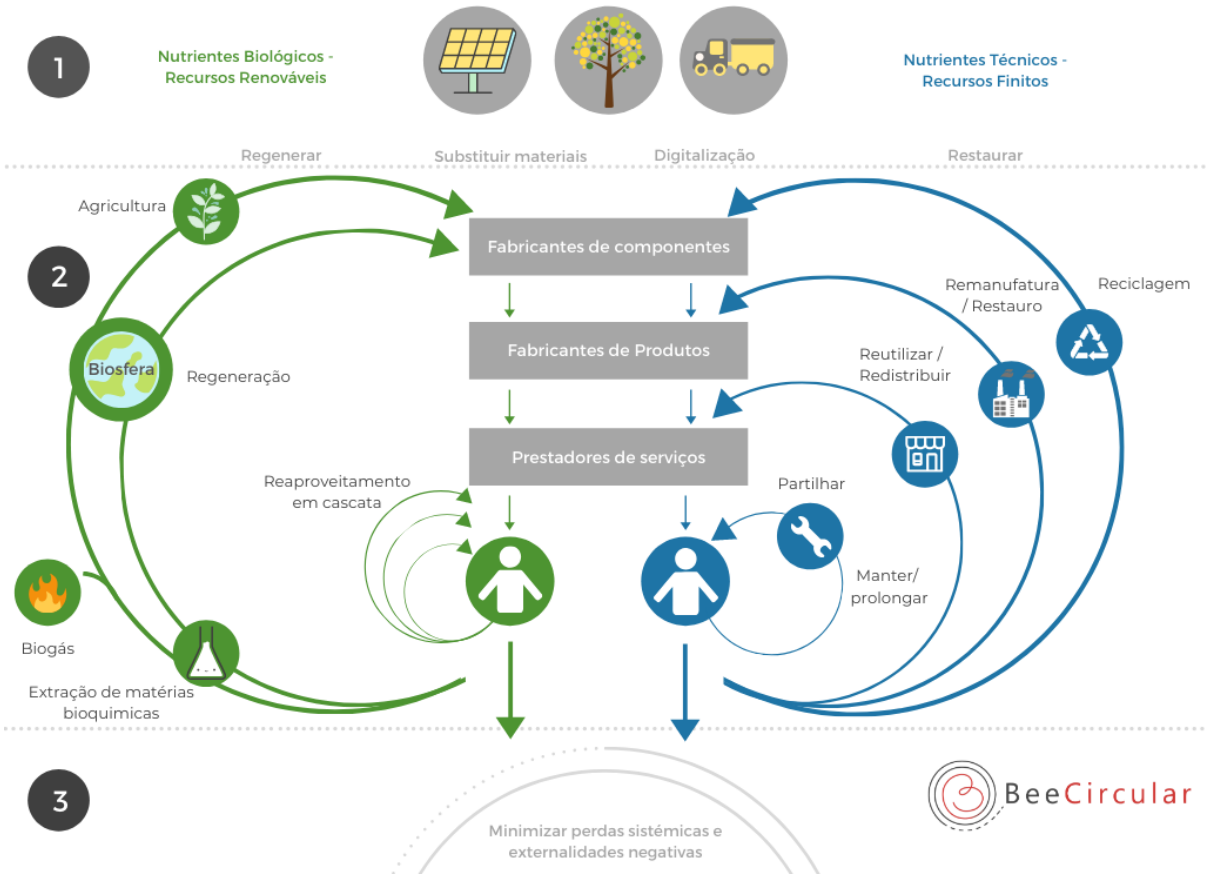
Quadro 1: Iniciativas circulares da fundamentação teórica

Iniciativas	**Definição**
Intensifying	Máxima utilização de produtos (Compartilhar)
Slowing	Maior durabilidade de um produto (Reutilizar)
Narrowing	Menor uso de recursos (Reparar)
Closing	Reuso de materiais (Reciclar)

Fonte: Autor

Estas iniciativas tem como objetivo alterar uma estrutura de consumo linear para uma estrutura de circuito fechado (Figura 02) de máxima utilização, menor desperdício e redução de custos, auxiliando na redução de impactos como contaminação dos solos e aquíferos, escassez de recursos e danos à saúde humana e vida animal (Bocken *et al.*, 2016).

Figura 2: Diagrama borboleta



Fonte: Ellen MacArthur Foundation (2013, p. 24).

A economia circular contribui para os três pilares da sustentabilidade (desenvolvimento econômico, ambiental e social), além disso, ajuda a alcançar os objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU (ODS), particularmente “ODS 6 (água potável e saneamento), ODS 7 (energia limpa e acessível), ODS 8 (trabalho decente e crescimento econômico), ODS 12 (consumo e produção responsáveis) e ODS 15 (vida na terra) (El-Khawad; Bartkowiak; Kümmerer, 2022). Especificamente, a ODS 12 possui referências diretas a economia circular e, com sua contribuição para os pilares da sustentabilidade, pode-se inferir que a economia circular está alinhada com o desenvolvimento sustentável (Schöggl; Stumpf; Baumgartner, 2020).

A economia circular pode ser integrada desde os estágios iniciais até os estágios finais de um ciclo de produção e consumo, buscando manter os recursos em uso pelo maior tempo possível (Homrich *et al.*, 2018). Conceitos como pensamento circular (Santa-Maria; Vermeulen; Baumgartner, 2022), design circular (Moreno *et al.*, 2016), logística reversa (Lambert; Riopel; Abdul-Kader, 2011), estratégias de negócios

circulares (Kanda; Geissdoerfer; Hjelm, 2021) e regeneração de materiais fazem parte desses processos. Princípios que busquem modificar o fluxo material, resíduos e descarte inadequado, manter os produtos mais tempo em uso e regenerar sistemas impactados fazem parte da interpretação da economia circular, já que ainda não existe uma definição completamente aceita (EMAF, 2013). Essas ações possuem valor sustentável, e quando atores dentro de um ecossistema de negócios se alinham e cooperam para alcançar esses objetivos, pode-se considerar que este é um ecossistema circular.

Em uma visão ecossistêmica, a análise das relações e contribuições dos atores dentro de um setor é o que diferencia um modelo de negócio de um ecossistema de negócios (Adner, 2017). As características de um ecossistema de negócios, juntamente com as características de um ecossistema de inovação, estão presentes em um ecossistema circular (Kanda; Geissdoerfer; Hjelm, 2021).

O ecossistema de negócios não segue o processo tradicional de criação de valor, nele as empresas cooperam ou competem para entregar um produto ou serviço em comum dentro de uma rede de geração de valor (Kanda; Geissdoerfer; Hjelm, 2021). Essa rede possui diferentes participantes que se relacionam em busca de um valor comum, sendo que as empresas não atuam isoladamente apenas com base na concorrência (Kanda; Geissdoerfer; Hjelm, 2021). No ecossistema de inovação, essa relação entre os atores busca o desenvolvimento de uma nova proposta de valor, tecnologia, ou oportunidade de inovação criativa (Konietzko; Bocken; Hultink, 2020).

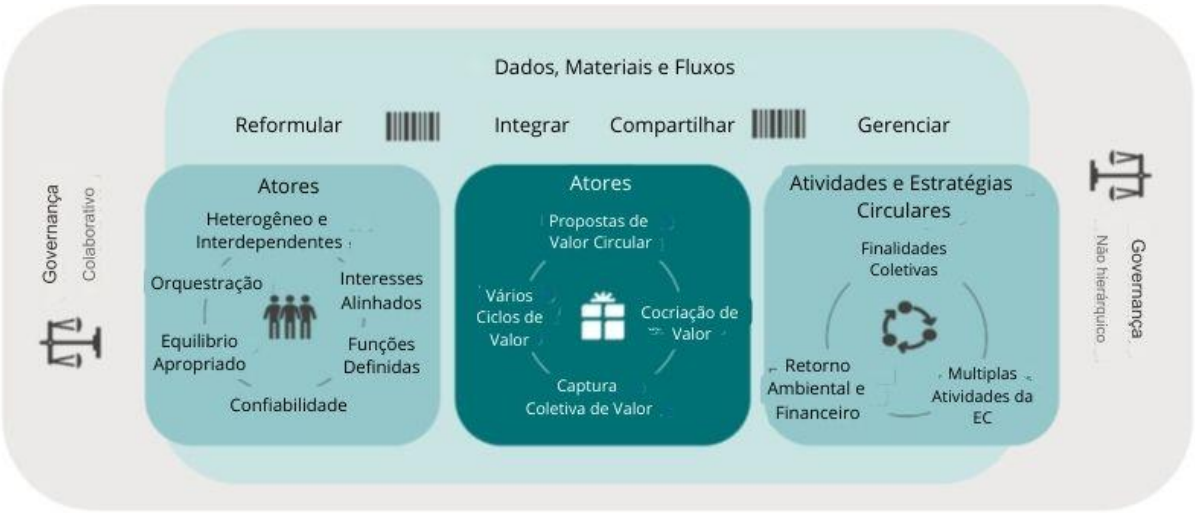
Normalmente o ecossistema possui um ator dominante, ou fornecedores dominantes, levando em consideração seus modelos de negócios (proposta, criação, entrega e captura de valor), o risco do processo de inovação, o nível de dependência entre atores do ecossistema e a proposta de valor que o ecossistema vai abordar (Talmar *et al.*, 2020).

Em um mundo onde as organizações estão cada vez mais especializadas ou limitadas, uma única empresa normalmente não possui os recursos para desenvolver e trocar uma proposta de valor do início ao fim (Appleyard; Chesbrough, 2017; Kapoor; Furr, 2015). Portanto, as empresas muitas vezes precisam contar com outros atores em seu ecossistema de inovação para poder construir uma proposta de valor para todo o ecossistema (Adner, 2012) que ocorre quando se combina as contribuições individuais de diferentes atores.

Diante disso, Konietzko; Bocken; Hultink, (2020) retratam a existência de questionamentos em um ecossistema circular inovativo. Esses questionamentos buscam entender como os atores podem interagir entre si em seu ecossistema para inovar em direção à circularidade, como realizam testes para implementar ações de maior circularidade e, como integram as atividades sociais e econômicas para alcançar maior circularidade.

Diante desse cenário, sabe-se que os ecossistemas circulares geram valor a partir de ações de inovação com base nas iniciativas circulares, não somente de uma organização, mas das relações de colaboração entre atores (Goodman; Korsunova; Halme, 2017). Ou seja, o modelo de negócio deve gerar e capturar valores internos e externos a cada organização, pois o valor agregado de suas interações são de extrema importância para o desenvolvimento do ecossistema (Asgari; Asgari, 2021). Com isso, Trevisan (2022) apresenta os elementos de classificação de um ecossistema circular como sendo (Figura 3): 1 - Valor; 2 – Dados, materiais e fluxos; 3 – Atividades e estratégias circulares; 4 – Governança. A estrutura apresentada na Figura 3 apresenta os atores centrais, os tipos de estratégias circulares trabalhadas e as regras de governança empresarial dentro do ecossistema.

Figura 3: Estrutura conceitual do ecossistema circular



Fonte: Trevisan et al. (2022, p. 293).

Vale ressaltar que, ainda de acordo com Trevisan (2022), um ecossistema circular pode auxiliar o desenvolvimento sustentável, pois faz parte de um ecossistema de inovação e atuar com os princípios da economia circular, gerando

valor e oportunidades de sustentabilidade econômica e ambiental. Isso se justifica devido a um ambiente cada vez mais complexo que as empresas enfrentam, a falta de recursos naturais e as constantes mudanças climáticas. Estes aspectos levaram as empresas a buscar a inovação para a sustentabilidade (Albino; Berardi; Dangelico, 2015; Gabriel; Perl-vorbach; Posch, 2014).

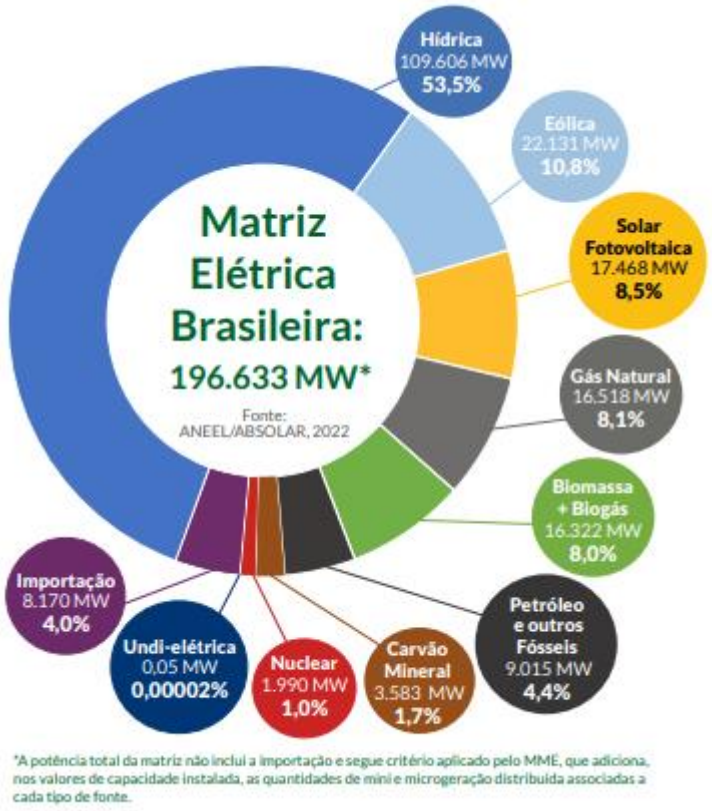
Atualmente, os atores e *stakeholders* envolvidos em um ecossistema devem buscar ajudar as empresas a enfrentarem os desafios sociais e ambientais fomentando o desenvolvimento de modelos de negócios sustentáveis, produtos e serviços impulsionados por inovação (Ayuso *et al.*, 2011; Lee; Kim, 2011; Slotegraaf, 2012). Entretanto, processos de inovação para desenvolvimento sustentável são mais complexos que processos de inovação simples e, oportuno às incertezas tecnológicas, podem ser necessárias mudanças no processo produtivo, matérias primas ou serviços ofertados (De Marchi, 2012; Driessen; Hillebrand, 2013).

A nível de mapeamento de um ecossistema circular, destaca-se o trabalho do Iyer-Raniga, Gajanayake e Ho (2022) que apresenta uma análise da economia circular no estado australiano de Victoria. Para o mapeamento, os atores buscaram verificar as ações e legislações presentes no estado, bem como listar possíveis lacunas e oportunidades para a transição em direção a economia circular no estado.

2.2. ECONOMIA CIRCULAR NO SETOR DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

O expressivo crescimento da geração de energia através da tecnologia de placas fotovoltaicas no Brasil foi de cerca de 71% entre 2020 e 2021, sendo pouco mais de 30% de geração centralizada e 60% geração distribuída (ABSOLAR, 2022). Os números da geração de 2022 já representa cerca de 8,5% (Figura 4) da capacidade instalada na matriz nacional, e os dados acumulados desde 2012 aponta a existência de 15,8GW operacionais e 24,6 milhões de toneladas de CO2 que deixaram de ser geradas no período (ABSOLAR, 2022).

Figura 4: Matriz elétrica brasileira



Fonte: Adaptado do infográfico da Absolar (2022, p. 1).

Uma grande dificuldade do setor, é a destinação dos módulos em fim de vida útil ou danificados (Chen, 2018). Uma prática comum era a destinação dos módulos de menor eficiência para geração de energia em países mais pobres (Chen, 2018). Entretanto a China passou a produzir módulos a preços mais competitivos com vida útil 5 vezes menor, inviabilizando essa prática (Chen, 2018). Segundo Chen (2018), os módulos podem possuir materiais de alto valor como a prata e o cobre. Outras possuem soluções a base crômio e cádmium que é cancerígeno e em caso de vazamento pode contaminar rios e o solo.

De acordo com o princípio da economia circular de manter os produtos e materiais da cadeia de valor com a mais alta qualidade pelo maior tempo possível, a reciclagem deve ser considerada a última opção (Bocken *et al.*, 2016). A reciclagem é cara, requer muita energia e, sobretudo, resulta na diminuição da qualidade, no aumento da impureza dos materiais ou mesmo na sua perda (El-Khawad; Bartkowiak; Kümmerer, 2022).

A reciclagem dos módulos fotovoltaicos já é realidade, entretanto, o processo é caro e complicado, além de ser recente e a maior parte das empresas que realizam esse processo estar situadas em países desenvolvidos (SEIA, 2022; Veolia, 2018). Isso é comprovado com a atuação da associação das empresas de energia solar nos Estados Unidos. Atualmente a SEIA (*Solar Energy Industries Association*) estabeleceu uma política de reciclagem e já trabalha com cinco centros de reciclagem nos Estados Unidos (SEIA, 2022). Já a francesa *Veolia* abriu em 2018 o que considera ser a primeira planta de reciclagem de placas solares na Europa (Veolia, 2018).

Essas plantas de reciclagem trabalham com um volume de módulos ainda baixo, o estoque pode ser uma solução até um período de volume financeiramente viável, e espera-se que ocorra crescimento do volume nos próximos anos (Chen, 2018). Porém, a solução a ser debatida é legislativa, e segundo Chen (2018), alguns estados norte americanos já impõem que as empresas possuam planos de reciclagem e retorno das placas.

O processo de reciclagem mais primitivo dos módulos permitia a recuperação apenas do vidro e do alumínio, devido a esses materiais possuírem maior facilidade de recuperação (BloombergNEF, 2013). Atualmente, os processos já possuem capacidade de recuperar mais elementos do que apenas vidro e alumínio (Tan; Shuyue; Seeram, 2022). Os processos atuais possuem três tipos de operações, sendo processo mecânico, térmico e químico (Tan; Shuyue; Seeram, 2022). Esses processos realizam a separação da camada de EVA (etil vinil acetato) do restante dos componentes, e a reciclagem dessa camada permite recuperar outros componentes como: silício, prata, chumbo e cobre (Tan; Shuyue; Seeram, 2022).

O crescimento da indústria de reciclagem de painéis permitirá o desenvolvimento de novos métodos de recuperação que podem contribuir significativamente para fechar o ciclo do silício e de outro componentes dos painéis (Tan; Shuyue; Seeram, 2022). Outra solução seria projetar painéis que permitam os processos de reparo ou reforma, auxiliando no prolongamento da vida útil do painel (Tan; Shuyue; Seeram, 2022). Entretanto, os painéis solares de silício cristalino são projetados para robustez e exposição às mudanças climáticas, visando resistência à água, vento, luz e alterações de temperatura, sem considerar o tratamento de fim de vida. Este tipo de design robusto é o que dificulta os processos de reciclagem, reparo e remanufatura, pois os componentes individuais não podem ser separados uns dos outros, exceto a estrutura de alumínio que pode ser facilmente removida, aumentando

os esforços necessários para a reciclagem, garantindo, contudo, maior vida útil (Tan; Shuyue; Seeram, 2022).

Diante disso, é necessário que os processos de reciclagem sejam economicamente viáveis para que se avance na solução. Como as empresas de reciclagem buscam volume de materiais para maximizar o lucro, uma equipe da *Arizona State University* propôs uma estratégia diferente para reciclar os módulos (Bomgardner; Scott, 2018). O método ASU (*Arizona State University)* desenvolvido visa maximizar o valor monetário dos materiais recuperados, estimando um retorno de US$ 13 por módulo reciclado, e com pouco material levado para os aterros (Bomgardner; Scott, 2018).

O método desenvolvido também possui etapas físicas e químicas utilizando eletro extração sequencial com ácido nítrico para a retirada de metais da célula interconectada e compactada. Posteriormente, um segundo processo chamado monitoramento de resistência da folha é realizado para recuperar o silício (Bomgardner; Scott, 2018). Esse processo não recupera o volume total em massa, entretanto ele garante pureza ao material reciclado, onde a prata possui 99% de pureza e é o metal mais valioso, isso é importante para a maximização do valor final. Além dele, o silício é extraído com 99% de pureza, garantindo grau solar para retorno aos processos de remanufatura (Bomgardner; Scott, 2018).

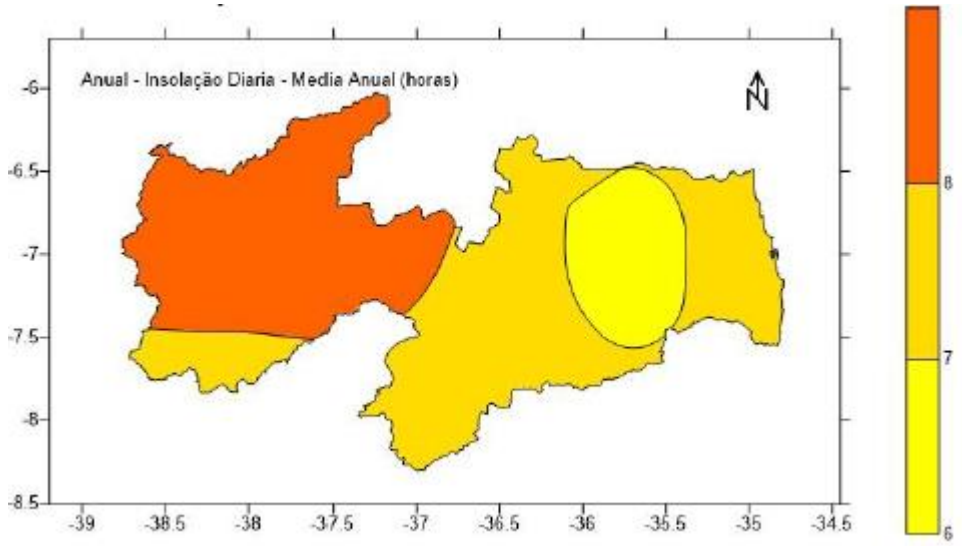
O lucro de US$ 13 por módulo reciclado torna esse método viável para empresas privadas operarem com lucro e sem depender de subsídios do estado (Huang *et al.*, 2017). Entretanto, como esse método é recente, carece de estudos de viabilidade para operação sustentável em grandes volumes (Bomgardner; Scott, 2018; Huang *et al.*, 2017). Ainda assim, os testes em escala laboratorial, com condições de ambiente e matéria prima controladas, resultaram em sucesso técnico e financeiro de recuperação de placas em fim de vida útil de forma responsável e eficaz (Tan; Shuyue; Seeram, 2022).

2.3. SETOR FOTOVOLTAICO NA PARAÍBA

O crescimento da utilização de tecnologias fotovoltaicas, entre outras fontes alternativas, faz parte da diversificação da matriz energética no Brasil. Na Paraíba, assim como na maior parte do nordeste brasileiro, os investimentos avançam devido ao ambiente propício para as usinas solares (Chigueru, 2000). Isso se justifica devido

às áreas de alta incidência solar durante o ano, apresentado na Figura 5. Recentemente a Paraíba recebeu investimentos para a construção de dois parques solares nas cidades de Coremas e Malta (ANEEL, 2006-). Atualmente as usinas solares no estado estão situadas nos municípios de Coremas, Malta e Santa Luzia, concentradas na área de maior insolação do estado (Área laranja da Figura 5).

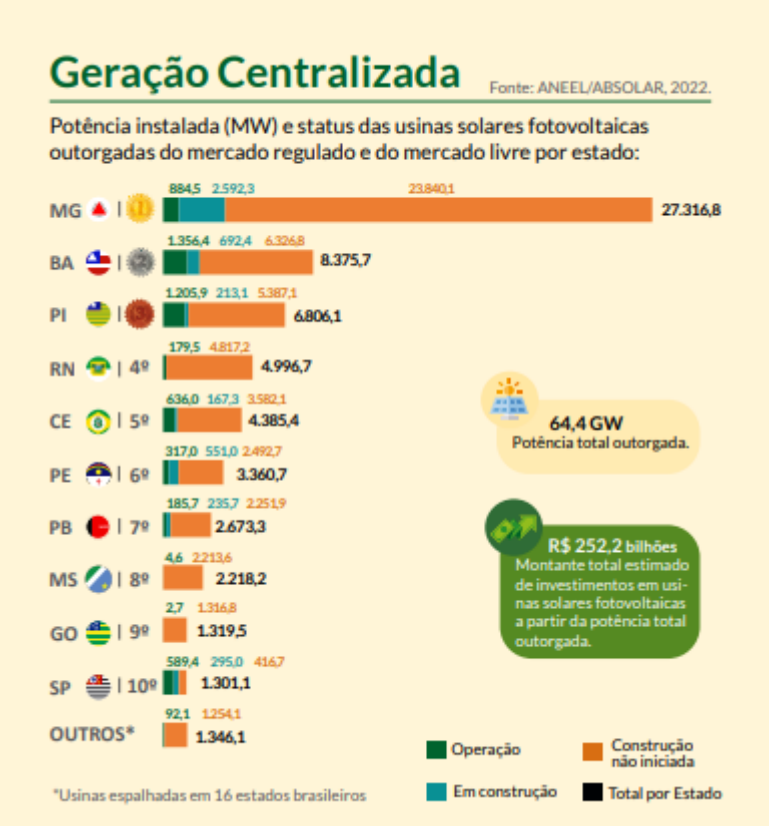
Figura 5: Média anual de insolação diária



Fonte: Roberto e Francisco (2016, p. 5)

Pelo exposto, é visto o alto potencial de geração de energia no estado da Paraíba, sendo o 7º estado em geração centralizada (Figura 6). Apesar da energia solar fotovoltaica não emitir poluentes, Ferreira Filho (2015) afirma que existem outros impactos ambientais durante a operação e comissionamento dos parques. Dessas alterações, pode-se destacar os danos a paisagem, ecossistemas, faunas e flora da região (Santos *et al.*, 2021). Além da possibilidade de contaminação de solos e da água durante o processo de comissionamento.

Figura 6: Geração centralizada no Brasil



Fonte: Adaptado do infográfico da Absolar (2022, p. 2).

Além das usinas solares presentes no estado e representando a geração centralizada de energia, a Balfar Solar é a única fabricante de módulos presente no estado (CINEPPB, 2021). Também existem cerca de 19.156 unidades consumidoras que fazem parte do sistema de geração distribuída (ANEEL, 2023). Atualmente essas unidades repassam o benefício para 34.761 unidades com potência instalada de 236.249,20 kW ligadas às linhas de distribuição da Energisa Paraíba (ANEEL, 2023).

Por fim, o estado conta com empresas de projeto e instalação de sistemas em residências e comércios, além da empresa estadual de geração e distribuição de energia (Energisa Paraíba), de órgãos legisladores como ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e a Eletrobras, e de centros de tecnologia das universidades federais para parcerias em pesquisa.

Além disso, o estado conta com legislações que impactam o setor em nível ambiental e de economia circular indiretamente (Quadro 2). A maior parte da legislação vigente no estado é proveniente de regulamentações de nível federal e abordam políticas relativas a resíduos e descartes que afetam o estado da Paraíba.

Quadro 2: Lista de legislações

Organização	Órgão	Nome	Tipo
Eletrobras	Capital Aberto	LAISE	Legislação
Ministério dos Direitos Humanos	Governo Federal	Decreto 9.571/18	Regulamento
Ministério do Meio Ambiente	Governo Federal	Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)	Política
Ministério do Meio Ambiente	Governo Federal	Lei 14.260/2021	Política
Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação	Governo Federal	Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida (PBACV)	Associação

Fonte: Autor

Dos documentos analisados, a Eletrobras apresenta o LAISE (Legislação ambiental de interesse do setor elétrico) onde está compilada a legislação vigente para o setor, dentre as quais podemos destacar o decreto 9.571/18, a lei 14.260/21 e vale destacar a existência do PBACV (Programa Brasileiro de Análise do Ciclo de Vida) que constitui uma associação.

O decreto 9.571/18 consiste no estabelecimento de diretrizes nacionais sobre empresas e direitos humanos para médias e grandes empresas, incluídas as empresas multinacionais com atividades no país. O documento determina as obrigações do estado com a proteção dos direitos humanos em atividades empresariais; as responsabilidades das empresas com o respeito aos direitos humanos; o acesso a mecanismos de reparação e remediação; e a implementação, monitoramento e avaliação das diretrizes nacionais sobre empresas e direitos humanos.

No artigo 12 do decreto 9.571/18 foi instituído que compete às empresas adotar iniciativas para a sustentabilidade ambiental. Dentre as obrigações, estão: I - ter conhecimento dos aspectos e dos impactos ambientais causados por suas atividades, seus produtos e seus serviços; II - desenvolver programas com objetivos, metas e ações de controle necessárias, vinculadas aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas, suficientes para evitar danos e causar menor impacto sobre recursos naturais como flora, fauna, ar, solo, água e utilizar, de forma sustentável, os recursos materiais; III - divulgar as informações de que trata o inciso I do caput de forma transparente, especialmente para grupos

diretamente impactados; IV - utilizar bens e serviços que não gerem resíduos, poluição ou contaminação ou que gerem a menor quantidade de resíduos e efluentes possível; V - estabelecer programa de gestão de resíduos sólidos que seja socialmente inclusivo e participativo, que vise a não geração, à redução, à reutilização, à reciclagem, ao tratamento e à disposição final; VI - considerar a substituição de materiais que resultem em resíduos mais agressivos por materiais ambientalmente mais adequados; VII - adotar medidas para conferir mais eficiência às operações, a fim de reduzir emissões de gases de efeito estufa, de modo a contribuir com o combate às mudanças climáticas; VIII - priorizar fontes de energia limpa e controlar e reduzir o consumo de energia elétrica; IX - priorizar materiais, tecnologias e matérias-primas sustentáveis de origem local; X - utilizar produtos recicláveis ou que tenham maior vida útil e menor custo de manutenção do bem ou da obra.

Um programa importante para o ecossistema é o PNRS (Política Nacional de Resíduos Sólidos), prevista na Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010. A logística reversa está descrita como “instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada” (artigo 3º, inciso XII da Lei 12.305). A mesma lei estabelece os casos de aplicação obrigatória da logística reversa, são eles: I – os agrotóxicos, seus resíduos e embalagens; II - as pilhas e baterias; III - os pneus; IV – os óleos lubrificantes, seus resíduos e embalagens; V - as lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista; VI - produtos eletroeletrônicos e seus componentes (artigo 33 da lei 12.305/2010).

Quanto aos artigos eletrônicos, existe uma responsabilidade compartilhada entre fabricantes, distribuidores, consumidores e distribuidores para a realização da coleta e descarte adequado destes resíduos eletroeletrônicos (Amblegis, 2020). Estes responsáveis devem realizar o procedimento de logística reversa, e informar aos órgãos competentes o que está sendo realizado. O descarte incorreto de produtos eletrônicos pode gerar multas de até 50 milhões de reais a depender do impacto causado (Amblegis, 2020).

No artigo 44 da Política Nacional de Resíduos Sólidos, foi instituída a lei 14.260/21. A lei visa incentivar o setor de reciclagem e retorno de matérias-primas

através do fechamento dos ciclos materiais por meio de incentivos financeiros a cadeia produtiva (Federal, 2021).

O Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida (PBACV) constitui fomentar a pesquisa e análises de ciclo de vida no setor industrial. Seu objetivo é realizar parcerias com diversas entidades, como órgãos públicos, instituições de pesquisa e associações e entidades industriais, com o intuito de fomentar a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) no Brasil (PBACV, 2012).

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo é apresentado os procedimentos metodológicos utilizados na pesquisa, introduzindo informações sobre o tipo de pesquisa, planejamento, os procedimentos de coleta de dados, a forma de tratamento dos dados e as etapas realizadas para encontrar os dados dispostos nos resultados.

A abordagem metodológica da presente pesquisa é do tipo descritiva. Segundo Fantinato (2015), a pesquisa descritiva apresenta fatos ou fenômenos de uma realidade selecionada. Com o objetivo de observar e analisar um fenômeno complexo e contemporâneo, o tipo de pesquisa é caracterizado como estudo de caso. O estudo de caso é uma estratégia de pesquisa baseada em evidências, e tem o intuito de verificar a relação entre conteúdos e testar teorias baseada nos casos (Eisenhardt, 1989). As etapas do trabalho estão dispostas no Quadro 3 e serão melhor descritas ao longo da seção.

Como descrito na introdução, este trabalho objetiva responder à pergunta de pesquisa: **Quem são os principais atores de um ecossistema circular no setor de energia fotovoltaica e quais são as suas responsabilidades, bem como os facilitadores e as barreiras presentes no ecossistema que permitirão uma transição para a economia circular?** Para isso, foi escolhido como unidade de análise do estudo de caso o ecossistema de negócios do setor de energia fotovoltaica do estado da Paraíba devido ao potencial de geração de energia fotovoltaica no nordeste brasileiro e à maior facilidade de acesso aos equipamentos graças à redução dos custos à nível nacional (ANEEL, 2006-; REN21, 2020).

A definição de um tema, objetivos e unidade de análise serviu de base para o planejamento da pesquisa (de acordo com o Quadro 3). Inicialmente, planejou-se entender, por meio da busca e da análise da literatura cinza, o contexto do estado da Paraíba e os principais tipos de atores presentes nesse setor econômico no estado. Esta fase contribuiu diretamente para levantar informações necessárias para se atingir o objetivo específico 1. Para complementar estas informações, foi planejado que seria importante realizar também entrevistas com representantes do setor para entender as relações entre os atores. Além dos atores, na fase de planejamento da pesquisa também foi realizada uma pesquisa da literatura cinza para identificar possíveis facilitadores e barreiras das iniciativas circulares no setor e no estado da Paraíba.

As iniciativas da economia circular foram utilizadas de acordo com a definição da literatura apresentadas pela Fundação Ellen MacArthur (EMAF, 2013). Para os facilitadores e barreiras, foram coletadas informações de artigos sobre o fim da vida útil dos equipamentos (BloombergNEF, 2013; Bomgardner; Scott, 2018; El-Khawad; Bartkowiak; Kümmerer, 2022; Tan; Shuyue; Seeram, 2022), além de notícias e anuários do setor. Outros facilitadores foram atribuídos com base em documentos e legislações de impacto para o setor no estado. Essas iniciativas circulares, facilitadores e barreiras, juntamente com os tipos de atores também serviram de base para a construção de um roteiro de entrevistas.

Quadro 3: Etapas do trabalho

Etapas	Descrição geral	Atividades
Planejamento de pesquisa	Explicitar os objetivos e métodos utilizados para a coleta de dados em busca dos resultados.	Uma vez definido os objetivos e a unidade de análise, planejou-se identificar na literatura cinza as iniciativas da economia circular, os facilitadores e barreiras para a economia circular, e os tipos de atores presentes no estado da Paraíba para a elaboração de um roteiro de entrevistas. A descrição do planejamento está no presente capítulo.
Coleta dos dados	Realização de entrevistas com representantes do setor	A coleta de dados ocorreu através da aplicação de um roteiro de entrevistas com 5 integrantes do setor. A descrição das etapas das entrevistas e o roteiro está no presente capítulo
Análise dos dados	Compilar os resultados das entrevistas de acordo com os objetivos do trabalho.	Transcrição das entrevistas, criação de gráficos e tabelas com base no número de citações apontado pelos entrevistados. Descrição das relações, influências e impactos citados pelos entrevistados, assim como outros detalhes pertinentes. Utilização de softwares para geração de gráficos e tabelas.
Apresentação dos resultados	Divulgar os resultados compilados com base nos objetivos e apresentar conclusões sobre o cenário encontrado.	Divulgação dos resultados dispostos no Capítulo 4, nas seções: 4.1 listando os atores, suas responsabilidades e suas relações; e 4.2, apresentando as iniciativas circulares do setor, e onde os facilitadores e barreiras mais interferem na tomada de ações para as iniciativas. Apresentação das

		contribuições, limitações e pesquisas futuras nos Capítulo 5 e 6.

Fonte: Adaptado de Eisenhardt (1989).

A fase de planejamento da pesquisa permitiu analisar dados preliminares anteriormente que prepararam à fase de coleta de dados (de acordo com o Quadro 3). Esta fase de coleta de dados foi focada no desenvolvimento de entrevistas de alguns representantes de atores presentes no estado da Paraíba. Em particular, foi possível entrevistar 5 pessoas do setor. Os entrevistados foram listados e classificados por sua atuação de acordo com o Quadro 4. O roteiro de entrevistas foi planejado para ser executado em no máximo 1 hora e ocorreram entre os meses de julho e agosto de 2023, o roteiro e suas etapas estão descritas na seção 3.1. As entrevistas foram realizadas de forma online no aplicativo Google Meet®. Todas as respostas foram gravadas e posteriormente as respostas foram transcritas nos resultados (Capítulo 4) com o consentimento do entrevistado para posterior transcrição. Foi utilizado o software PowerPoint® para apresentação do roteiro das entrevistas.

Quadro 4: Lista de entrevistados

Entrevistado	Atuação
Entrevistado 01	Comissionamento de Usinas Fotovoltaicas
Entrevistado 02	Proprietário de uma usina de microgeração residencial
Entrevistado 03	Estagiário em uma empresa de instalação de equipamentos fotovoltaicos
Entrevistado 04	Professor universitário e técnico em cursos profissionalizantes de equipamentos fotovoltaicos
Entrevistado 05	Analista de equipamentos em uma empresa distribuidora

Fonte: Autor

A análise preliminar do ecossistema ocorreu através da pesquisa bibliográfica em artigos científicos e literatura cinza, por meio da qual foi possível observar informações referentes ao setor no estado da Paraíba. A pesquisa preliminar das informações foi concentrada na análise dos artigos científicos, análise de relatórios, trabalhos acadêmicos, notícias, sites e documentos pertinentes ao setor no estado da Paraíba.

Com base nas buscas realizadas, os tipos de atores (Quadro 5) foram listados e caracterizados por suas responsabilidades dentro do setor, eles foram

caracterizados com base nas empresas, organizações e grupos citados nos documentos analisados. Essa lista serviu de base para as entrevistas e para listar cada ator específico posteriormente.

Quadro 5: Tipos de atores do setor no estado da Paraíba

Tipos de atores	Responsabilidades
Fabricantes e distribuidoras	Fabricação de componentes e representação comercial
Montadoras e Instaladoras	Projeto e instalação de sistemas de geração (Integralizadores)
Consumidores (Microgeração)	Geração de até 75kVA para consumo e compartilhamento
Usinas solares (Minigeração	Geração superior a 75kVA para distribuição
Concessionário elétrico	Mantenedor, fiscalizador e gerenciador da rede elétrica e seus usuários
Órgãos públicos	Legisladores, fiscalizadores e regulamentadores dos atores
Universidades	Envolvimento em pesquisa, desenvolvimento e qualificação de mão de obra

Fonte: Autor

Para analisar a economia circular dentro do ecossistema, foi necessário utilizar definições deste conceito. As iniciativas circulares utilizadas partiram do conceito apresentado da fundação Ellen MacArthur (EMAF, 2013), sendo elas o *slowing* (maior durabilidade ou vida útil dos produtos), *narrowing* (menor uso de recursos), *closing* (reuso/reaproveitamento/reciclagem de recursos) e *intensifying* (máxima utilização do produto). O Quadro 6 apresenta o código utilizado para cada iniciativa, além daquilo que foi integrado ao roteiro de entrevistas. Essas iniciativas foram utilizadas nas entrevistas como base para identificar, quais atores a praticam, e quais as ações envolvidas.

Quadro 6: Iniciativas circulares codificadas

Iniciativas	Códigos
Intensifying (máxima utilização do produto)	
Slowing (maior durabilidade ou vida útil dos produtos)	
Narrowing (menor uso de recursos)	

Closing (reuso/reaproveitamento/reciclagem de recursos)	

Fonte: Autor

Os facilitadores (Quadro 7) e barreiras (Quadro 8) da economia circular no setor foram identificados de duas formas. A primeira, percebeu-se com base em ações existentes, práticas e projetos do setor que possam contribuir com as iniciativas da economia circular antes (Projeto), durante (Uso) e após a vida útil dos componentes (Descarte). A segunda, ocorreu em busca de entender os mecanismos e estratégias circulares para a geração de valor dentro do ecossistema. Entendeu-se que seria necessário analisar as legislações, políticas e regulamentos vigentes para o setor e para a economia circular em busca de entender se as regras em vigor configuram facilitadores ou barreiras.

Quadro 7: Facilitadores da economia circular no setor fotovoltaico

Facilitadores	**Origem**
Utilização de métodos de reciclagem das placas e seus componentes	Trabalhos acadêmicos (Bomgardner; Scott, 2018)
Design robusto, visando vida útil elevada	Trabalhos acadêmicos (Tan; Shuyue; Seeram, 2022)
Surgimento de legislação obrigando as empresas a possuírem planos de ação sustentáveis	Trabalhos acadêmicos (Chen, 2018)
Política nacional de resíduos sólidos como facilitador de iniciativas circulares	Lei 12.305/10
Logística reversa como facilitador de iniciativas circulares e descarte inadequado	Artigo 33 da lei 12.305/2010
Programa de avaliação do ciclo de vida como facilitador do prolongamento de vida útil	PBACV
Institui as empresas a adotarem medidas de sustentabilidade ambiental	Decreto 9.571/18
Incentivos fiscais e benefícios em projetos de reuso e reciclagem	Lei 14.260/21

Fonte: Autor

Quadro 8: Barreiras da economia circular no setor fotovoltaico

Barreiras	**Origem**
Dificuldade em destinar os módulos e equipamentos ao final da vida útil.	Trabalhos acadêmicos (Chen, 2018)
Alto valor financeiro e energético para a realização de reciclagem das placas e componentes.	Trabalhos acadêmicos (El-Khawad; Bartkowiak; Kümmerer, 2022)

Design robusto que dificulta os processos de reforma, reparo e remanufatura.	Trabalhos acadêmicos (Tan; Shuyue; Seeram, 2022)

Fonte: Autor

Foram realizadas buscas de relatórios, trabalhos acadêmicos e notícias sobre o setor no estado da Paraíba, como também foram coletadas informações de artigos sobre as práticas realizadas ao fim da vida útil dos equipamentos (BloombergNEF, 2013; Bomgardner; Scott, 2018; El-Khawad; Bartkowiak; Kümmerer, 2022; Tan; Shuyue; Seeram, 2022). A escolha das barreiras e facilitadores foram consideradas com base nos problemas enfrentados atualmente, também levando em consideração algumas práticas realizadas recentemente, servindo para que os entrevistados pudessem identificar sua relevância e seu local de impacto dentro do setor.

Em paralelo, foram analisados sites de órgãos públicos, com intuito de verificar a legislação vigente. Analisada a legislação, foi possível verificar que o material selecionado pode influenciar na implementação de iniciativas circulares. Além disso, toda a legislação que regulamenta o setor na Paraíba institui facilitadores, seja por meio de incentivos, regras, fiscalizações ou planos de ações.

O sistema de códigos foi adotado em busca de facilitar a construção de um mapa visual do ecossistema, identificando onde ocorrem ações para cada iniciativa circular e os locais de influência dos facilitadores e barreiras. Os códigos (Quadros 6, 9 e 10) foram atribuídos ao roteiro de entrevistas, para que os entrevistados pudessem relacionar as informações de suas respostas em cada código e atribui-lo com os tipos de atores durante a entrevista.

Quadro 9: Facilitadores da economia circular codificadas

Facilitadores	Código
Utilização de métodos de reciclagem das placas e seus componentes	
Design robusto, visando vida útil elevada	
Surgimento de legislação obrigando as empresas a possuírem planos de ação sustentáveis	
Política nacional de resíduos sólidos como facilitador de iniciativas circulares	

Logística reversa como facilitador de iniciativas circulares e descarte inadequado	
Programa de avaliação do ciclo de vida como facilitador do prolongamento de vida útil	
Decreto 9.571/18 institui as empresas a adotarem medidas de sustentabilidade ambiental	
Incentivos fiscais e benefícios em projetos de reuso e reciclagem (Lei 14.260/21)	

Fonte: Autor

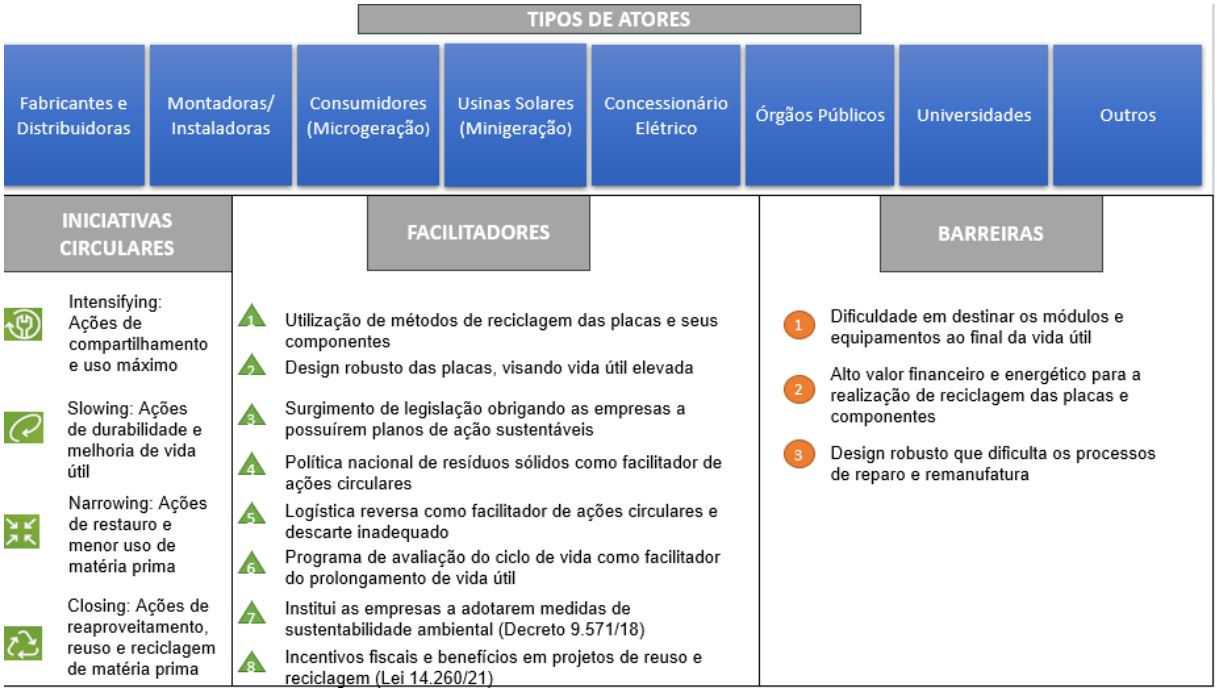
Quadro 10: Barreiras da economia circular codificadas

Barreiras	Código
Dificuldade em destinar os módulos e equipamentos ao final da vida útil.	
Alto valor financeiro e energético para a realização de reciclagem das placas e componentes.	
Design robusto que dificulta os processos de reforma, reparo e remanufatura.	

Fonte: Autor

Após definido e codificado os tipos de atores do ecossistema, as iniciativas circulares, os facilitadores e as barreiras, foi gerada uma estrutura base para realização das entrevistas (Figura 7) com o auxílio do software PowerPoint®. Para isso, optou-se por atribuir os tipos de atores, as iniciativas circulares, os facilitadores e as barreiras em um único local. Isso contribuiu para que os entrevistados pudessem relacionar os códigos com os tipos de atores com as informações sempre disponíveis.

Figura 7: Roteiro de entrevistas



Fonte: Autor

A duração das entrevistas variou entre 40 minutos e 1 hora. Inicialmente, foi realizada uma breve explicação sobre cada tipo de ator e depois pedia-se para que o entrevistado identificar e explicar as relações entre eles. Posteriormente, realizou-se uma explicação das iniciativas envolvidas e solicitou-se ao entrevistado que identificasse ações de cada tipo de ator que possuam relação com cada iniciativa circular. A cada iniciativa identificada, o código era adicionado ao tipo de ator. Os facilitadores e barreiras seguiram a mesma lógica, na qual uma breve explicação de cada foi apresentada e, em seguida, foi solicitado que o entrevistado identificasse que tipo de ator era mais impactado, e por qual motivo.

As entrevistas foram gravadas com o consentimento do entrevistado e, uma vez finalizada, as respostas foram transcritas nos resultados. Os dados geraram os quadros e tabelas, e com o auxílio do aplicativo UCINET® foi gerado um mapa visual da relação entre atores.

As entrevistas proporcionaram a oportunidade de obter uma compreensão aprofundada de certas perspectivas individuais do cenário da economia circular e do setor, que coletivamente forneceram uma visão refinada do atual

ecossistema que foi teorizado a partir do estudo da literatura e da pesquisa documental. As entrevistas também forneceram informações da realidade e destaca alguns dos principais facilitadores e barreiras (reforçando ou contradizendo as suposições do estudo da literatura e da pesquisa documental). As entrevistas também proporcionaram uma visão do impacto da legislação vigente para a implementação de iniciativas circulares no cenário atual. A análise dos resultados coletados nas entrevistas está disposta nas seções 4.1 e 4.2.

Na análise dos dados (de acordo com o Quadro 3), foram agrupadas todas as informações levantadas nas duas fases anteriores permitindo identificar os tipos de atores presentes no estado, as iniciativas da economia circular, os facilitadores e barreiras das iniciativas para o setor no estado. Para auxílio das análises dos dados, foram utilizados os softwares Microsoft Excel® para registro das tabelas, e do UCINET® para criação de uma imagem visual da rede de relações entre os atores. Na seção 3.1 foram descritos a fase de planejamento da pesquisa e os procedimentos para coleta de dados.

Para a apresentação dos resultados (de acordo com o Quadro 3), foram elaborados os capítulos 4, 5 e 6 desse trabalho de conclusão de curso. Os dados coletados na literatura cinza e as respostas dos entrevistados permitiram descrever na seção 4.1 as relações entre atores, suas responsabilidades no setor e seu principal tipo de parceria; e na seção 4.2 as ações para cada iniciativa circular no setor, além do papel principal realizado pelos atores participantes, facilitadores e barreiras que mais influenciam o setor, e os respectivos atores mais impactados. A coleta dos dados com as entrevistas permitiu a criação dos quadros com as responsabilidades dos atores, um diagrama de relações entre atores, tabelas com os tipos de relações entre atores e o tipo de envolvimento entre eles. Além disso, foram também introduzidas tabelas com o número de citações dos entrevistados para os facilitadores e barreiras em busca de identificar os atores mais influenciados, e os facilitadores e barreiras que mais influenciam os atores.

Esses resultados contribuíram para a criação de um mapa visual final para se ter uma visão geral do ecossistema circular no setor. Nos capítulos 5 e 6, esses resultados foram responsáveis por identificar destaques e fraquezas do trabalho diante do referencial envolvido, bem como apresentar sugestões de pesquisas futuras e contribuições para a área de pesquisa.

4. RESULTADOS

4.1. ANÁLISE DOS ATORES E SUAS RESPONSABILIDADES

A coleta de dados nas entrevistas, junto com a literatura cinza da fase de planejamento da pesquisa, permitiu desenvolver uma lista dos principais atores do setor fotovoltaico dentro do ecossistema no estado da Paraíba, seus tipos, locais de atuação e responsabilidades. Esta lista de atores (Quadro 11) é composta principalmente por órgãos públicos, usinas solares de minigeração ou superior a 75 kVA, distribuidoras e centros de pesquisa. A lista foi continuamente atualizada ao longo do projeto e os atores relevantes foram adicionados com base nas respostas dos participantes das entrevistas e nas referências encontradas nas análises de artigos e legislação.

O Quadro 11 foi dividido em quatro tópicos, sendo eles: Atores – podendo ser uma única empresa, órgão, instituição ou um grupo específico de difícil mensuração; Tipo – sinaliza especificamente o tipo de trabalho/atuação do ator; Atuação – especifica o nível regional de atuação do ator, podendo ser municipal, estadual ou federal; Responsabilidades – estabelece o que esses atores realizam como atividade no ecossistema analisado.

Quadro 11: Lista de atores

Ator	Tipo	Atuação	Responsabilidades
Balfar	Fabricantes e Distribuidoras	Estadual	Responsável por fabricar painéis, estruturas e outros componentes de um sistema fotovoltaico
Centrysol	Fabricantes e Distribuidoras	Estadual	Responsável por revender, armazenar e distribuir componentes de um sistema fotovoltaico
Vertys	Fabricantes e Distribuidoras	Estadual	Responsável por revender, armazenar e distribuir componentes de um sistema fotovoltaico
Empresas de Instalação de componentes fotovoltaicos	Montadoras e Instaladoras	Estadual	Empresas que realizam projetos e instalação de sistemas fotovoltaicos para geração própria.

Complexo Coremas (Rio Alto)	Usina Solar (Minigeração Superior a 75kVA)	Estadual	Responsável pela geração de energia fotovoltaica em grande escala
Complexo Angico e Malta (Proton Energy)	Usina Solar (Minigeração Superior a 75kVA)	Estadual	Responsável pela geração de energia fotovoltaica em grande escala
Complexo Santa Luzia (Rio Alto)	Usina Solar (Minigeração Superior a 75kVA)	Estadual	Responsável pela geração de energia fotovoltaica em grande escala
Energisa Paraíba	Concessionária	Estadual	Responsável por gerenciar e coordenar a geração, distribuiçãoe consumo de energia elétrica no estado da Paraíba
Geração Distribuída	Consumidores (Microgeração inferior a 75Kva)	Estadual	Consumidores com capacidade de geração para consumo próprio através da microgeração (até 75Kva)
ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica)	Órgão Público	Federal	Responsável por definir as regras de geração, distribuição e consumo de energia.
Eletrobrás	Órgão Público	Federal	Responsável por coordenar as empresas do setor elétrico
SUDEMA	Órgão Público	Estadual	Responsável pela execução da política de proteção e preservação de meio ambiente do estado da Paraíba.
UFPB (CEAR)	Universidades	Estadual	Centro de pesquisa voltado para o desenvolvimento de projetos no setor elétrico
UFCG (CEEI)	Universidades	Estadual	Centro de pesquisa voltado para o desenvolvimento de projetos no setor elétrico

Fonte: Autor, com base nas entrevistas

Dos atores encontrados no estado, a Balfar é a única fabricante de módulos e componentes no estado, e as empresas Centrysol e Vertys como as únicas distribuidoras de componentes no estado. Por outro lado, não foi possível mensurar o número de empresas que realizam projetos e instalação de sistemas fotovoltaicos no estado.

Devido ao alto potencial de geração de energia solar, foi possível encontrar três grandes complexos de usinas solares no interior do estado, mais precisamente nas

localidades de Angico, Malta, Santa Luzia e Coremas. O complexo Coremas é formado pelos parques Coremas I, II e III, sendo gerenciado pela Rio Alto. O projeto conta com uma capacidade de 300 MWp e o empreendimento equivale a 1.100 campos de futebol. Um outro complexo fotovoltaico, denominado de Angico e Malta está instalado no município de Malta. As obras do complexo se iniciaram em meados de 2017 onde foram instados 195.000 módulos fotovoltaicos, com uma capacidade instalada de 63 MWp. No complexo Santa Luzia, existem 21 usinas solares fotovoltaicas projetadas para uma capacidade de operação de 1.050 MWp. Todos os parques foram desenvolvidos a partir da parceria entre as empresas WEG, Proton Energy e Rio Alto (Santos *et al.*, 2021).

Quanto à distribuição de energia, o estado possui somente a Energisa como concessionário elétrico responsável pela distribuição e manutenção das redes elétricas. Conectados as linhas de distribuição, estão também os participantes da geração distribuída, o que, de acordo com a própria empresa, contabiliza um número de 34.761 unidades de microgeração comercial e residencial.

No âmbito regulatório, o estado possui a Superintendência de Administração do Meio Ambiente (SUDEMA), que regulamenta a construção de grandes usinas solares com a realização de estudos de impacto ambiental no local de construção. Além disso, a ANEEL e a Eletrobras dispõem de regras e regulamentações para o setor a nível nacional, o que impacta também o setor no estado.

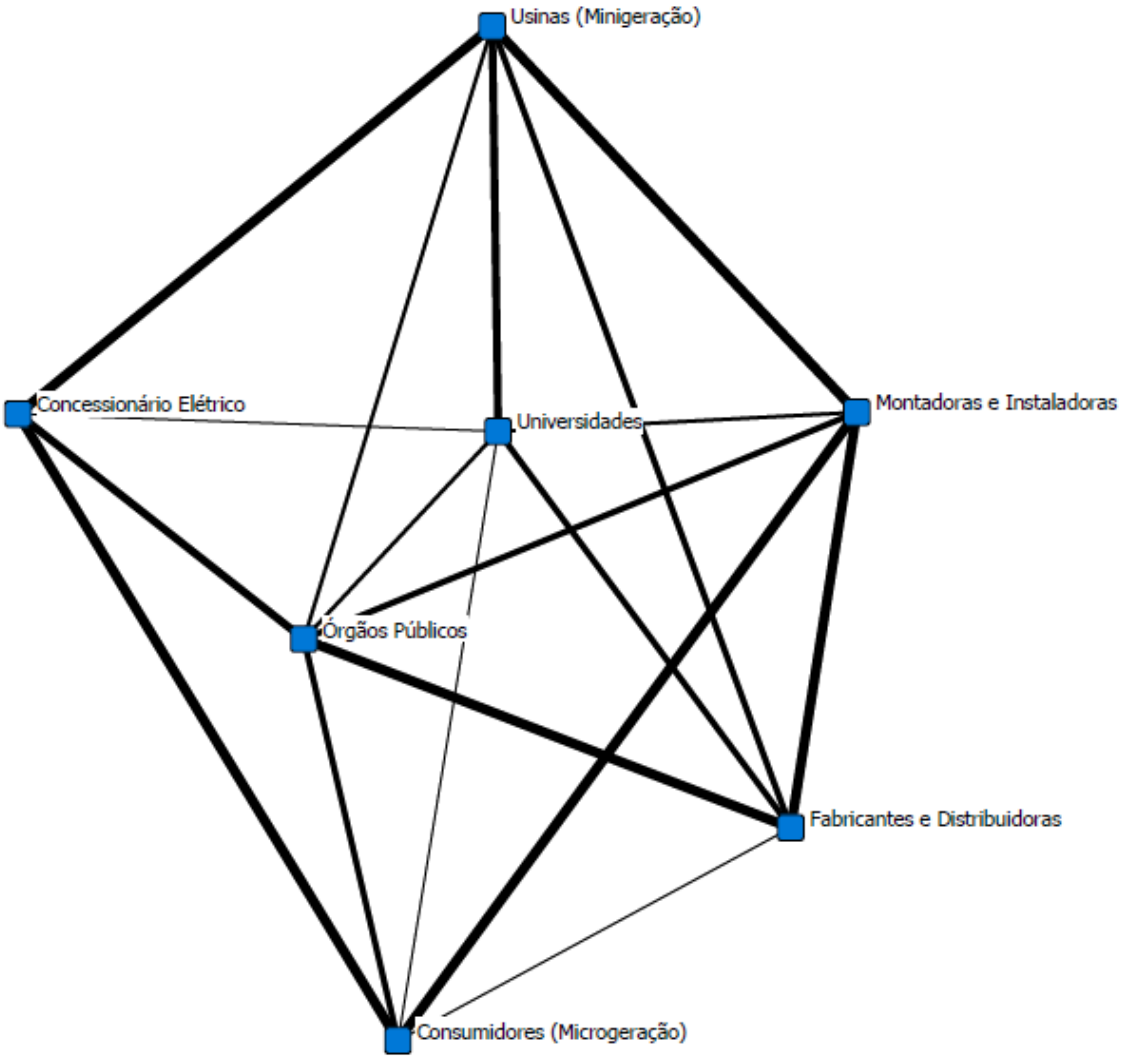
E por fim, as universidades federais (UFPB e UFCG), contam com centros de tecnologia com a presença de cursos de graduação em energias renováveis, engenharias, pesquisa e desenvolvimento de projetos e qualificação de mão de obra no setor.

Uma empresa pioneira no processamento e reciclagem de painéis solares no Brasil foi citada por alguns entrevistados. Essa empresa não entra na listagem por não estar situada no estado da Paraíba e nem possuir parcerias com empresas no estado que sejam de conhecimento dos entrevistados.

De acordo com as entrevistas, os tipos de atores encontrados possuem relações diretas entre si, seja através de parceria, acordos, negócios comerciais ou regulação. Com base nas respostas, na Figura 8 são representados os tipos de atores e suas relações diretas, sendo a espessura das linhas referente ao número de citações obtidas nas entrevistas (tabela 1), ou seja, quanto mais espessa, maior o

número de citações. A figura foi realizada com o uso do software UCINET® com os dados de citações dispostos na tabela 1.

Figura 8: Relações diretas entre os tipos de atores



Fonte: Autor, com base nas entrevistas.

Tabela 1: Número de citações e principal tipo de relações entre os atores.

Relações	Fabricantes e Distribuidoras	Montadoras e Instaladoras	Consumidores (Microgeração)	Usinas (Minigeração)	Órgãos Públicos	Concessionário Elétrico	Universidades
Fabricantes e Distribuidoras	X	Comercial	Suporte	Comercial	Regulatória	N/E	Pesquisa e Desenvolvimento
Montadoras e Instaladoras	5	X	Técnica	Técnica	Regulatória	N/E	Mão de Obra Especializada
Consumidores (Microgeração)	1	5	X	N/E	Regulatória	Infraestrutura	Mão de Obra Especializada
Usinas (Minigeração)	3	5	0	X	Regulatória	Infraestrutura e fiscalização	Mão de Obra Especializada
Órgãos Públicos	5	3	3	2	X	Regulatória	Regulação de Cursos Profissionalizantes
Concessionário Elétrico	0	0	5	5	4	X	Parcerias de Estágio
Universidades	3	2	1	4	2	1	X

Fonte: Autor, com base nas entrevistas

De acordo com as entrevistas, o Brasil não possui tecnologia própria de fabricação das placas fotovoltaicas, os componentes são importados para que ocorra a fabricação das placas em solo nacional. As fabricantes atuam na fabricação e fornecimento de equipamentos, como módulos, inversores, baterias entre outros, e prestam serviços de garantia desses equipamentos. Segundo os entrevistados, **as fabricantes e distribuidoras possuem relações diretas** com: 1 – Montadoras e Instaladoras, através de fornecimento de equipamentos e retorno de garantias; 2 – Consumidores, devido ao fornecimento de garantia para os equipamentos; 3 – Usinas, através de fornecimento direto de equipamentos; 4 – Órgãos públicos realizam dimensionamento de impostos, subsídios e encargos em equipamentos, legisla sobre os processos de fabricação e seus impactos, e fornece incentivos fiscais e 5 – Universidades, através de pesquisa e desenvolvimento em produtos e fornecimento de mão de obra qualificada.

As **montadoras atuam como um intermediário entre os fornecedores e os consumidores**; seu principal papel é a realização de projetos fotovoltaicos, instalação e manutenção dos equipamentos para usinas e consumidores. Também realizam o papel de ligação entre o consumidor final com os distribuidores e fabricantes, para a venda ou a garantia do equipamento. Segundo os entrevistados, as instaladoras possuem relações diretas com: 1 – Fabricantes e Distribuidores, sendo esses responsáveis por fornecer materiais e equipamentos que serão instalados no consumidor final ; 2 – Órgãos públicos, instituem regras de instalação, incentivos a geração de energia limpa e regulamentação de profissionais instaladores ; 3 – Consumidores, realizando projetos, instalação, manutenção e suporte aos equipamentos ; 4 – Usinas, fornecimento de mão de obra, projetos, manutenção e venda de equipamentos e 5 – Universidades, através de oportunidades de estágio e de empreendimento dos alunos no setor.

Os **consumidores de microgeração possuem, basicamente, um papel de geração de energia, consumo e compartilhamento, e suas relações diretas são**: 1 – Fabricantes e Distribuidores, fornecem garantia e suporte aos equipamentos, normalmente com intermédio das instaladoras, mas pode ocorrer diretamente ; 2 – Montadoras e Instaladoras, realizam projeto, instalação e suporte de garantia com o fabricante ou distribuidor, bem como serviços de manutenção; 3 – Órgãos públicos, estabelecem taxas e regras de geração; 4 – Concessionário Elétrico, através de

contrato de uso da rede e liberação dos sistemas e fiscalização; e 5 – Universidades, a qual fornece mão de obra qualificada para a instalação dos sistemas.

As **usinas de minigeração ou superiores** possuem capacidade de geração acima de 75kVA, essas usinas são construídas através de parcerias de grandes empresas que compartilham a energia gerada, buscando reduzir os custos de energia. Dentro do ecossistema, **possuem relação direta com**: 1 – Montadoras e Instaladoras, através de contratos para o comissionamento das usinas; 2 – Fabricantes e Distribuidoras, fechando contratos para compra dos equipamentos e suporte de garantia; 3 – Órgãos Públicos, seguindo as regras e legislações estabelecidas, incentivos e estudos de impactos ambientais no local de construção; 4 – Concessionários, através do uso da rede para distribuição da energia e fiscalização; e 5 – Universidades, com base em estudos, pesquisa e desenvolvimento de soluções de melhorias para o comissionamento, local de instalação, impactos e eficiência de geração e mão de obra qualificada.

Os **órgãos públicos** possuem funções reguladoras, através de regras para o funcionamento dos sistemas de geração, cobrança de impostos e de incentivos fiscais. Dentro do ecossistema, os órgãos públicos **possuem relações diretas** com todos os envolvidos, sendo: 1 – Fabricantes e distribuidores, com a cobrança de impostos, incentivos, regras de atuação e normas de fabricação; 2 – Montadoras e Instaladoras, através de regulamentações de profissionais, incentivos em geração limpa e normas de instalação; 3 – Consumidores, definindo as regras de geração e impostos; 4 – Usinas, através de regras para a construção, estudos ambientais, liberação e incentivos fiscais; 5 – Concessionário Elétrico, através de regras de distribuição, uso da rede e incentivos fiscais e 6 – Universidades, com base nas oportunidades de cursos profissionalizantes para instaladores no setor.

Os **concessionários elétricos** possuem como papel principal a disponibilização e manutenção das redes de distribuição no estado e fiscalização dos sistemas geradores ativos. Dentro do ecossistema, **suas relações diretas** são com: 1 – Órgãos Públicos, seguindo as regras de distribuição; 2 – Consumidores, através do uso da rede e contratos para liberação dos sistemas; 3 – Usinas, também devido à utilização da rede e liberação dos sistemas; e 4 – Universidades, liberação da rede para a geração dos sistemas das universidades e captação de mão de obra.

E por fim, as universidades, que de acordo com os entrevistados tem como principal papel o desenvolvimento de pesquisas para os produtos, sistemas e

gerenciamento, bem como formação de mão de obra qualificada. Dentro do ecossistema, as universidades possuem relações diretas com todos os envolvidos, sendo: 1 – Fabricantes e Distribuidores, fornecendo mão de obra, pesquisa e desenvolvimento de novos produtos ; 2 – Montadoras e Instaladoras, através de mão de obra; 3 – Consumidores, recebendo profissionais capacitados para a instalação e manutenção dos sistemas; 4 – Usinas, com o desenvolvimento de projetos e absorção de mão de obra; 5 – Concessionário Elétrico, fornecimento de mão de obra e uso da rede com base nos sistemas de geração dispostos nas universidades e 6 – Órgãos Públicos, através da disponibilização de cursos profissionalizantes e capacitação.

4.2. ANÁLISE DAS INICIATIVAS CIRCULARES, FACILITADORES E BARREIRAS

De acordo com o panorama de ecossistema circular proposto por Trevisan (2022), deve-se obter uma visão dos atores e sua geração de valor sustentável através de ações e atividades com base nos princípios da economia circular. Diante disso, esta seção apresenta os resultados das entrevistas para concluir o objetivo específico 2 de identificar as iniciativas circulares dos atores envolvidos no setor de energia solar fotovoltaica no estado da Paraíba (Brasil), seus facilitadores e barreiras para as iniciativas da economia circular nesse ecossistema.

Diante das iniciativas circulares utilizadas no roteiro de entrevistas, as respostas dos entrevistados contribuíram para a criação do Quadro 12 da presente seção. No Quadro foi realizada uma correlação entre os tipos de atores (colunas), e as iniciativas circulares (linhas), identificando em que tipo de ator existem iniciativas e quais são as ações do setor para aquele tipo de iniciativa. De acordo com as entrevistas, algumas ações referentes às iniciativas circulares foram identificadas no ecossistema, essas ações foram descritas no Quadro 12, e no campo dos atores, foram atribuídos os níveis de atuação do ator para a participação em cada ação.

O campo “outros” do Quadro 12 refere-se a empresa de reciclagem anteriormente citado pelos entrevistados. Mesmo não possuindo influência no estado da Paraíba atualmente, a empresa já possui influência nas iniciativas circulares no setor e futuramente atingirá o mesmo nível de envolvimento quando estiver presente no estado.

Quadro 12: Ações e envolvimento dos tipos de atores nas iniciativas circulares

Iniciativas Envolvidas	Descrição das ações	Fabricantes Distribuidores	Montadoras Instaladoras	Consumidores (Microgeração)	Usinas (Minigeração)	Concessionária	Órgãos Públicos	Universidades	Outros
Intensifying: Ações de compartilhamento e uso máximo	Atualização de equipamentos para melhor eficiência	Líder						Pesquisa	
	Projetos de sistema fotovoltaico sob demanda de consumo		Consulta Técnica	Requisitantes	Requisitantes				
	Compartilhamento da energia gerada		Consulta Técnica	Geração	Geração	Distribuição	Incentivos e regulamentação	Geração e pesquisa	
Slowing: Ações de durabilidade e melhoria de vida útil	Atualizações e melhorias em novos produtos	Líder							
	Pesquisa e desenvolvimento de equipamentos mais duráveis	Líder					Incentivos	Pesquisa	
Narrowing: Ações de restauro e menor uso de matéria prima	Modificação dos processos de produção, buscando mais eficiência de fabricação	Líder						Pesquisa	
	Reparo de equipamentos defeituosos	Líder	Representante						

Closing: Ações de reaproveitamento, reuso e reciclagem de matéria prima	Coleta de equipamento defeituoso	Líder	Representante						
	Projeto de reciclagem de metais raros das placas	Fornecedor	Fornecedor	Fornecedor	Fornecedor			Pesquisa	Líder
	Reutilização de equipamentos usados em outros sistemas		Líder	Fornecedor	Fornecedor				
	Reaproveitamento de restos de materiais de construção para obras sociais				Líder		Representante		

Fonte: Autor, com base nas entrevistas

Para a iniciativa de *Intensifying*, foram citadas três ações e seus respectivos atuantes, sendo elas: 1 – Atualização de equipamentos para melhor eficiência, trata-se de pesquisa e desenvolvimento de novas gerações de componentes fotovoltaicos, visando maior uso de um único produto. Essa ação tem como líder as fabricantes, atuando no desenvolvimento de atualizações dos seus produtos e das universidades com pesquisas de novas tecnologias; 2 - Projetos de sistema fotovoltaico sob demanda de consumo, essa ação tem as montadoras e instaladoras como consultores por parte dos requerentes, que nesse caso são os consumidores e as usinas solares. Nessa ação, o sistema fotovoltaico será projetado e instalado para gerar uma quantidade de energia próxima suficiente do consumo, evitando ociosidade do sistema; 3 – Compartilhamento da energia gerada, nessa ação, o sistema que consumir menos que o produzido poderá compartilhar com a rede seu excedente, com redução de perdas. As montadoras e instaladoras tem o papel de consultor técnico, já que o cliente pode optar por suprir lugares distintos com apenas um sistema, ou ampliar o sistema atual sem a necessidade de obter todos os componentes novamente. Os clientes são os consumidores e usinas, que nesse caso possuem o papel de geração de energia. Já o concessionário elétrico participa com o papel de

distribuição, já que o excedente de energia gerado pelos clientes só pode ser armazenado em um sistema com baterias, com isso, o concessionário realiza o compartilhamento por meio das redes de distribuição e créditos de energia. As universidades também possuem sistemas de geração e realizam projetos de melhoria dessa prática e dos sistemas. E por fim, os órgãos públicos apresentam incentivos para a utilização de energia limpa e define as regras e limites para a prática.

A iniciativa circular de *Slowing* apresentou duas ações similares, sendo: 1 – Atualizações e melhorias em novos produtos, onde as fabricantes são líderes, pois nessa ação elas realizam a atualização ou melhoria de um equipamento, visando maior durabilidade, o que gera menor número de equipamentos defeituosos e retornos por garantia. E 2 - Pesquisa e desenvolvimento de equipamentos mais duráveis, onde a qual é complementar a anterior, com as fabricantes como líder, porém com o apoio das universidades no campo de pesquisa e dos órgãos públicos com o fornecimento de incentivos para que os componentes passem a durar mais tempo em funcionamento na cadeia de ciclo de vida. Um exemplo disso é que os módulos solares de modelos antigos duravam em média 10 anos, enquanto os novos modelos podem chegar a 25 anos.

Para a iniciativa circular *Narrowing*, os entrevistados identificaram duas ações, sendo: 1 – Modificação dos processos de produção, buscando mais eficiência de fabricação, no qual as fabricantes têm o papel de líder na alteração dos processos, tecnologias e materiais de fabricação, buscando mais eficiência de produção e menor número de defeitos. Nesse caso, as universidades participam com um papel de pesquisa de novas tecnologias e métodos de produção; 2 - Reparo de equipamentos defeituosos, no qual equipamentos que retornam para a fabricante com defeito no período de garantia passam por reparos e retornam ao mercado. Entretanto, os módulos não têm a capacidade de reparo. Nesse caso as fabricantes têm a liderança da ação, já que elas realizam os processos de reparo, eliminando a necessidade de se produzir um novo produto. Já as montadoras e instaladoras possuem a função de representação, pois um cliente final com produto defeituoso retorna o equipamento para o instalador, e esse refaz a logística até o fabricante no início da cadeia.

Por fim, a iniciativa circular *Closing* apresentou o maior número de citações, com o total de 4 ações identificadas, sendo: 1 – Coleta de equipamento defeituoso, pois as fabricantes reabsorvem esses equipamentos de seus representantes, nesse caso as montadoras e instaladoras. Esses equipamentos podem ser reparados (ação

2 da iniciativa *Narrowing*), armazenados até que se encontre uma destinação adequada ou enviados para empresas especializadas em reciclagem (citada como “outros”) quando estas firmarem parcerias no estado (ação 2 do *Closing*); 2 - Projeto de reciclagem de metais raros das placas, essa ação foi identificada como possuindo um líder não citado no conjunto de atores, por se tratar de uma empresa pioneira no Brasil, no processo de reciclagem de módulos e componentes de sistemas fotovoltaicos. Essa empresa, ou outras que possam surgir no mercado, possui seu fornecimento de módulos defeituosos ou em fim de vida útil, por parte das fabricantes, montadoras, consumidores e usinas, além do auxílio das universidades em pesquisa de desenvolvimento de novos métodos de reciclagem, como o desenvolvido na universidade do Arizona (Bomgardner; Scott, 2018); 3 - Reutilização de equipamentos usados em outros sistemas, trata-se de um processo pouco comum de liderança de algumas montadoras e instaladoras, pois o módulo sem destinação é usado para a fabricação de outros produtos, como uma mesa por exemplo. Esses módulos são retornados dos consumidores ou das usinas, esse último é pouco comum, já que normalmente se opta por armazenar ou devolver ao fabricante; 4 - Reaproveitamento de restos de materiais de construção para obras sociais, essa última ação tem como líder as usinas solares, onde durante sua construção ocorre o manuseio de materiais de construção, esse excedente de material extraído do solo ou adquirido pela empresa é repassado aos representantes dos órgãos públicos, dando destinação a comunidades ou obras sociais que venham a beneficiar as comunidades no entorno da usina.

A análise dos facilitadores e barreiras, em uma visão geral, ajuda a entender quais fatores levaram os atores a implementarem estratégias de economia circular e quais desafios enfrentaram em tal situação, buscando compreender quais fatores podem ajudar a impulsionar um movimento em direção à economia circular e o que poderia impedir ou dificultar esse processo.

Ao discutir sobre os facilitadores e barreiras, os entrevistados apontavam qual deles impactavam determinados atores. Diante das respostas foram geradas duas tabelas, sendo a primeira a tabela 2 relacionando o tipo de ator (coluna) com o facilitador (linhas). A tabela quantifica o número de respostas obtido nas entrevistas para cada facilitador com cada tipo de ator, buscando identificar onde e qual facilitador mais impacta positivamente a tomada de iniciativas circulares dentro do ecossistema.

O campo “outros” das tabelas 2 e 3 referem-se a empresa de reciclagem anteriormente citado pelos entrevistados. Mesmo não possuindo influência no estado da Paraíba atualmente, os entrevistados citaram a influência dos facilitadores e barreiras na empresa caso ela faça parte do ecossistema no estado em futuro próximo.

Tabela 2: Influência dos facilitadores da economia circular nos tipos de atores

Facilitadores	**Código**	Fabricantes Distribuidores	Montadoras Instaladoras	Consumidores (Microgeração)	Usinas (Minigeração ou superior)	Concessionário	Órgãos Públicos	Universidades	Outros	**Total**
Utilização de métodos de reciclagem das placas e seus componentes		4	3	1	1	1	1	1	0	**12**
Design robusto, visando vida útil elevada		3	2	4	4	2	0	0	0	**15**
Surgimento de legislação obrigando as empresas a possuírem planos de ação sustentáveis		2	1	2	2	1	4	1	0	**13**
Política nacional de resíduos sólidos como facilitador de ações circulares		2	1	2	3	1	4	0	1	**14**
Logística reversa como facilitador de iniciativas circulares e descarte adequado		2	1	3	3	1	2	0	1	**13**
Programa de avaliação do ciclo de vida como facilitador do prolongamento de vida útil		1	0	1	0	1	2	2	0	**7**
Decreto 9.571/18 institui as empresas a adotarem medidas de sustentabilidade ambiental		2	2	1	1	1	5	1	1	**14**

Facilitadores	Código	Fabricantes Distribuidores	Montadoras Instaladoras	Consumidores (Microgeração)	Usinas (Minigeração ou superior)	Concessionário	Órgãos Públicos	Universidades	Outros	Total
Incentivos fiscais e benefícios em projetos de reuso e reciclagem (Lei 14.260/21)	8	2	2	2	2	2	2	2	1	**15**
Total		**18**	**12**	**16**	**16**	**10**	**20**	**7**	**4**	**103**

Fonte: Autor, com base nas entrevistas

De acordo com os entrevistados, o facilitador de código 01 (Utilização de métodos de reciclagem das placas e seus componentes) foi mais citado para os fabricantes e distribuidores, e para as montadoras e instaladoras. Os entrevistados citam esse facilitador como impactante para esses atores pois eles recebem e armazenam esses módulos e equipamentos até que se encontre uma solução, e nesse caso o facilitador 01 sanaria esse problema.

O facilitador de código 02 (Design robusto, visando vida útil elevada) também teve boas citações para os fabricantes e as montadoras, isso porque o design mais robusto dos equipamentos reduziria o número de equipamentos defeituosos, principalmente em garantia, reduzindo os reparos dos fabricantes e as manutenções das montadoras. Porém, os maiores beneficiados seriam os consumidores e as usinas, pois estes passariam a ter sistemas mais confiáveis e mais duráveis.

O facilitador de código 03 (Surgimento de legislação obrigando as empresas a possuírem planos de ação sustentáveis) registrou uma influência mais abrangente no setor. De acordo com os entrevistados, o impacto das empresas em realizar um plano de ação sustentável seria benéfico para toda a cadeia, desde as fabricantes até os consumidores, pois no longo prazo todos sentiriam menos os impactos ambientais. Entretanto, os órgãos públicos seriam mais beneficiados, pois no longo prazo as empresas entregariam resultados de menor impacto ambiental, o que seria benéfico para os indicadores do estado e para toda a sociedade.

Para o facilitador de código 04 (Política nacional de resíduos sólidos como facilitador de ações circulares), os órgãos públicos e a sociedade seriam mais beneficiados devido aos resultados das empresas em seguir as suas diretrizes. Ainda

assim, aqueles atores que não possuem planos de ação para o descarte dos equipamentos (Usinas, Fabricantes e Montadoras) seriam beneficiados com a diretriz, passando a ter uma política de descarte.

O facilitador de código 05 (Logística reversa como facilitador de iniciativas circulares e descarte inadequado) foi identificado pelos entrevistados como um complemento à política nacional de resíduos sólidos. As ações de logística reversa foram citadas como sendo mais benéficas para os consumidores do final da cadeia, nesse caso os consumidores de microgeração e as usinas de minigeração. O problema é que hoje não existe uma formalização para o retorno dos equipamentos.

O facilitador menos citado foi o de código 06 (Programa de avaliação do ciclo de vida como facilitador do prolongamento de vida útil), onde os entrevistados comentaram que possui uma relação maior com os órgãos públicos e as universidades. Segundo os entrevistados, as análises e considerações realizadas nos produtos poderiam auxiliar os pesquisadores universitários em encontrar novas soluções de melhorias para os produtos.

O facilitador 07 (Decreto 9.571/18 institui as empresas a adotarem medidas de sustentabilidade ambiental), assim como o facilitador 04 (Política nacional de resíduos sólidos como facilitador de ações circulares), tem maior impacto para os órgãos públicos. Esse impacto ocorreria devido aos resultados e benefícios ambientais apresentados por todos os atores, e que nesse caso seria mais benéfico para o estado com políticas de sucesso ambiental.

E por fim, o facilitador 08 (Incentivos fiscais e benefícios em projetos de reuso e reciclagem) representa um benefício para todos os atores, seja diretamente através do benefício fiscal, ou indiretamente através dos impactos dos projetos de reuso e reciclagem, principalmente para os consumidores finais. Vale ressaltar que o facilitador 08 (Incentivos fiscais e benefícios em projetos de reuso e reciclagem), assim como o facilitador 07 (Decreto 9.571/18 institui as empresas a adotarem medidas de sustentabilidade ambiental), 05 (Logística reversa como facilitador de iniciativas circulares e descarte inadequado) e 04 (Política nacional de resíduos sólidos como facilitador de ações circulares) foram citados como benéficos para empresas/startups que realizam a reciclagem de módulos e componentes de sistemas fotovoltaicos.

Dentro do mesmo contexto, a tabela 3 apresenta os resultados para as barreiras (linhas) em cada tipo de ator (coluna), buscando identificar onde, e qual

barreira mais impacta negativamente a tomada de iniciativas circulares dentro do ecossistema para cada tipo de ator.

Tabela 3: Influência das barreiras da economia circular nos tipos de atores

Barreiras	**Código**	Fabricantes Distribuidores	Montadoras Instaladoras	Consumidores (Microgeração)	Usinas (Minigeração ou superior)	Concessionário	Órgãos Públicos	Universidades	Outros	**Total**
Dificuldade em destinar os módulos e equipamentos ao final da vida útil.	1	2	3	5	4	1	2	1	1	**19**
Alto valor financeiro e energético para a realização de reciclagem das placas e componentes.	2	2	0	1	1	0	2	2	1	**9**
Design robusto que dificulta os processos de reforma, reparo e remanufatura.	3	3	2	0	1	0	0	2	2	**10**
Total		**7**	**5**	**6**	**6**	**1**	**4**	**5**	**4**	**38**

Fonte: Autor, com base nas entrevistas

Na análise das barreiras, os entrevistados citaram a barreira 01 (Dificuldade em destinar os módulos e equipamentos ao final da vida útil) como um problema que afeta, principalmente, os consumidores de microgeração e as usinas de minigeração devido à falta de uma diretriz para o retorno desses equipamentos. Além disso, as fabricantes e as montadoras também têm dificuldade em realizar essa destinação, principalmente, para os equipamentos defeituosos. Isso ocorre devido ao fato de a quantidade de placas em fim de vida útil ser pequeno atualmente, porém, com a popularização atual, tal realidade se tornará um problema maior no futuro.

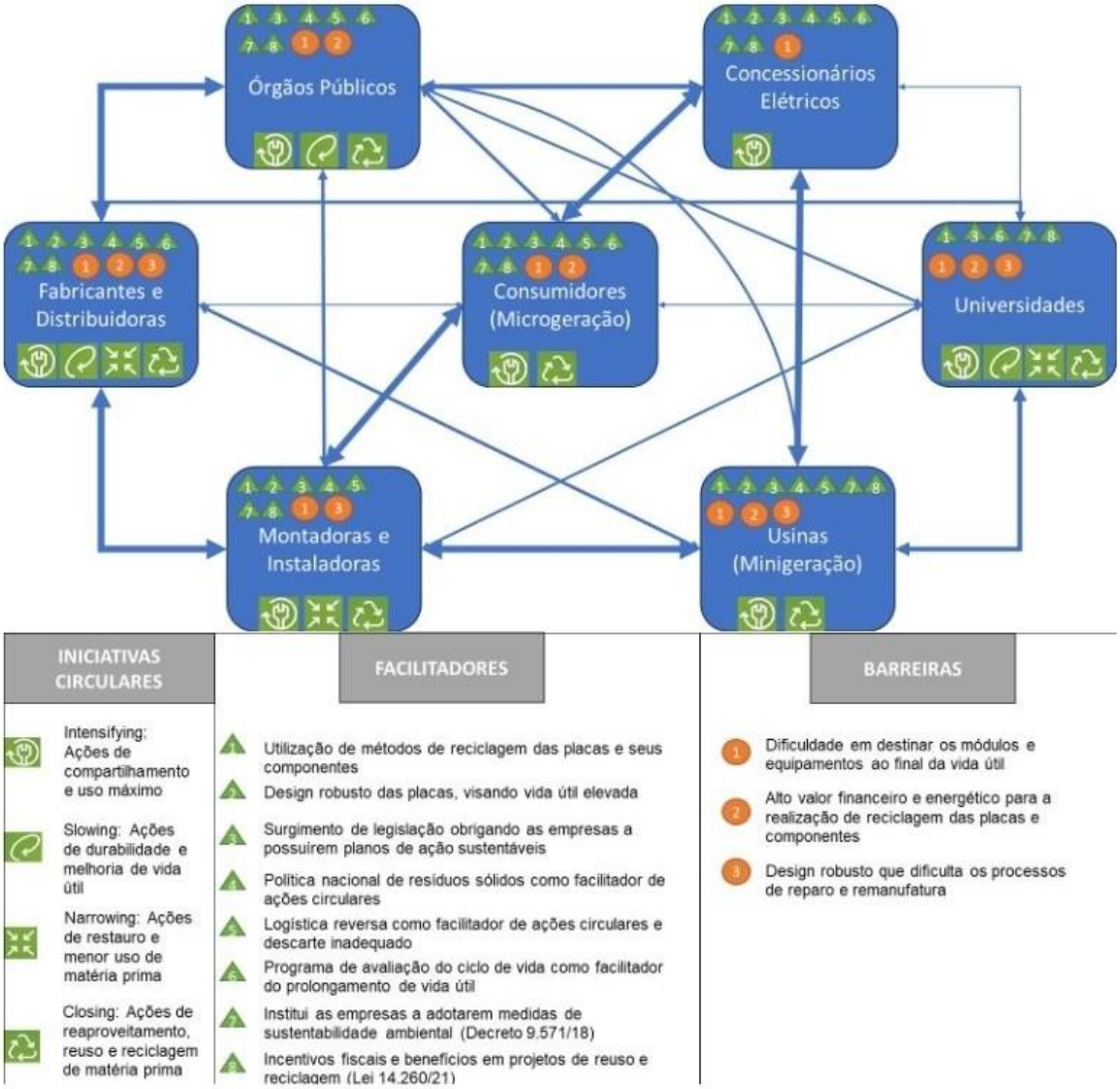
A barreira 02 (Alto valor financeiro e energético para a realização de reciclagem das placas e componentes) foi a menos citada, nela os entrevistados identificaram como um problema maior para as fabricantes, principalmente para encontrar soluções que facilitem o processo no final da vida útil. Além das fabricantes, os entrevistados citaram os órgãos públicos como afetados com a falta de solução e um problema

iminente de descarte desse material, e as universidades frente a dificuldade em desenvolver um equipamento que facilite o processo de reciclagem.

E por fim, a barreira 03 (Design robusto que dificulta os processos de reforma, reparo e remanufatura), que de acordo com os entrevistados, o design dos módulos é um problema maior para as fabricantes, já que não é possível realizar reparo nos módulos, e para as montadoras que também poderiam prestar esse serviço. Além delas, as universidades têm desafios em projetos de alteração desse design, e as empresas que realizam reciclagem acabam não conseguindo recuperar todos os componentes, ou conseguindo realizar um processo de menor custo.

Todas as informações levantadas até o instante permitiram gerar a Figura 9, na qual a estão apresentados os tipos de atores, as relações, os códigos dos tipos de iniciativas circulares envolvidos e os códigos dos facilitadores e barreiras indicando o tipo de ator que elas influenciam. Nesta figura é apresentada uma visão ecossistêmica do setor de energia solar fotovoltaica na Paraíba, compilando de forma geral as informações coletadas nas entrevistas.

Figura 9: Mapa visual do ecossistema circular



Fonte: Autor, com base nas entrevistas

5. DISCUSSÕES

A imagem gerada (Figura 9) como resultado das coletas dos dados e união dos resultados dos objetivos específicos surpreende com a quantidade de iniciativas circulares presentes no setor, sendo que as responsabilidades de cada tipo de ator variam a depender da ação circular envolvida. Além disso, as entrevistas apresentaram maior número de citações, indicando atuações maiores dos fabricantes e das universidades no ecossistema. Os principais motivos citados foram no quesito inovação, com pesquisa, projetos e desenvolvimento de novos produtos e soluções para as fabricantes com apoio das universidades em pesquisa e desenvolvimento. Isso ocorre de acordo com a hipótese de Trevisan (2022) de que o ecossistema se trata de uma estrutura colaborativa.

De forma geral, a estrutura do ecossistema (Figura 9) demonstra força nas relações a nível comercial, regulatório e técnico. No quesito regulatório, observam-se regras específicas para o projeto, geração, distribuição e taxação. Não é visível regras específicas para a economia circular, mesmo com a regência da política nacional de resíduos sólidos. Ainda que os atores pratiquem ações que auxiliem a economia circular, é visível que não há uma visão a longo prazo para essas ações.

Além disso, as ações circulares encontradas possuem atuação isolada entre os atores, ou seja, possuem um líder principal que trabalha ou desenvolve a ação isoladamente, com pouca ou nenhuma relação com outro ator (Quadro 12). Entretanto, a influência dos benefícios das ações é mais ampla, podendo impactar todo o ecossistema. A falta de uma maior integração para discussão e trabalho das iniciativas circulares está relacionada a problemática do fim de vida dos componentes ainda não ser amplamente discutida no Brasil, além da falta de legislação determinando soluções para os resíduos.

Para os facilitadores e barreiras, as entrevistas revelam que o facilitador que envolve projeto do produto (Facilitador 2 com 15 citações) é o que mais impacta o setor, isso devido aos benefícios de vida útil, reparo e reciclagem dos equipamentos. Já o tipo de ator mais impactado são os órgãos públicos, devido os impactos positivos no cumprimento das metas ambientais para o governo e a sociedade, já que de acordo com Schöggl, Stumpf e Baumgartner (2020) as iniciativas circulares contribuem para atingir alguns ODS. Já para as barreiras, o impacto maior ocorre para as fabricantes,

sendo a dificuldade em destinar os módulos em fim de vida útil (Barreira 1 com 19 citações) a principal barreira do ecossistema.

De empresas de reciclagem de módulos solares, só existe uma em operação no Brasil. Esse novo tipo de ator contribui para sanar algumas barreiras da economia circular, entretanto ainda não está integrada ao ecossistema na Paraíba. Atualmente, a falta desse tipo de ator no ecossistema dificulta e até inviabiliza algumas ações circulares, exatamente como apresentado por Trevisan (2022). Isso mostra uma diferença em relação aos países mais desenvolvidos, assim como apresentado na seção 2.2, onde já existem plantas de processamento, além de desenvolvimento de novas tecnologias de reciclagem (Bomgardner; Scott, 2018; Tan; Shuyue; Seeram, 2022).

Vale discutir que, segundo os entrevistados, as empresas buscam seguir as regras impostas pelas legislações, porém não costumam se aprofundar no que não é obrigatório. Visto isso, pode-se concluir que mudanças na legislação, estabelecimento de um plano de ação com soluções de longo prazo e incentivos para empresas que realizem processos circulares como a reciclagem podem auxiliar no fechamento dos ciclos.

Outra fraqueza seria científica, pois, as entrevistas citam que as universidades podem auxiliar no desenvolvimento de pesquisas de novas tecnologias ou processos, porém não apresentam exemplos de parcerias. Isso pode demonstrar uma falta de interesse das empresas no desenvolvimento em conjunto com as universidades, bem como da falta de produção de uma tecnologia própria em solo nacional. Um desses comparativos pode ser realizado com o trabalho de desenvolvimento de métodos mais eficazes de reciclagem desenvolvido na universidade do Arizona (Bomgardner; Scott, 2018).

Outro ponto de destaque são os facilitadores e barreiras, na análise é possível dizer que os órgãos públicos e a sociedade são os mais beneficiados pelos facilitadores (20 citações). Isso ocorre devido aos benefícios dos facilitadores na implementação de ações circulares no setor, pois a melhora dos indicadores ambientais e das políticas públicas causam grande impacto na sociedade em geral. Isso é visível nos facilitadores mais influentes, como os incentivos fiscais que auxiliam as empresas na tomada de ações e políticas de soluções para descarte adequado, e projetos de melhoria dos produtos, aumentando a vida útil e reduzindo maiores quantidades de descarte no curto prazo.

No quesito barreiras, as fabricantes são mais impactadas (7 citações) devido às características dos produtos que elas produzem, e que sem destinação final, acabam retornando a origem. Isso é confirmado pela barreira mais citada nas entrevistas, em que a dificuldade de uma solução de destinação final é a principal responsável pelo impacto.

Com base em um comparativo realizado a partir do presente trabalho com o artigo do Iyer-Raniga, Gajanayake e Ho (2022), que aborda o mapeamento do ecossistema circular no estado australiano de Victoria, pode-se perceber que o mapeamento na Paraíba se diferencia nas regulamentações governamentais, sendo que no Brasil inexiste regulamentação específica para a economia circular e seu incentivo. Nesse caso, os governos dispõem de regras e regulações bastante abrangentes e que carecem de fiscalização, e em alguns casos, apenas são seguidas diante de incentivos. Um exemplo disso, é o ACV, um programa governamental brasileiro de análise de equipamentos para a melhoria do ciclo de vida dos produtos. Em grande parte, os entrevistados afirmaram desconhecer a atuação do programa. Entretanto, seu objetivo geral em pesquisa e desenvolvimento na melhoria dos ciclos de vida dos produtos poderiam ser melhor aproveitados pelas empresas do setor, e através de parcerias com universidades e órgãos públicos para o desenvolvimento de pesquisa.

Ainda de forma comparativa com o artigo australiano, é possível observar que os incentivos financeiros são frágeis ou inexistentes em ambos os países. Não há na Paraíba incentivo específico para ações empresariais de economia circular, além da regulamentação mais próxima ser a política nacional de resíduos sólidos, que não possui parágrafos específicos para o tratamento de resíduos do setor analisado.

De forma geral, o presente trabalho atinge os objetivos de pesquisa propostos, entretanto, mesmo que a análise dos atores seja realizada para o estado da Paraíba, as contribuições podem ser ampliadas em uma visão nacional, já que os resultados são apresentados de forma geral para o tipo de ator e não específico de cada ator. Ou seja, os resultados para o setor na Paraíba (Brasil) não aparentam ter distinções do que é realizado na federação.

Além disso, o cenário brasileiro se diferencia de países mais desenvolvidos, devido à fase de expansão da energia solar fotovoltaica estar acontecendo num período temporal mais recente. Atualmente, existe uma corrida maior para o desenvolvimento de soluções para o fim de vida útil desses equipamentos nos países

mais desenvolvidos, devido ao número em massa de lixo eletrônico gerado ter se tornado um problema, o que ainda não ocorreu no Brasil.

Diante disso, é possível afirmar que este trabalho apresenta uma novidade para o setor de energia solar fotovoltaica, entregando uma visão da atual situação do setor frente a um ecossistema com viés circular. A visão e os resultados apresentados neste trabalho servem como base para facilitar a estruturação do ecossistema, não somente na Paraíba, como em todo o Brasil, seja por novas parcerias, regulamentos, tecnologias e entrada de novos atores que atuem como "*Drivers"* das iniciativas circulares no setor.

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este estudo contribui para o enriquecimento da temática do ecossistema circular, apresentando uma análise real de um ecossistema e suas iniciativas circulares envolvidas. As presentes contribuições são imprescindíveis para a continuidade de estudos futuros na área, visto que o número reduzido de pesquisas e escritos indicam que essa discussão ainda está em uma fase inicial de desenvolvimento. Além disso, as reflexões aqui realizadas abordam uma problemática real para o setor que pode levar membros do ecossistema a se reestruturarem em busca de uma solução em comum.

A temática do ecossistema circular possui trabalhos recentes e normalmente se baseiam na teoria em si. A produção de Iyer-Raniga, Gajanayake e Ho (2022) é o mais similar em termos de temática, contudo, a presente pesquisa possui um diferencial no setor analisado, pois, em termos de mapeamento de ecossistema circular no setor de energia solar fotovoltaica não foram encontrados outros escritos. Este trabalho também é relevante acerca dos itens analisados, visto que o trabalho realizado na Austrália apresenta mais componentes de análise, apresentando os *Drivers* que regem o ecossistema e realizando uma *Survey* além das entrevistas.

Além disso, o trabalho apresenta resultados que respondem à pergunta de pesquisa inicial: Quem são os principais atores de um ecossistema circular no setor de energia fotovoltaica e quais são as suas responsabilidades, bem como os facilitadores e barreiras presentes no ecossistema? As reflexões realizadas no presente escrito contribuem para um aprofundamento e melhor entendimento dessa temática, principalmente no que tange às práticas, suas relações e consequências, visando conscientizar a população e todos os setores envolvidos na adoção de novas atitudes sustentáveis no que se refere ao descarte inadequado de lixo eletrônico.

Em nível de limitações, a temática recente dificultou encontrar artigos que realizaram mapeamentos reais de ecossistemas circulares, dificultando encontrar uma linha de raciocínio para realizar a análise. Outra limitação foi a nível informacional, pelo fato de que o setor não especifica suas ações em nível de economia circular, o que requer uma análise preliminar dos autores e entrevistados.

Nesse cenário, reafirma-se a necessidade de que novos estudos e pesquisas sobre a temática observem melhor os atores envolvidos, buscando identificar novos fatores que possam ser barreiras e facilitadores para a economia circular no setor,

entrevistando mais pessoas da área e buscando identificar novas ações de cada iniciativa circular envolvida por meio do mapeamento em outros setores da sociedade. Estudos comparativos de análise cruzada entre países podem apontar similaridades e diferenças no setor, e podem fazer uma comparação de nível de atuação entre países desenvolvidos e emergentes.

Somando-se a isso, um dos pontos mais centrais seria a elaboração e exposição de uma proposta de solução para a problemática que envolva e estruture todo o ecossistema, demonstrando um resultado que agrade e auxilie o setor a investir em reestruturação dos seus negócios.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR. **Associação brasileira de energia solar**. [*S. l.*], 2022. Disponível em: https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/. .

ADNER, Ron. Ecosystem as Structure: An Actionable Construct for Strategy. **Journal of Management**, [*s. l.*], v. 43, n. 1, p. 39–58, 2017.

ADNER, Ron. The Wide Lens: A New Strategy for Innovation. **R&D Management**, [*s. l.*], v. 43, n. 1, p. 87–88, 2012. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1467-9310.2012.00697.x.

ALBINO, Vito; BERARDI, Umberto; DANGELICO, Rosa Maria. Smart cities: Definitions, dimensions, performance, and initiatives. **Journal of Urban Technology**, [*s. l.*], v. 22, n. 1, p. 3–21, 2015. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1080/10630732.2014.942092.

AMBLEGIS. **Descarte de Eletrônicos: Legislação Brasileira**. [*S. l.*], 2020. Disponível em: https://amblegis.com.br/meio-ambiente/descarte-de-eletronicos-legislacao-brasileira/. .

ANEEL. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. [*S. l.: s. n.*], 2006-. ISSN 0038092X.v. 1 Disponível em: http://journal.um-surabaya.ac.id/index.php/JKM/article/view/2203.

ANEEL. **Geração Distribuida**. [*S. l.*], 2023. Disponível em: https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiY2VmMmUwN2QtYWFiOS00ZDE3LWI3NDMtZDk0NGI4MGU2NTkxIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOjR9. .

APPLEYARD, Melissa M.; CHESBROUGH, Henry W. The Dynamics of Open Strategy: From Adoption to Reversion. **Long Range Planning**, [*s. l.*], v. 50, n. 3, p. 310–321, 2017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.lrp.2016.07.004.

ARTHUR, W Brian; DURLAUF, Steven N; LANE, David A. The Economy as an Evolving Complex System II. [*s. l.*], v. XXVII, p. 1–6, 1997.

ASGARI, Amir; ASGARI, Reza. How circular economy transforms business models in a transition towards circular ecosystem: the barriers and incentives. **Sustainable Production and Consumption**, [*s. l.*], v. 28, p. 566–579, 2021.

AYUSO, Silvia *et al.* Does stakeholder engagement promote sustainable innovation orientation?. **Industrial Management & Data Systems**, [*s. l.*], v. 111, n. 9, p. 1399–1417, 2011. Disponível em: https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/02635571111182764/full/html.

BALDASSARRE, Brian *et al.* Industrial Symbiosis: towards a design process for eco-industrial clusters by integrating Circular Economy and Industrial Ecology perspectives. **Journal of Cleaner Production**, [*s. l.*], v. 216, p. 446–460, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.091.

BARBOSA FILHO, Wilson Pereira *et al.* Expansão Da Energia Solar Fotovoltaica No Brasil:

Impactos Ambientais E Políticas Públicas. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, [*s. l.*], v. 4, n. September 2017, p. 628, 2015.

BLOOMBERGNEF. New Energy Outlook 2021 (executive summary). **BloombergNEF**, [*s. l.*], v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2013.

BOCKEN, Nancy M.P. *et al.* Product design and business model strategies for a circular economy. **Journal of Industrial and Production Engineering**, [*s. l.*], v. 33, n. 5, p. 308–320, 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124.

BOMGARDNER, Melody; SCOTT, Alex. **Recycling Renewables**. [*S. l.*], 2018. Disponível em: https://cen.acs.org/energy/renewables/Recycling-renewables/96/i15. .

CHAN, Serena. Complex Adaptive Systems. **Collective Dynamics of Nonlinear and Disordered Systems**, [*s. l.*], p. 359–369, 2001.

CHEN, Angela. **More solar panels mean more waste and there's no easy solution**. [*S. l.*], 2018. Disponível em: https://www.theverge.com/2018/10/25/18018820/solar-panel-waste-chemicals-energy-environment-recycling. .

CHIGUERU, Tiba. **Atlas Solarimetrico Do Brasil 2000**. [*S. l.*]: UFPE, 2000.

CINEPPB. **Balfar Solar instala filial em João Pessoa e com ela se torna a maior e mais moderna fábrica de painéis fotovoltaicos da América Latina**. [*S. l.*], 2021. Disponível em: https://www.cinep.pb.gov.br/portal/?p=6303. .

DE MARCHI, Valentina. Environmental innovation and R&D cooperation: Empirical evidence from Spanish manufacturing firms. **Research Policy**, [*s. l.*], v. 41, n. 3, p. 614–623, 2012. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048733311001879.

DRIESSEN, Paul H.; HILLEBRAND, Bas. Integrating Multiple Stakeholder Issues in New Product Development: An Exploration. **Journal of Product Innovation Management**, [*s. l.*], v. 30, n. 2, p. 364–379, 2013. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1540-5885.2012.01004.x.

EISENHARDT, Kathleen M. Building Theories from Case Study Research. **The Academy of Management Review**, [*s. l.*], v. 14, n. 4, p. 532, 1989. Disponível em: http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=in_rMFXR3agC&oi=fnd&pg=PA3&dq=Beyond+re+engineering&ots=IViSnfKCoY&sig=iJLx4ImlLpmeDdqx5FqhGTONdzw%0Apapers3://publication/uuid/FBAD3EAE-8DDB-4DEF-A0EE-50D39461F477%0Ahttp://search.ebscohost.com/login.aspx?direct.

EL-KHAWAD, Livia; BARTKOWIAK, Dorota; KÜMMERER, Klaus. Improving the end-of-life management of solar panels in Germany. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [*s. l.*], v. 168, n. December 2021, p. 112678, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112678.

EMAF. Towards the circular economy. Journal of Industrial Ecology. **Ellen MacArthur Foundation**, [*s. l.*], p. 23–44, 2013. Disponível em:

https://www.aquafil.com/assets/uploads/ellen-macarthur-foundation.pdf.
FANTINATO, Marcelo. **Métodos de Pesquisa**. [*S. l.*]: USP, 2015.
FARRELL, C. C. *et al.* Technical challenges and opportunities in realising a circular economy for waste photovoltaic modules. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [*s. l.*], v. 128, n. February, 2020.
FEDERAL, Governo. **LEI Nº 14.261, DE 16 DE DEZEMBRO DE 2021**. [*S. l.*], 2021. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/L14261.htm. .
GABRIEL, Magdalena; PERL-VORBACH, Elke; POSCH, Alfred. The fuzzy front end of sustainable innovation - findings based on a case study on the paper and pulp industry. **Sustainable Innovation 2014**, [*s. l.*], p. 1–11, 2014.
GOODMAN, Jennifer; KORSUNOVA, Angelina; HALME, Minna. Our Collaborative Future: Activities and Roles of Stakeholders in Sustainability-Oriented Innovation. **Business Strategy and the Environment**, [*s. l.*], v. 26, n. 6, p. 731–753, 2017.
HOMRICH, Aline Sacchi *et al.* The circular economy umbrella: Trends and gaps on integrating pathways. **Journal of Cleaner Production**, [*s. l.*], v. 175, p. 525–543, 2018.
HUANG, Wen Hsi *et al.* **Strategy and technology to recycle wafer-silicon solar modules**. [*S. l.: s. n.*], 2017.
IYER-RANIGA, Usha; GAJANAYAKE, Akvan; HO, Olivia. Mapping the Circular Economy Ecosystem of Victoria. [*s. l.*], n. April, 2022.
JACOBIDES, Michael G.; CENNAMO, Carmelo; GAWER, Annabelle. Towards a theory of ecosystems. **Strategic Management Journal**, [*s. l.*], v. 39, n. 8, p. 2255–2276, 2018.
KANDA, Wisdom; GEISSDOERFER, Martin; HJELM, Olof. From circular business models to circular business ecosystems. **Business Strategy and the Environment**, [*s. l.*], v. 30, n. 6, p. 2814–2829, 2021.
KAPOOR, Rahul; FURR, Nathan R. Complementarities and competition: Unpacking the drivers of entrants' technology choices in the solar photovoltaic industry. **Strategic Management Journal**, [*s. l.*], v. 36, n. 3, p. 416–436, 2015. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/smj.2223.
KIRCHHERR, Julian; REIKE, Denise; HEKKERT, Marko. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, [*s. l.*], v. 127, n. September, p. 221–232, 2017.
KÖHLER, Jonathan *et al.* An agenda for sustainability transitions research: State of the art and future directions. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, [*s. l.*], v. 31, n. December 2018, p. 1–32, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.eist.2019.01.004.
KONIETZKO, Jan; BOCKEN, Nancy; HULTINK, Erik Jan. Circular ecosystem innovation: An initial set of principles. **Journal of Cleaner Production**, [*s. l.*], v. 253, 2020.
LAMBERT, Serge; RIOPEL, Diane; ABDUL-KADER, Walid. A reverse logistics decisions

conceptual framework. **Computers and Industrial Engineering**, [*s. l.*], v. 61, n. 3, p. 561–581, 2011. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2011.04.012.

LEE, Ki-Hoon; KIM, Ji-Whan. Integrating Suppliers into Green Product Innovation Development: an Empirical Case Study in the Semiconductor Industry. **Business Strategy and the Environment**, [*s. l.*], v. 20, n. 8, p. 527–538, 2011. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bse.714.

LEVIN, Simon A. Ecosystems and the biosphere as complex adaptive systems. **Ecosystems**, [*s. l.*], v. 1, n. 5, p. 431–436, 1998.

MAY, Geoffrey J.; DAVIDSON, Alistair; MONAHOV, Boris. Lead batteries for utility energy storage: A review. **Journal of Energy Storage**, [*s. l.*], v. 15, p. 145–157, 2018. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2017.11.008.

MOORE, James. **The death of competition: Leadership and strategy in the age of business ecosystems.** [*S. l.*]: Wiley, New York (N.Y.), 1996.

MORENO, Mariale *et al.* A conceptual framework for circular design. **Sustainability (Switzerland)**, [*s. l.*], v. 8, n. 9, 2016.

PBACV. **Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida**. [*S. l.*], 2012. Disponível em: https://acv.ibict.br/pbacv/. .

PIERONI, Marina P.P.; MCALOONE, Tim C.; PIGOSSO, Daniela C.A. Business model innovation for circular economy and sustainability: A review of approaches. **Journal of Cleaner Production**, [*s. l.*], v. 215, p. 198–216, 2019.

REN21. **Renewable 2020 Global Status Report**. [*S. l.: s. n.*], 2020. Disponível em: https://abdn.pure.elsevier.com/en/en/researchoutput/ren21(5d1212f6-d863-45f7-8979-5f68a61e380e).html. .

ROBERTO, Paulo; FRANCISCO, Megna. Insolação Do Estado Da Paraíba Mapeada Através Do Uso De Geotecnologias. [*s. l.*], n. January, p. 6, 2016.

SANTA-MARIA, Tomas; VERMEULEN, Walter J.V.; BAUMGARTNER, Rupert J. The Circular Sprint: Circular business model innovation through design thinking. **Journal of Cleaner Production**, [*s. l.*], v. 362, n. December 2021, p. 132323, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132323.

SANTOS, Antonio Augusto Martins *et al.* GESTÃO ENERGÉTICA RENOVÁVEL NA PARAÍBA: Apontamentos da literatura científica sobre a energia eólica e solar. *In*: , 2021. **Anais [...]**. [*S. l.*]: ENGEMA XXIII, 2021.

SCHÖGGL, Josef Peter; STUMPF, Lukas; BAUMGARTNER, Rupert J. The narrative of sustainability and circular economy - A longitudinal review of two decades of research. **Resources, Conservation and Recycling**, [*s. l.*], v. 163, n. December, p. 105073, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105073.

SEIA. **Recycling & End-of-Life Considerations for Photovoltaics**. [*S. l.*], 2022. Disponível

em: https://www.seia.org/initiatives/recycling-end-life-considerations-photovoltaics. .
SLOTEGRAAF, Rebecca J. Keep the Door Open: Innovating Toward a More Sustainable Future. **Journal of Product Innovation Management**, [*s. l.*], v. 29, n. 3, p. 349–351, 2012. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1540-5885.2012.00905.x.
TALMAR, Madis *et al.* Mapping, analyzing and designing innovation ecosystems: The Ecosystem Pie Model. **Long Range Planning**, [*s. l.*], v. 53, n. 4, 2020.
TAN, Jovan; SHUYUE, Jia; SEERAM, Ramakrishna. End-of-Life Photovoltaic Modules. **MDPI**, [*s. l.*], 2022.
TREVISAN, Adriana Hofmann *et al.* **Unlocking the circular ecosystem concept: Evolution, current research, and future directions**. [*S. l.*]: Elsevier B.V., 2022.
VEOLIA. **The first recycling plant in Europe for solar panels!**. [*S. l.*], 2018. Disponível em: https://www.up-to-us.veolia.com/en/recycling/europe-recycling-factory-solar-panels. .
VISSER, Wayne *et al.* Business model innovation for circular economy and sustainability: A review of approaches. **Journal of Cleaner Production**, [*s. l.*], v. 17, n. 6, p. 60–75, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.129.
XU, Yan *et al.* Global status of recycling waste solar panels: A review. **Waste Management**, [*s. l.*], v. 75, p. 450–458, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.036.