

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBEITNAL
ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Laura Zambotto Olbrich

**Modelo de Negócio para Atender à Demanda de Pequenos Geradores de Resíduos de
Módulos Fotovoltaicos para Reciclagem**

Florianópolis

2023

Laura Zambotto Olbrich

**Modelo de Negócio para Atender à Demanda de Pequenos Geradores de Resíduos de
Módulos Fotovoltaicos para Reciclagem**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico e da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.
Orientador: Prof. Sebastião Roberto Soares Dr.
Coorientador: Laís Cassanta Vidotto

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra

Olbrich, Laura Zambotto

Modelo de Negócio para Atender à Demanda de Pequenos Geradores de Resíduos de Módulos Fotovoltaicos para Reciclagem / Laura Zambotto Olbrich ; orientador, Sebastião Roberto Soares, coorientador, Laís Cassanta Vidotto, 2023.

64 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Módulo Fotovoltaico. 3. Modelo de Negócio. 4. Economia Circular. I. Soares, Sebastião Roberto. II. Vidotto, Laís Cassanta. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. IV. Título.

Laura Zambotto Olbrich

Modelo de Negócio para Atender à Demanda de Pequenos Geradores de Resíduos de Módulos Fotovoltaicos para Reciclagem

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheira Sanitarista e Ambiental e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Florianópolis, 14 de dezembro de 2023

Prof. Bruno Segalla Pizzolatti, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Sebastião Roberto Soares, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Rodrigo de Almeida Mohedano, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof^a Mônica Maria Mendes Luna, Dr^a.
Avaliadora
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado a todos os indivíduos que anseiam por uma vida mais sustentável.

AGRADECIMENTOS

Concluir este trabalho encerra uma etapa muito importante da minha jornada acadêmica e profissional. Agradeço primeiramente aos meus pais, Carla e Sérgio Victor Olbrich, por todo apoio incondicional em cada etapa da minha vida, e por tornarem o meu sonho de ingressar em uma universidade federal uma realidade.

Ao meu parceiro, Erik Lind, que me motiva a ser uma pessoa melhor todos os dias. Obrigada por me acompanhar em todas as minhas aventuras e por sempre acreditar em mim.

Aos amigos que fiz durante a graduação, vivemos momentos incríveis que foram essenciais para a minha formação. Em especial, a Bruna Barcelos, que esteve comigo desde o dia 1 da caminhada, obrigada por toda troca, apoio e companhia.

Agradeço o Projeto Baleia Jubarte, por me proporcionar a melhor experiência de estágio durante a graduação, por me mostrar como a educação ambiental é valiosa, por me dar a oportunidade de atuar na conservação das majestosas baleias jubartes e de conhecer vários projetos na área ambiental. Agradeço a oportunidade de trabalhar com pessoas incríveis, especialmente as minhas colegas estagiárias, que enriqueceram a minha experiência.

Um muitíssimo obrigada a minha coorientadora Laís Vidotto, por toda a paciência e disponibilidade durante o processo de elaboração deste trabalho. Sou muito grata pela oportunidade de escrever um trabalho com o seu auxílio e orientação.

Agradeço a minha irmã, Isadora Z. Olbrich, que sempre foi um grande exemplo para mim. Obrigada por ser minha parceira e por se fazer presente independente da distância.

Ao meu orientador, professor Sebastião Roberto Soares, pela orientação ao longo destes últimos meses. Obrigada pela confiança e pela oportunidade.

À equipe da SunR, por serem solícitos e disponíveis. A participação de vocês foi fundamental para a execução deste trabalho. Obrigada pela oportunidade.

Por fim, agradeço a Universidade Federal de Santa Catarina, e seu corpo docente, em especial ao departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, por todo conhecimento, ensinamentos, aprendizados e trocas. Sou eternamente grata de ter escolhido este curso nesta universidade.

RESUMO

A rápida ascensão da energia solar no Brasil experimentada nos últimos cinco anos deve se manter em ritmo acelerado nos próximos anos. Tendo em vista essa expansão, o número de módulos solares que vão atingir o estágio de fim de vida aumentará constantemente. Em resposta a essa realidade, empresas de reciclagem surgem para atender essa demanda emergente. Um grande desafio de transporte identificado no setor de reciclagem fotovoltaica no Brasil é a disparidade significativa entre clientes com volumes de descarte menores e aqueles com volumes maiores. Isso se deve ao custo do frete, que é coberto pelos clientes, e, portanto, o custo por material descartado acaba sendo mais elevado para quantidades menores, levando em conta o cálculo de frete convencional. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo de negócio capaz de atender às pequenas demandas de coleta de módulos fotovoltaicos para a reciclagem, dentro do contexto da principal empresa de reciclagem de módulos fotovoltaicos do país. Para isso foram segmentados os municípios brasileiros por meio de levantamento e normalização de dados, utilizando a metodologia de matriz de decisão. Essa análise levou à identificação do município mais vantajoso para uma implementação teste do modelo de negócio proposto. Para desenvolver a estratégia foi utilizado a premissa dos quatro elementos da economia circular, juntamente com a elaboração de um mapa mental e pela ferramenta Business Model Canvas para estruturar a abordagem. Florianópolis emergiu como o município mais favorável para a aplicação do modelo de negócio proposto. A estratégia desenvolvida envolve o estabelecimento de um Ponto de Entrega de Módulo Solar, inicialmente em Florianópolis-SC, estendendo-se futuramente aos municípios brasileiros com alta concentração de geração distribuída de energia solar. Isso permitirá que os integradores possam facilmente encaminhar seus módulos solares sem a necessidade de percorrer longas distâncias para descarte apropriado. Neste contexto, a colaboração de instituições como a Secretaria do Meio Ambiente são fundamentais para identificar e disponibilizar um local no município para o recebimento temporário e armazenamento dos módulos, visando à posterior coleta pela empresa de reciclagem, transportadora parceira ou cooperativa. Nessa perspectiva, este trabalho descreve todas as etapas envolvidas do modelo de negócio proposto. Embora o estudo apresente uma estratégia abrangente, há limitações como a falta de dados específicos fornecidos pela empresa sobre custos médios de transporte dos módulos e lucratividade por material reciclado vendido. Por fim, este trabalho contribui para o setor de reciclagem de módulos fotovoltaicos e tem um potencial de impacto positivo para a prática de negócios mais sustentáveis, criando um impacto positivo.

Palavras-chave: Módulo Fotovoltaico. Modelo de Negócio. Economia Circular.

ABSTRACT

The rapid surge of solar energy in Brazil experienced over the past five years is expected to maintain a brisk pace in the upcoming years. Considering this expansion, the number of solar modules reaching the end-of-life stage will consistently rise. In response to this reality, recycling companies have emerged to meet this growing demand. A significant challenge identified in the photovoltaic recycling sector in Brazil is the substantial disparity between clients with smaller disposal volumes and those with larger volumes. recycling logistics in Brazil is the notable disparity between customers with smaller demands and those with larger demands. This is attributed to the freight cost covered by customers, resulting in higher per-material disposal costs for smaller quantities, considering conventional freight calculations. This study aims to develop a business model capable of addressing the small demands for photovoltaic module collection for recycling within the context of the country's main photovoltaic module recycling company. Brazilian municipalities were segmented through data collection and normalization using the decision matrix methodology for this purpose. This analysis led to the identification of the most advantageous municipality for a trial implementation of the proposed business model. The strategy development incorporated the premise of the four elements of the circular economy, complemented by the creation of a mind map and the utilization of the Business Model Canvas tool to structure the approach. Florianópolis emerged as the most favorable municipality for the application of the proposed business model. The devised strategy involves establishing a Solar Module Drop-Off Point, initially in Florianópolis-SC, and subsequently expanding to Brazilian municipalities with a high concentration of distributed solar energy generation. This will enable integrators to easily direct their solar modules without the need for extensive travel for proper disposal. In this context, collaboration from institutions such as the Department of Environment is pivotal to identify and provide a location within the municipality for the temporary receipt and storage of modules, with subsequent collection facilitated by the recycling company, partnering transporter, or cooperative. From this perspective, this study delineates all stages involved in the proposed business model. Although the study presents a comprehensive strategy, limitations include the absence of specific data provided by the company regarding average module transportation costs and profitability per recycled material sold. Finally, this study contributes to the photovoltaic module recycling sector and holds the potential for a positive impact on more sustainable business practices, thereby creating a positive influence.

Keywords: Photovoltaic Module. Business Model. Circular Economy.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- PRINCIPAIS NAÇÕES EM INSTALAÇÕES E CAPACIDADE SOLAR EM 2022.....	17
FIGURA 2 - EVOLUÇÃO DA INSTALAÇÃO ANUAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	18
FIGURA 3- TENDÊNCIA GLOBAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR.....	19
FIGURA 4- EVOLUÇÃO DO SETOR FOTOVOLTAICO NO BRASIL.....	23
FIGURA 5- CAPACIDADE INSTALADA DA FONTE SOLAR NO BRASIL.....	24
FIGURA 6- CONTÊINER DE PV - MRC (PHOTOVOLTAIC MOBILE RECYCLING CONTAINER).....	28
FIGURA 7- ACIDENTE DE TRANSPORTE COM MÓDULO SOLAR.....	30
FIGURA 8- VISÃO GERAL DO DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE NEGÓCIOS.....	37
FIGURA 9- FLUXOGRAMA METODOLÓGICO.....	38
FIGURA 10- RANKING MUNICÍPIOS COM MAIOR POTÊNCIA INSTALADA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	39
FIGURA 11- RANKING ESTADUAL COM MAIOR POTÊNCIA INSTALADA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	40
FIGURA 12 - ALTERNATIVA 1 – POTÊNCIA: 0,4; DISTÂNCIA: 0,3 E ODS: 0,3.....	41
FIGURA 13 – ALTERNATIVA 2 – POTÊNCIA: 0,3; DISTÂNCIA: 0,4 E ODS: 0,3.....	42
FIGURA 14- ALTERNATIVA 3 – POTÊNCIA: 0,3; DISTÂNCIA: 0,3 E ODS: 0,4.....	43
FIGURA 15- SEÇÃO DO MAPA MENTAL ELABORADO.....	44
FIGURA 16- DISPOSIÇÃO DOS COMPONENTES DO MÓDULO FV DE SILÍCIO CRISTALINO.....	45
FIGURA 17- FLUXO DE OPERAÇÃO DO PEMS.....	46
FIGURA 18- BUSINESS MODEL CANVAS – PONTO DE ENTREGA DE MÓDULO SOLAR (PEMS).....	47

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1 - FÓRMULA DO ÍNDICE DE POTÊNCIA.....	33
EQUAÇÃO 2- FÓRMULA DO ÍNDICE DE DISTÂNCIA.....	33
EQUAÇÃO 3 - FÓRMULA DO ÍNDICE DO ODS.....	34

LISTA DE TABELAS

TABELA 1- MUNICÍPIOS BRASILEIROS MAPEADOS

40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

BSI - British standards institution

FV - Fotovoltaico

IEA - Agência Internacional de Energia

IRENA – Agência Internacional para as Energias Renováveis

MME - Ministério de Minas e Energia

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

PEMS – Ponto de Entrega de Módulo Solar

SC – Santa Catarina

SP – São Paulo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVO GERAL.....	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM ESCALA GLOBAL.....	17
2.1.1	Políticas e Incentivos Globais.....	20
2.1.2	Desafios enfrentados em escala global.....	21
2.1.3	Benefícios socioeconômicos e ambientais associados à expansão da energia solar.....	22
2.2	PANORAMA – SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NO BRASIL.....	23
2.2.1	Crescimento da energia fotovoltaica no Brasil.....	23
2.2.2	Políticas e incentivos brasileiros.....	25
2.2.3	Desafios e oportunidades para o setor fotovoltaico no Brasil.....	26
2.3	EMPRESA DE RECICLAGEM.....	28
2.3.1	Descarte de módulos fotovoltaicos.....	29
2.3.2	Implementação da economia circular em modelos de negócios.....	31
3	IMPACTO AMBIENTAL PROVENIENTE DOS DESCARTES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	32
4	METODOLOGIA.....	33
4.1	SEGMENTAÇÃO DOS MUNICÍPIOS.....	34
4.2	DESENVOLVIMENTO DA ESTRATÉGIA.....	36
4.3	CONSTRUÇÃO DO MODELO DE NEGÓCIO.....	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
5.1	IDENTIFICAÇÃO DOS MUNICÍPIOS.....	38
5.1.1	Ranking dos municípios.....	38
5.1.2	Definição das alternativas.....	41

5.2	PONTO DE ENTREGA DE MÓDULO SOLAR (PEMS).....	43
5.3	MODELO DE NEGÓCIO.....	47
5.3.1	Parcerias-chave.....	47
5.3.2	Atividades-chave.....	48
5.3.3	Recursos.....	49
5.3.4	Proposta de Valor.....	50
5.3.5	Relacionamento.....	51
5.3.6	Canais.....	52
5.3.7	Clientes.....	52
5.3.8	Estrutura de Custos.....	53
5.3.9	Fontes de Receita.....	53
5.4	RISCOS ASSOCIADOS AO MODELO DE NEGÓCIO.....	54
5.5	IMPLICAÇÕES E LIMITAÇÕES DO ESTUDO.....	54
6	CONCLUSÃO.....	55
	REFERÊNCIAS.....	57
	APÊNDICE A – Fluxograma de desenvolvimento do Ponto de Entrega de Módulo Solar.....	63

1 INTRODUÇÃO

A matriz elétrica brasileira é bastante diversificada, fato que é atribuído à ampla disponibilidade de recursos existentes no país. Ela é predominantemente renovável, principalmente quando comparada à matriz elétrica mundial (IEA, 2023). De acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (2023), o sistema de produção e transmissão de energia elétrica no Brasil é um sistema de grande escala que combina fontes hidráulicas, térmicas e eólicas (hidro-termo-eólico), sendo as usinas hidrelétricas predominantes.

Entretanto, condições severas de secas no Brasil, principalmente as de 2021, restringiram a geração hidrelétrica no país. Além disso, apesar de a produção de energia por meio de hidrelétricas ser considerada uma forma de energia limpa, ela gera altos impactos ambientais, tal como a perturbação ecológica dos rios, perda da biodiversidade nos meios aquáticos, deslocamento da população que habita próximo ao rio, alterando os seus meios de subsistência, entre outros (MORAN et al., 2018).

Dessa forma, o Brasil tem expandido os horizontes para outros tipos de energia renovável, como a eólica e a solar (ANEEL, 2023). A Agência enfatiza que, até 2017, as usinas solares fotovoltaicas não faziam parte da matriz elétrica do Brasil. A rápida ascensão experimentada nos últimos cinco anos desse modelo de energia, deve se manter em ritmo acelerado nos próximos anos. (MME, 2023).

Tendo em vista a expansão da energia solar no Brasil, o número de módulos solares que vão atingir o estágio de fim de vida aumentará constantemente e exponencialmente. Esses módulos fotovoltaicos, quando descartados de forma inadequada, podem representar um sério risco ambiental, tornando-se resíduos perigosos (CHOWDHURY et al., 2020). Segundo a revista PV Magazine (2023), a companhia SunR, especializada na logística reversa e destinação de equipamentos fotovoltaicos, recebeu este ano pelo menos 200 toneladas de módulos para reciclagem, e em seus 3 anos de atuação recebeu 720 toneladas. Portanto, é crucial garantir a recuperação e o descarte apropriado desses módulos, a fim de evitar danos ao meio ambiente.

Essas práticas de reciclagem e descarte dos módulos fotovoltaicos estão diretamente associadas aos princípios da economia circular. A definição deste conceito, de acordo com Figgie, Thorpe e Gutberlet (2023), diz que: A economia circular é um sistema de múltiplos usos de recursos que estipula o fechamento completo de todos os ciclos de insumos. Práticas

como reciclagem e outras estratégias que otimizam a escala e a direção dos fluxos de recursos, contribuem para a economia circular. Em sua forma conceitual perfeita, todos os ciclos de recursos serão fechados. Em sua forma realista imperfeita, algum uso de recurso virgem é inevitável.

Uma transição global para uma economia circular oferece oportunidades para todas as empresas desenvolverem novos negócios, expandirem em novos mercados e alcançarem um crescimento sustentável (SITRA, 2023). Tendo isso em vista, realizou-se um estudo de caso com a empresa de reciclagem SunR, especializada na gestão integrada de resíduos provenientes de sistemas fotovoltaicos. A empresa identificou uma preocupante disparidade entre clientes com demandas por serviços de coleta e destinação de resíduos fotovoltaicos menores e aqueles com demandas maiores. Isso ocorre devido ao custo do frete que é arcado pelos clientes. Conseqüentemente, o custo por material descartado torna-se significativamente maior ao considerar o cálculo do frete convencional.

Diante dessa realidade, a empresa de reciclagem está em busca de encontrar soluções eficazes para atender às demandas menores. Neste contexto, visto que esta questão de transporte é um grande desafio para o setor, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um modelo de negócio que seja capaz de atender às estas demandas de reciclagem de pequenas empresas do setor, proporcionando soluções inovadoras e sustentáveis que beneficiam as empresas de reciclagem e os pequenos integradores fotovoltaicos, contribuindo para a melhoria do cenário de gestão de resíduos de sistemas fotovoltaicos no Brasil.

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um Modelo de Negócio capaz de atender às pequenas demandas de coleta e destinação de resíduos fotovoltaicos.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Mapear os municípios brasileiros com maior capacidade instalada de geração distribuída;
- Desenvolver estratégia para solucionar a problemática de destinação adequada de resíduos fotovoltaicos dos clientes com demandas menores;
- Estruturar um modelo de negócio para a estratégia escolhida;

- Buscar validação do modelo de negócio no município mais favorável para aplicação da estratégia conforme o mapeamento realizado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM ESCALA GLOBAL

De acordo com o Relatório Snapshot of Global PV Markets, da Agência Internacional de Energia (2023), em 2022 a capacidade instalada acumulada global ultrapassou os 1 TW, atingindo um valor estimado de 1185 GW, mostrando um aumento de aproximadamente 26% comparado ao ano de 2021. As dez nações que se destacaram como líderes na implantação e capacidade total instalada de sistemas fotovoltaicos se encontram na figura abaixo.

Figura 1- Principais Nações em Instalações e Capacidade Solar em 2022

FOR ANNUAL INSTALLED CAPACITY				FOR CUMULATIVE CAPACITY			
1		China	106 GW	1		China	414,5 GW
(2)		European Union	38,7 GW	(2)		European Union	209,3 GW
2		USA	18,6 GW	2		USA	141,6 GW
3		India	18,1 GW	3		Japan	84,9 GW
4		Brazil	9,9 GW	4		India	79,1 GW
5		Spain	8,1 GW	5		Germany	67,2 GW
6		Germany	7,5 GW	6		Australia	30 GW
7		Japan	6,5 GW	7		Spain	26,6 GW
8		Poland	4,9 GW	8		Italy	25 GW
9		Australia	3,9 GW	9		Korea	24,8 GW
10		Netherlands	3,9 GW	10		Brazil	23,6 GW

Fonte: IEA PVPS (2023)

A capacidade instalada anual (Annual Installed Capacity) diz respeito à quantidade de capacidade de geração de energia que foi instalada em 2022. Essa medida é usada para acompanhar o crescimento e a expansão da energia solar em uma região, país ou globalmente. A capacidade acumulada (Cumulative Capacity), refere-se à quantidade que pode ser produzida por todos os sistemas solares fotovoltaicos, representando a capacidade máxima teórica de geração de energia a partir da luz do sol com base nos sistemas instalados.

Conforme o relatório, várias tendências globais têm moldado o setor. O mercado chinês continua a dominar tanto em capacidade nova como acumulada, a Europa demonstra

um crescimento contínuo e robusto, liderada por Espanha (8,1 GW), Alemanha (7,5 GW), Polônia (4,9 GW) e Países Baixos (3,9 GW). O mercado americano diminuiu em termos de capacidade instalada para 18,6 GW devido a fatores comerciais e atrasos na conexão à rede. O Brasil instalou um total de 9,9 GW, quase dobrando a capacidade nova em relação ao ano anterior. A Índia demonstrou um forte crescimento com 18,1 GW, principalmente em sistemas centralizados. A Austrália também contribuiu com um bom volume de capacidade instalada (3,9 GW). A Coreia adicionou capacidade ao mercado regional de energia solar. Esses dois últimos países tiveram um impacto significativo no aumento da capacidade de energia solar na região. O Japão permaneceu igual, com os mesmos valores de 2021.

Atualmente, nove países possuem taxas de adoção acima de 10%, com Espanha, Grécia e Chile que ultrapassam os 17%. Embora a congestão na rede tenha surgido como um desafio, iniciativas políticas, abordagens técnicas e sistemas de armazenamento estão sendo eficazes na melhoria da integração da energia solar fotovoltaica (IEA PVPS, 2023).

Em 2021, mesmo em meio à pandemia, dados preliminares de mercado já indicavam que o mercado global de energia solar fotovoltaica havia crescido significativamente. Conforme a Agência Internacional de Energia (2022), a capacidade instalada acumulada no final de 2021 atingiu pelo menos os 942 GW. A energia fotovoltaica está desempenhando um papel importante na transição energética, e em 2022 representou dois terços de todas as energias renováveis instaladas como mostra o gráfico representado na figura abaixo.

Figura 2 - Evolução da Instalação anual de Energias Renováveis

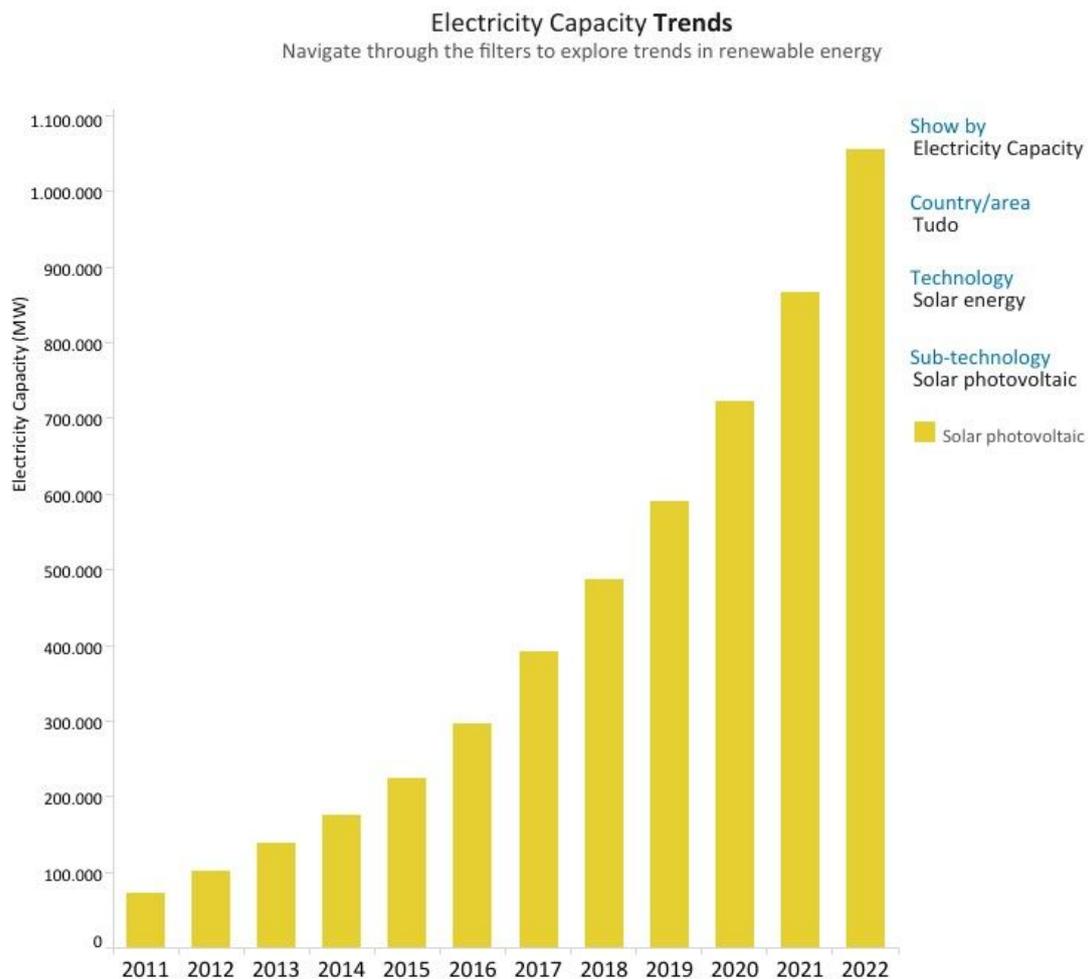


Fonte: IEA PVPS (2022)

Isso ocorre devido à estabilidade de custos, desempenho técnico e acessibilidade, bem como a tramitação muitas vezes mais ágil para autorizações em comparação com as energias eólica e hidrelétrica (IEA PVPS, 2023). Além disso, à medida que os volumes instalados crescem, a competência da força de trabalho e a confiança dos investidores se fortalecem, permitindo que a energia solar seja adotada como um investimento em uma tecnologia consolidada e segura.

Segundo a Agência Internacional de Energias Renováveis (2023), a geração global de energia solar tem apresentado um aumento significativo com o passar dos anos. A figura 3 ilustra as tendências de geração de energia solar, o gráfico demonstra um aumento exponencial.

Figura 3- Tendência Global de Geração de Energia Solar



Fonte: IRENA, 2023

2.1.1 Políticas e Incentivos Globais

A combinação de metas de ação climática, competitividade de mercado e soberania energética tem resultado em mudanças no apoio político à energia fotovoltaica em alguns países em 2022, em direções muitas vezes contraditórias. Países como China e Austrália estão reduzindo mecanismos de apoio para os usuários finais à medida que a energia fotovoltaica se torna competitiva, enquanto outros, como Alemanha e Áustria, estão aumentando o suporte para impulsionar o crescimento da capacidade (IEA PVPS, 2023). Ademais, vários países estão usando mecanismos indiretos de apoio para acelerar a implantação da energia solar, simplificando o licenciamento, o acesso à rede, e o acesso a mercados de eletricidade. Embora a competitividade da energia solar fotovoltaica seja evidente, os mercados nacionais ainda são sensíveis a políticas, especialmente em aplicações emergentes, como agrivoltaicos, energia solar flutuante e autoconsumo coletivo (IEA PVPS, 2023). Os dois principais temas que mobilizaram os formuladores de políticas são as políticas de acesso à rede, que emergem como um fator limitante em alguns países, e o apoio à fabricação local, que é impulsionado por metas de energia solar, cadeias de suprimento interrompidas e concentração de capacidade de fabricação na China (IEA PVPS, 2023).

A Índia promove o desenvolvimento da energia solar e a fabricação local por meio da Missão Solar Nacional Jawaharlal Nehru (Jawaharlal Nehru National Solar Mission - JNNSM), uma das oito Missões sob o Plano Nacional de Ação sobre Mudanças Climáticas, lançado pelo Governo da Índia em janeiro de 2010 (KHANNA et al., [s.d]). O objetivo das missões era estabelecer o país como líder global em energia solar, impulsionando a expansão da capacidade e inovação tecnológica para reduzir custos e atingir paridade com a energia elétrica até 2022. A missão foi desenvolvida em fases, e visa também alcançar paridade com a energia térmica baseada em carvão até 2030, adicionando 1000 MW de geração de energia solar conectada à rede até 2013 (fase 1), mais 3000 MW até 2017 (fase 2), totalizando 4000 MW, e 20.000 MW até 2022 (fase 3). Isso foi viabilizado pelo uso compulsório da Obrigação

de Compra de Energia Renovável (Renewable Purchase Obligation - RPO) pelas empresas de serviços públicos, com tarifa preferencial (INDIA, 2023).

Outro país que promove o desenvolvimento da energia solar é a Alemanha, por meio Germany's Renewable Energy Sources Act, conhecida como EEG, lei das energias renováveis. Essa legislação estabelece um sistema de tarifas de alimentação (feed-in tariffs) que garante um preço fixo para a eletricidade gerada a partir de fontes renováveis, como a energia solar, quando injetada na rede elétrica. Essas tarifas são fixadas por um período específico e oferecem estabilidade de receita para os produtores de energia solar (MIRANDA, 2013). Alguns incentivos fornecidos pelo EEG incluem acesso prioritário à rede elétrica, o que significa que a eletricidade gerada por fontes renováveis é priorizada na distribuição e transmissão, contribuindo para a integração dessas fontes. Também oferecem períodos de contrato garantidos, o que proporciona previsibilidade financeira. Todos os tipos de Energias Renováveis são considerados e as tarifas são diferenciadas por fonte e tamanho de usina, bem como pelo ano em que a instalação foi colocada em operação (WFCADMIN, 2015).

Outros incentivos políticos podem ser observados também nos Estados Unidos, como por exemplo, o Crédito Fiscal Federal (Federal Investment Tax Credit - ITC) para energias renováveis, como a solar. O Crédito Federal de Energia Solar Residencial é um crédito tributário que pode ser reivindicado nos impostos federais de renda por uma porcentagem do custo de um sistema solar fotovoltaico pago pelo contribuinte, e a instalação do sistema deve ser concluída durante o ano fiscal (EERE, 2023). Existem dois créditos fiscais disponíveis para empresas e outras entidades, como organizações sem fins lucrativos e governos locais, o ITC, que funciona no mesmo formato para indivíduos, e o Crédito Tributário de Produção (Production tax credit - PTC), que é um crédito fiscal por quilowatt-hora (kWh) de eletricidade gerada por tecnologias solares e outras tecnologias qualificadas nos primeiros 10 anos de operação do sistema. Este crédito reduz a quantidade de impostos que a empresa ou entidade deve ao governo federal. Além disso, o valor desse crédito é ajustado anualmente pela inflação (EERE, 2023a).

2.1.2 Desafios enfrentados em escala global

De acordo com o relatório Renewables 2022, publicado pela Agência Internacional de Energia (IEA), a maioria das economias avançadas enfrenta desafios na implementação de energias renováveis, especialmente em relação à obtenção de licenças e expansão da infraestrutura da rede elétrica. Nas economias emergentes, incertezas políticas e regulatórias

ainda são barreiras importantes para uma expansão mais rápida da energia renovável. Nas economias em desenvolvimento, a infraestrutura de rede frágil e a falta de acesso a financiamentos acessíveis dificultam a conclusão pontual de projetos de energia renovável (IEA, 2023a).

Além desses obstáculos, existem outras dificuldades relacionadas à cadeia de valor e reciclagem dos módulos fotovoltaicos. Diante disso, os desafios e barreiras podem ser encarados como oportunidades para a criação de fórmulas de valor inovadoras no futuro e políticas que abordem os obstáculos técnicos, socioeconômicos e regulatórios (FRANCO; GROESSER, 2021).

2.1.3 Benefícios socioeconômicos e ambientais associados à expansão da energia solar.

As principais vantagens dos sistemas de energia fotovoltaica incluem baixo custo de operação e manutenção, baixa poluição e funcionamento sem a necessidade de água (SHAHBAZBEGIAN; HOSSEINI-MOTLAGH; HAERI, 2020). A energia solar fotovoltaica desempenhou um papel significativo na redução das emissões de CO₂ provenientes da geração de eletricidade em 2022. De acordo com o IEA PVPS (2023), a energia solar contribuiu para evitar aproximadamente 1.399 milhões de toneladas de emissões anuais de CO₂, o que representa um aumento de 30% na redução das emissões em comparação ao ano de 2021. Esse cálculo compara as emissões que poderiam ter ocorrido se a mesma quantidade de eletricidade fosse produzida por várias combinações de redes elétricas em todos os países, considerando as emissões durante todo o ciclo de vida dos sistemas de energia solar fotovoltaica (IEA PVPS, 2023).

Além disso, a energia solar permite que os consumidores gerem a sua própria eletricidade, reduzindo suas contas de energia, e promovendo uma maior independência energética. A energia solar também fomenta o desenvolvimento de tecnologia e inovação, e conseqüentemente, fortalece a segurança energética ao descentralizar a geração de energia (ABSOLAR, 2022). A adoção de sistemas de geração de energia própria, como módulos solares e dispositivos de armazenamento, mesmo em níveis menores, desempenha um papel na diminuição da sobrecarga das redes de distribuição e transmissão, ao mesmo tempo em que ajuda a nivelar a curva de demanda desses sistemas (ABSOLAR, 2022).

Portanto, esse sistema de energia traz muitos benefícios em termos econômicos e ambientais, visto que permite uma redução nos custos de energia a longo prazo para os

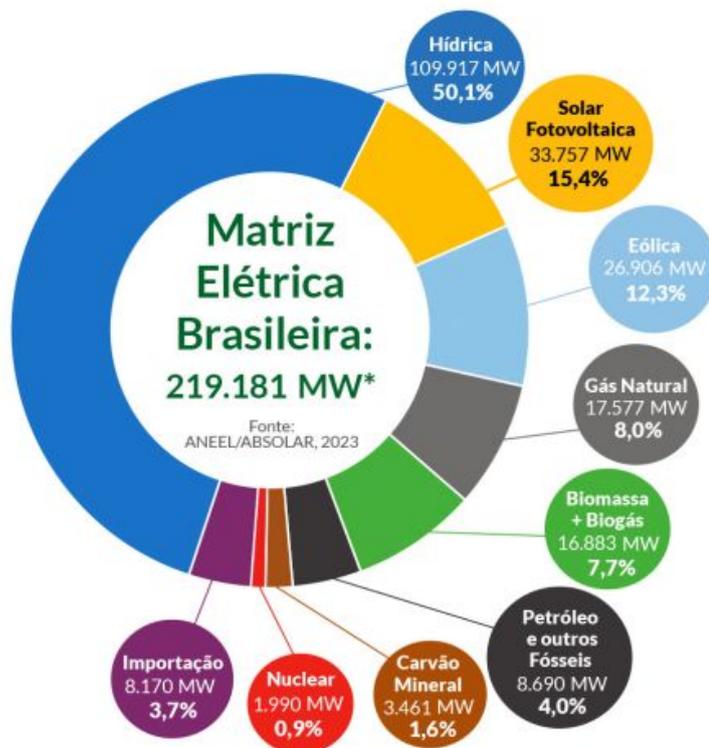
consumidores, ao mesmo tempo em que contribui significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa, promovendo um ambiente mais limpo e sustentável. E para que isso se mantenha é necessário que a cadeia de valor dos módulos fotovoltaicos seja gerida de uma forma adequada, destinando os módulos no fim de sua vida útil para a reciclagem. As empresas devem sempre recuperar os recursos utilizados em suas operações, não apenas pelo seu potencial valor econômico, mas também para reduzir os impactos ambientais das operações (SITRA, 2023).

2.2 PANORAMA – SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NO BRASIL

2.2.1 Crescimento da energia fotovoltaica no Brasil

O ranking dos principais mercados de 2022, estabelecido pelo Relatório Instantâneo de Mercados Fotovoltaicos Globais da Agência Internacional de Energia (2023), categorizou o Brasil na quarta posição em capacidade anual instalada, com um total de 9,9 GW, quase dobrando a capacidade nova em relação ao ano anterior, sendo o mercado mais dinâmico da América Latina em energia solar. Em apenas 6 meses de 2023, a potência instalada já registra um aumento de 26% em comparação com o ano de 2022 (ABSOLAR, 2023). A energia solar ocupa a segunda posição em termos de capacidade de geração na matriz energética nacional, sendo superada apenas pela energia produzida por usinas hidrelétricas, impulsionando não só a transição energética para fontes renováveis, mas também a geração de empregos e o desenvolvimento econômico (ABSOLAR, 2023). A figura 4 retrata a participação da energia solar na matriz elétrica brasileira.

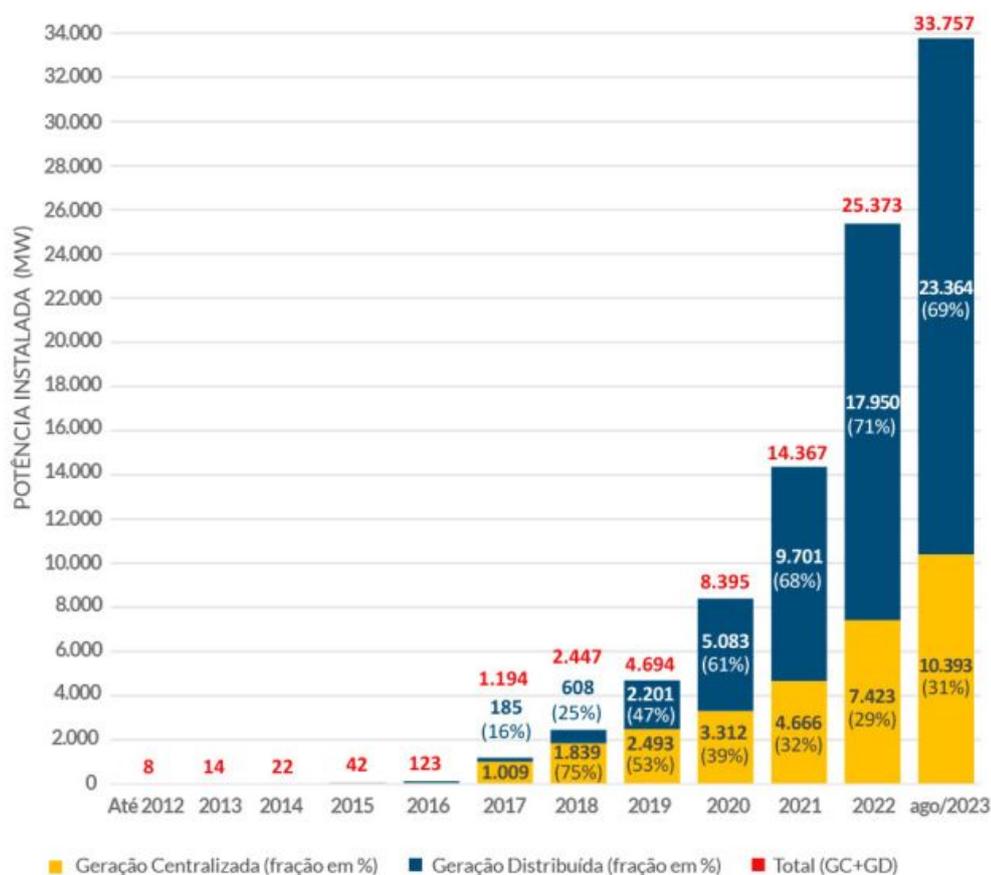
Figura 4- Evolução do Setor Fotovoltaico no Brasil



Fonte: Infográfico ABSOLAR (2023).

A geração distribuída (GD) é um modelo que viabiliza a produção de eletricidade no local ou em sua proximidade, em contraposição à geração centralizada, caracterizada por grandes usinas conectadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Este último sistema é responsável por transportar a energia para consumo por intermédio de uma rede de transmissão e distribuição (PEREIRA, 2023). Através da geração distribuída, sistemas solares são implantados em telhados de residências e edifícios comerciais, capacitando consumidores e empresas a gerarem sua própria energia elétrica. Isso proporciona maior autonomia e independência do consumidor em relação ao setor energético, diminuindo a dependência das empresas distribuidoras. A figura 5 retrata o crescimento da capacidade instalada de energia solar fotovoltaica em (MW) para a geração distribuída e centralizada no país.

Figura 5- Capacidade instalada da fonte solar no Brasil



Fonte: Infográfico ABSOLAR (2023).

2.2.2 Políticas e incentivos brasileiros

O Brasil tem implementado uma série de políticas e incentivos para promover a instalação e o uso de sistemas fotovoltaicos em residências, empresas e setores industriais. Esta seção abordará algumas das principais iniciativas nacionais nesse sentido.

- A) Resolução Normativa N° 482 de 2012: Permitiu o consumidor a gerar a sua própria energia, e, o uso dos créditos de energia solar foi regulamentado no país. Hoje, essa resolução foi revogada pela Resolução Normativa ANEEL N° 1.059, de 7 de fevereiro de 2023. Essa última resolução aprimora os regulamentos relacionados à conexão, ao faturamento das centrais de microgeração e minigeração distribuída em sistemas de distribuição de energia

elétrica, além de revisar as diretrizes do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (BRASIL, 2023)

- B) A Lei nº 14.300/2022, publicada em janeiro de 2022, foi um importante marco. Como comentado no item anterior, a Resolução Normativa nº 482/2012 regulou o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) via Micro e Minigeração Distribuída (MMGD). Após debates, o Projeto de Lei nº 5.829/2019 estabeleceu o Marco Legal da MMGD, resultando na Lei nº 14.300/2022. Esta lei, estabelece um conjunto mais sólido de regras legais e regulatórias, proporcionando não apenas maior certeza jurídica, mas também uma base mais firme de estabilidade e previsibilidade (GREENER, 2023).
- C) O decreto publicado em março de 2023 incluiu insumos de módulos fotovoltaicos no Programa de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Indústria de Semicondutores (Padis). Então, todos os módulos solares produzidos por empresas qualificadas para o Programa Padis podem se beneficiar de reduções de impostos sobre os insumos usados na fabricação de módulos solares até dezembro de 2026, como chapas e tiras de cobre, vidro temperado, condutores elétricos, cimento de resina e caixas de junção para módulos fotovoltaicos. Essa iniciativa estimula a indústria nacional a fabricar os módulos aqui no país em vez de importá-los (BRASIL, 2023a).

É importante destacar que, em abril de 2015, o Conselho Nacional de Política Fazendária (Confaz) implementou o Convênio ICMS/16, permitindo que cada estado brasileiro iniciasse a concessão de isenções do Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) aplicado à energia fornecida pela distribuidora às unidades consumidoras. Essa medida desempenhou um papel significativo no cenário nacional de implementação da energia fotovoltaica e pode ser considerada como parte das estratégias para promover sua adoção em nível nacional (CONVÊNIO ICMS 16, 2015).

Por exemplo, no estado do Espírito Santo, está em vigor uma legislação, desde 2021, que estabelece o Programa de Geração de Energias Renováveis do Espírito Santo (Gerar). O principal propósito deste programa é promover a diversificação da matriz energética e impulsionar o crescimento econômico, oferecendo benefícios fiscais e tributários às empresas que se concentram na produção de dispositivos para geração de energia renovável, com foco

especial em fontes como solar, eólica e biomassa (PROGRAMA DE GERAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS - GERAR, 2021).

Outro exemplo relevante ocorreu no estado do Rio de Janeiro em 2022, quando foi promulgada a Lei 9.594. Essa legislação promove o financiamento e aquisição de sistemas de energia solar fotovoltaica para servidores públicos efetivos, civis e militares, ativos, inativos, e pensionistas do Rio de Janeiro. Essa medida possibilita que esses servidores adquiram tais sistemas com condições de pagamento mais vantajosas, permitindo o desconto mensal por meio de consignação em folha, ou seja, um desconto diretamente realizado no salário ou benefício recebido. Tal iniciativa tem como objetivo oferecer aos servidores públicos do estado uma oportunidade acessível e conveniente para a obtenção de sistemas de energia solar, promovendo assim o uso de fontes sustentáveis de energia para atender às suas demandas energéticas (RIO DE JANEIRO, 2022).

2.2.3 Desafios e oportunidades para o setor fotovoltaico no Brasil

As novas regras de compensação de crédito estabelecidas pela Lei 14.300 trouxeram certa insegurança ao consumidor. Uma pesquisa publicada pela Greener (2023a) demonstrou que o total de volume de módulos fotovoltaicos vendidos no primeiro trimestre de 2023 sofreu uma queda de 63% comparado ao mesmo período em 2022. Dentre os motivos apontados pela pesquisa, 36% das empresas relataram que novas regulamentações referentes à compensação de créditos geram incerteza entre os consumidores. Outros 34% identificaram as altas taxas de juros ou bancos mais criteriosos na liberação de créditos como principais dificuldades. 26% afirmaram dúvidas quanto ao novo governo e evitam investir em tais sistemas e 4% mencionaram outros motivos, como os preços dos sistemas fotovoltaicos e o fato de clientes terem fechado negócio antes do início de 2023.

Portanto, o setor de integração fotovoltaico está enfrentando obstáculos no aumento das atividades de venda no início de 2023, principalmente devido às mudanças introduzidas pelo Marco Legal da Geração Distribuída. No entanto, conforme o relatório Greener (2023), os sistemas FV melhoraram o payback em comparação com janeiro de 2023, principalmente devido à redução nos preços de aquisição (CAPEX). Isso os mantém como uma opção atrativa para consumidores que buscam geração local, representando 75% da capacidade instalada, enquanto os empreendimentos de geração remota podem sentir um impacto maior na sua atratividade.

Dentre as principais oportunidades para o Brasil no setor fotovoltaico, destaca-se a geração de empregos, conforme relata o infográfico publicado pela Absolar (2023a), o Brasil superou a marca de um milhão de empregos criados desde o início da expansão da fonte no país, em 2012, devido ao crescimento tanto da geração distribuída quanto da geração centralizada de energia solar. Além disso, dados fornecidos pela mesma fonte indicam que a energia solar atraiu mais de R\$164,2 bilhões em investimento para o Brasil, contribuindo para evitar a emissão de mais de 42,3 milhões de toneladas de emissões de CO₂.

Para aumentar a competitividade do setor de energia fotovoltaica no Brasil, alguns desafios precisam ser superados, como promover o investimento no desenvolvimento da indústria e da cadeia produtiva nacional visando a produção de módulos fotovoltaicos, visto que o desenvolvimento da indústria de silício purificado e a criação de uma cadeia produtiva focada na montagem de placas e fabricação de equipamentos são cruciais para a transição do Brasil de importador para produtor de tecnologias (OTTONELLI et al., 2021).

Além desse desafio, avançar no desenvolvimento de tecnologias de logística reversa visando diminuir o impacto ambiental por meio da reciclagem dos módulos no final de sua vida útil, também é uma barreira que precisa ser superada (OTTONELLI et al., 2021). A antecipada substituição de equipamentos pode ser motivada por diversos fatores, como fenômenos climáticos, avanços tecnológicos, inadequações nas instalações ou questões relacionadas ao transporte (TEIXEIRA, 2021). Para que uma tecnologia seja totalmente sustentável, é essencial levar em conta o que ocorre no final do seu ciclo de vida (TEIXEIRA, 2021).

Levando em conta essa premissa, o senador Carlos Viana anunciou um projeto de lei (PL) 3.784/2023 para obrigar os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de módulos solares fotovoltaicos a desenvolver e implantar sistemas de logística reversa (AGÊNCIA SENADO, 2023). O projeto inclui na Lei 12.305, de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, o inciso “módulos solares fotovoltaicos”. Ademais, o senador afirmou que embora a Política Nacional de Resíduos Sólidos já preveja a logística reversa, existe uma ambiguidade que gera insegurança jurídica sobre a obrigatoriedade de incluir os módulos solares fotovoltaicos no processo (AGÊNCIA SENADO, 2023).

2.3 EMPRESA DE RECICLAGEM

Este estudo levou em consideração o caso da empresa SunR, especializada em reciclagem de módulos fotovoltaicos desde o ano de 2020. A empresa implementou uma abordagem inovadora, montando seu maquinário em contêiners sendo totalmente móvel. Essa estratégia permite que a empresa consiga se deslocar até o local de reciclagem, em ocasiões que justificam esse processo. A figura 6 mostra a estrutura desenvolvida pela empresa.

Figura 6- Contêiner de PV - MRC (Photovoltaic Mobile Recycling Container)



Fonte: SunR, 2023

A tecnologia de processamento é nacional e de propriedade da empresa, permitindo a reciclagem dos módulos de silício, resultando na produção de materiais valiosos, como barras de alumínio perfil, vidro temperado granulado, polímero moído, cabos elétricos inteiros e mistura de metais granulados. Esses materiais são vendidos para a indústria do metal, vidro e alumínio (TEIXEIRA, 2021). A capacidade média de processamento da empresa de reciclagem é de 3 toneladas por hora (ton/h), utilizando um processo 100% mecânico (SunR, 2023).

Um fato relevante é que a SunR não cobra pelo processo de reciclagem em si, gerando receita exclusivamente a partir das vendas dos materiais recuperados após a reciclagem. Ademais, a empresa repassa os custos de frete aos clientes, mantendo um modelo de negócio centrado na valorização dos recursos reciclados. A empresa também mantém

parcerias estratégicas com transportadoras, gerenciadoras de resíduos e compradores de materiais reciclados, desempenhando um papel crucial em sua cadeia de valor (SunR, 2023).

2.3.1 Descarte de módulos fotovoltaicos

O setor fotovoltaico foi desenvolvido para produzir energia de forma limpa, sendo mais sustentável. No entanto, a tecnologia fotovoltaica deixa de cumprir seu propósito ambiental ao final de sua vida útil. A Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) projetou um descarte regular de módulos fotovoltaicos de aproximadamente 1,7 milhões de toneladas em 2030, e 60 milhões de toneladas em 2050 (IRENA,2016). A garantia dos fabricantes para células solares convencionais de silício cristalino é válida por 20 a 30 anos (HAGFELDT; M. KADRO, 2017), devido à perda de eficiência da célula fotovoltaica ao longo do tempo (TEMBO; SUBRAMANIAN,2023). Além do cenário de descarte convencional no final da vida útil dos módulos fotovoltaicos, a estimativa de descartes antecipados por deterioração é de um volume muito maior, com 8 milhões de toneladas até 2030 e um total de 78 milhões de toneladas em 2050 (WECKEND; WADE; HEATH, 2016). Isso demonstra que o descarte de módulos fotovoltaicos ocorre não somente no pós-consumo, mas em outras etapas da cadeia de valor do produto, como na de transporte, operação e manutenção por exemplo. Neste contexto, é crucial que as empresas de reciclagem do setor de energia solar tenham acesso aos diversos atores da cadeia de valor dos módulos fotovoltaicos, como montadoras, usinas, instaladoras, gerenciadoras de resíduos, distribuidoras e seguradoras, ampliando assim seu alcance no mercado. Os fabricantes também são uma peça-chave para fechar o ciclo da cadeia de produção dos módulos. No entanto, o Brasil ainda não possui fabricantes de módulos solares, apenas montadoras. Tal fato representa uma das barreiras à expansão do setor solar conforme cita a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE, 2012), a obtenção de uma estrutura de custos competitiva para a purificação do silício a grau solar e para a fabricação de células e módulos fotovoltaicos, capaz de se equiparar aos preços internacionais, demanda consideráveis custos de operação e manutenção na indústria, e isso depende, em grande parte, de incentivos fiscais específicos (ABINEE, 2012).

Nas montadoras, testes de qualidade são realizados para verificar a segurança elétrica e a saída de energia. Os módulos que não passam no teste de qualidade e não podem ser reparados ou reutilizados são desmontados e, posteriormente, destinados para empresas locais

de tratamento de resíduos (WECKEND; WADE; HEATH, 2016). Neste caso, o encaminhamento dos módulos solares para empresas especializadas em reciclagem de módulos solares é preferível.

Um outro exemplo de descarte antecipado por deterioração de módulos solares ocorre na distribuição devido a acidentes durante o transporte, no carregamento e no descarregamento, como ilustra a figura 7.

Figura 7- Acidente de Transporte com Módulo Solar



Fonte: SunR (2023)

As seguradoras também desempenham um papel fundamental na gestão de resíduos ao oferecerem serviços de seguro para módulos solares. Elas podem cobrir parte ou todos os custos de conserto/substituição conforme acordos contratuais. Geralmente, os módulos com defeito são devolvidos ao fornecedor contratual, a um serviço associado ao fabricante ou ao próprio fabricante para serem inspecionados e consertados (WECKEND; WADE; HEATH, 2016). Neste caso, se os módulos não tiverem como serem reparados podem ser destinados para a empresa de reciclagem.

No caso das grandes usinas solares, elas estão sujeitas a danos significativos por eventos climáticos extremos, como tempestades. Durante esses eventos, os sistemas fotovoltaicos podem enfrentar uma série de desafios, incluindo a possibilidade de raios

danificarem dispositivos críticos como inversores. Além de danos causados por ventos fortes, erosão do solo ou até mesmo danos físicos (JACKSON; GUNDA, 2021).

No contexto da gestão de resíduos de módulos solares, empresas gerenciadoras de resíduos desempenham um papel crucial ao coletar e encaminhar esses resíduos para empresas responsáveis pela reciclagem. Para ilustrar, a Intelbras, como vendedora de módulos solares, não apenas oferece canais de descarte de seus produtos, mas também estabeleceu parceria estratégica com outra instituição, como a Greeneletron, que disponibiliza locais de descarte aos produtos da Intelbras (INTELBRAS, 2023). Neste cenário, as gerenciadoras de resíduos desempenham um papel essencial ao direcionar os módulos solares para as empresas de reciclagem.

2.3.2 Implementação da economia circular em modelos de negócios

A economia global demonstra notáveis níveis de ineficiência, com apenas uma parcela de 8,6 % de suas operações fundamentadas nos princípios da economia circular (SITRA, 2023). Dentro das complexas cadeias de valor, identificam-se ineficiências que são amplamente recorrentes. Estas ineficiências abrangem o uso de materiais insustentáveis, a subutilização da capacidade produtiva, o fim prematuro do ciclo de vida do produto, a depreciação de valor no término desse ciclo, bem como relações com os clientes que não são devidamente exploradas (SITRA, 2023). As convenções da economia linear não podem continuar a suprir a crescente demanda por recursos naturais, à medida que a natureza se aproxima de pontos de viragem nos quais o mundo perde irreversivelmente sua capacidade de sustentar a biosfera (SARIATLI, 2017).

A transição para uma economia circular requer mudanças sistemáticas em todos os níveis, incluindo eco- inovação e tecnologia, bem como otimização na cadeia de produção em foco em modelos de negócios alternativos, relações mais amplas com fornecedores e clientes e mudanças logísticas (WITJES; LOZANO, 2016). A implementação da economia circular possui o potencial de elevar a competitividade em âmbito global, fomentar um crescimento econômico sustentável e instaurar oportunidades em novos domínios de emprego (SMOL et al., 2017).

Conforme o The British Standards Institution (2017), existem 6 tipos de modelos de negócios com potencial de serem compatíveis com um sistema econômico circular, são eles: modelo sob demanda, desmaterialização, extensão do ciclo de vida do produto/reutilização,

recuperação de matérias-primas secundárias/coprodutos, produto como serviço/sistema produto-serviço (PPS) e economia compartilhada e consumo colaborativo. A empresa SunR se enquadra no modelo descrito como Recuperação de materiais brutos secundários/subprodutos (Recovery of secondary raw materials/by-product), visto que a empresa otimiza o valor pela criação de matéria prima a partir da reciclagem. Ao reciclar os módulos fotovoltaicos e transformá-los em matérias-primas que são revendidas para a utilização em novos processos de produção, a SunR contribui para a redução do desperdício, maximizando a utilização desses materiais e minimizando a necessidade de novos recursos naturais. Isso se alinha com o conceito de economia circular, que busca fechar o ciclo de vida dos produtos, promovendo a reutilização, a reciclagem e a reintrodução de materiais na cadeia produtiva.

Ainda de acordo com o The British Standards Institution (2017), as empresas que reciclam módulos fotovoltaicos no Brasil, operam na esfera aberta (open loop) visto que os materiais gerados por elas não voltam para a execução de um módulo solar, pois não existem fábricas de módulos no Brasil, apenas importadoras, montadoras e distribuidoras. Portanto, a matéria prima gerada do processo de reciclagem é destinada para outras indústrias, incentivando os clientes a devolverem itens usados e não desejados à reciclagem por meio de um sistema conveniente.

3 IMPACTO AMBIENTAL PROVENIENTE DOS DESCARTES DECO MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Atualmente, a maioria dos módulos fotovoltaicos produzidos em escala global são compostos de silício cristalino (c-Si). Estes módulos consistem principalmente de vidro, polímeros e alumínio, os quais são considerados resíduos não perigosos, constituindo mais de 90% de sua composição. No entanto, além desses componentes seguros, os módulos também contêm quantidades mínimas de materiais considerados perigosos, como vestígios de prata, estanho e chumbo. Em contraste, os módulos de filme fino são compostos em mais de 98% por materiais não perigosos, tais como vidro, polímeros e alumínio, com cerca de 2% de cobre e zinco, que podem apresentar potencial risco, juntamente com materiais semicondutores ou outros elementos considerados perigosos (WECKEND; WADE; HEATH, 2016).

Existem outras variantes de módulos fotovoltaicos compostos por células de Telureto de Cádmio (CdTe), os quais são constituídos por camadas de Sulfeto de Cádmio (CdS) e Telureto de Cádmio (PORTAL SOLAR, s.d) De acordo com uma pesquisa conduzida por

Nover et al. (2017), verificou-se que, ao longo de um período de 360 dias, uma porcentagem de 1,4% de chumbo, proveniente de módulos fotovoltaicos de silício cristalino (c-Si), e 62% de cádmio, oriundo de módulos de Telureto de Cádmio (CdTe), foram identificados como sendo liberados em soluções aquosas.

Um estudo realizado por Yang et al. (2023) investigou os efeitos adversos do cádmio na tilápia, revelando efeitos prejudiciais nas brânquias, músculos, cérebro e intestinos do peixe. Essa exposição também desencadeou alterações na expressão genética no cérebro e no fígado, comprometeu o sistema respiratório e debilitou a capacidade hepática de desintoxicação e defesa contra possíveis infecções.

Os impactos negativos dos módulos fotovoltaicos sobre o meio ambiente e a saúde derivam, principalmente, da liberação de chumbo e cádmio. Ambos os elementos demonstram toxicidade ambiental e têm a capacidade de se acumular na cadeia trófica. Em termos de saúde humana, o chumbo penetra na corrente sanguínea, desencadeando efeitos adversos no sistema nervoso, reprodutivo e cardiovascular. Por outro lado, o cádmio é reconhecido como um agente cancerígeno e mutagênico, capaz de ocasionar mudanças patológicas em casos de exposição a ele (MONIER; HESTIN, 2011).

Essas considerações ressaltam a necessidade de destinar os resíduos de módulos fotovoltaicos de maneira adequada. Esses módulos, ao alcançarem o término de sua vida útil, vão se transformar em uma categoria de resíduo potencialmente perigoso, podendo acarretar impactos ambientais adversos caso não sejam devidamente recuperados ou descartados (CHOWDHURY et al., 2020).

4 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho consiste em desenvolver os passos para criar um modelo de negócio que atenda às pequenas demandas de coleta e destinação de resíduos fotovoltaicos provenientes do setor de energia solar. A logística reversa é um serviço essencial para atender às necessidades de reciclagem de módulos fotovoltaicos (CURTIS et al., 2021). No entanto, não há legislação específica para a logística reversa de módulos solares no Brasil. Além disso, o setor de reciclagem encontra-se em fase inicial de desenvolvimento no país, com apenas algumas empresas atuantes nesse segmento.

Para realizar este trabalho foi feito um estudo de caso junto à empresa SunR, especializada na reciclagem de módulos fotovoltaicos no Brasil. Durante o estudo, identificou-se um desafio de transporte associado à demanda reduzida de descarte de módulos FV. Os passos metodológicos adotados para o desenvolvimento do modelo de negócio estão descritos nos tópicos abaixo.

4.1 SEGMENTAÇÃO DOS MUNICÍPIOS

As informações iniciais necessárias para o desenvolvimento do modelo de negócio foram obtidas durante uma reunião com a empresa de reciclagem, onde foram discutidas as principais questões do setor. Também foi estabelecido um meio de comunicação para a troca de informações e esclarecimentos de dúvidas ao longo do processo.

Para a identificação dos municípios alvo no âmbito do modelo de negócio proposto, foi conduzido um levantamento baseado na capacidade solar instalada no Brasil. Esses dados foram extraídos do infográfico disponibilizado mensalmente pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABOSLAR), que utiliza dados da Aneel, portanto é uma fonte reconhecida de informações no contexto do setor fotovoltaico nacional. O infográfico apresenta informações acerca da capacidade instalada em megawatt (MW) na geração distribuída, categorizando por estado e fornecendo um ranking municipal como base para identificação das localidades potenciais de aplicação. Esse ranking enumera os municípios brasileiros com a maior potência instalada em MW. A partir desses dados, desenvolveu-se um índice de potencial que quantifica numericamente a potência dos municípios listados. O cálculo desse índice foi realizado conforme a equação 1, avaliando o potencial de um município em relação à capacidade máxima identificada entre todas as localidades.

Equação 1 - Fórmula do Índice de Potência

$$Ip = \frac{P}{P_{máx}} \quad (1)$$

Em que:

I_p : Índice de potência;

P : Potência instalada em geração distribuída em um município (MW);

$P_{máx}$: Potência máxima instalada dentre os municípios listados (MW).

Ao dividir a potência instalada do município pela potência máxima instalada entre os municípios, obtém-se um índice normalizado que indica a proporção da capacidade instalada desse município em comparação com o máximo possível. Após o cálculo do índice de potencial, procedeu-se ao cálculo do índice de distância. Esse cálculo considerou a distância dos municípios listados no ranking até Valinhos – SP, onde está localizado o centro de reciclagem da empresa. A equação 2 foi utilizada para o cálculo do índice de distância.

Equação 2- Fórmula do Índice de Distância

$$Id = \frac{1 - (dv - dmín)}{(dmáx - dmín)} \quad (2)$$

Em que:

Id: Índice de distância;

dv: Distância do município até Valinhos - SP;

dmín: Distância mínima até Valinhos-SP, dentre os municípios ranqueados (Km);

dmáx: Distância máxima até Valinhos-SP, dentre os municípios ranqueados (Km).

A fórmula 2 busca normalizar as distâncias entre os municípios listados e Valinhos-SP, criando um índice de distância que varia de 0 e 1. Um índice mais próximo de 0 indica que o município listado está mais próximo da distância máxima considerada no conjunto, enquanto um índice mais próximo de 1 sugere que está mais próximo da distância mínima dentro do conjunto de municípios listados. Essa normalização ajuda na compreensão relativa das distâncias em relação aos limites mínimo e máximo estabelecidos entre os municípios e Valinhos. Os indicadores utilizados possuem unidades de medida distintas, e a normalização é o procedimento empregado para transformar as medidas destes indicadores em escalas similares ou em medidas livres de unidades (POLLESCHA; DALE, 2016).

Adicionalmente aos indicadores mencionados, a análise considerou o Índice de Desenvolvimento Sustentável das Cidades (IDSC -BR), o qual classifica os municípios por meio de uma pontuação geral, avaliando o progresso global em direção aos 17 Objetivos de

Desenvolvimento Sustentável da ONU. Esta pontuação é representada em uma escala de zero a 100, sendo 100 a pontuação máxima, indicando um progresso otimizado rumo ao cumprimento integral dos referidos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (Instituto Cidades Sustentáveis, 2023). Foi considerado que cidades que incorporam a sustentabilidade como uma prioridade e implementam práticas sustentáveis demonstram uma inclinação significativa para participar ativamente de iniciativas para a promoção da sustentabilidade.

Para normalizar os índices de sustentabilidade dos municípios fornecidos pelo Índice de Desenvolvimento Sustentável das Cidades (IDSC -BR), foram utilizados os valores disponíveis para os municípios do ranking, cada um com índice variando de 0 a 100. Identificou-se o maior valor dentre esses índices, e em seguida, foi dividido os valores dos índices dos municípios listados pelo valor máximo encontrado, resultando em um novo conjunto de índices normalizados. Essa normalização permitiu expressar os índices em uma escala uniforme de 0 a 1, onde 1 represente o desempenho máximo em sustentabilidade, facilitando a comparação relativa entre os diferentes municípios. Os índices de potência e de distância também estão em uma escala de 0 a 1, facilitando a comparação. A equação 3 foi utilizada para calcular o índice ODS.

Equação 3 - Fórmula do Índice do ODS

$$I(ods) = \frac{i(ods)}{imáx(ods)} \quad (3)$$

Em que:

$I(ods)$: Índice de ODS;

$i(ods)$: pontuação de acordo com a classificação dos ODS;

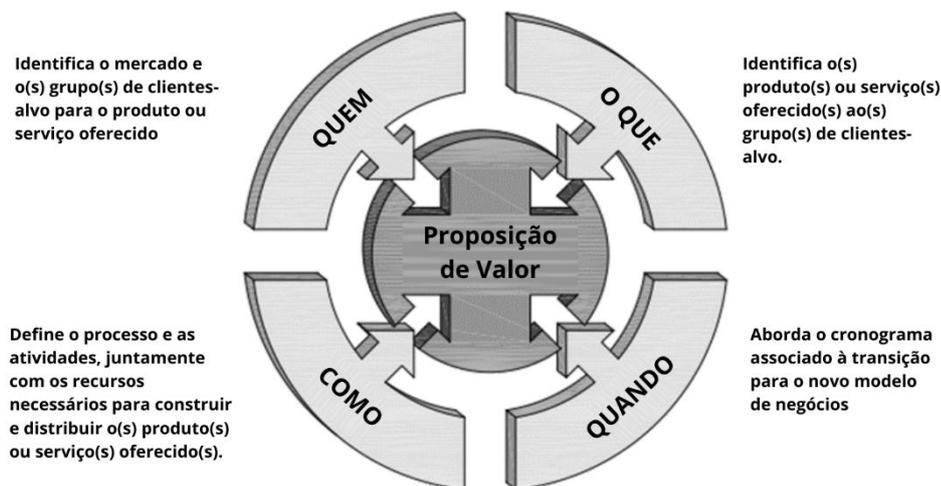
$imáx(ods)$: pontuação máxima conforme a classificação dos ODS dentre os municípios ranqueados.

Para uma avaliação e comparação mais amplas dos municípios, foram conduzidas três alternativas distintas, cada uma aplicando diferentes ponderações aos índices de potência, distância e ODS. Essa metodologia é conhecida como matriz de decisão e possibilitou identificar quais municípios se destacaram como parcerias mais promissoras para a empresa de reciclagem, considerando a relevância relativa atribuída a esses índices.

4.2 DESENVOLVIMENTO DA ESTRATÉGIA

Após a definição do município mais vantajoso, foi elaborada a estratégia destinada à solucionar o transporte de volumes reduzidos de módulos FV. Para isso, levou-se em conta a premissa descrita no The British Standards Institution (2017), que diz que metodologias de modelos de negócios geralmente consistem em quatro elementos interconectados: Quem, O Quê, Como e Quando. Esses elementos apoiam o desenvolvimento da proposição de valor da organização, como demonstra a figura 8:

Figura 8- Visão geral do desenvolvimento do modelo de negócios



Fonte: Adaptado do The British Standards Institution (2017).

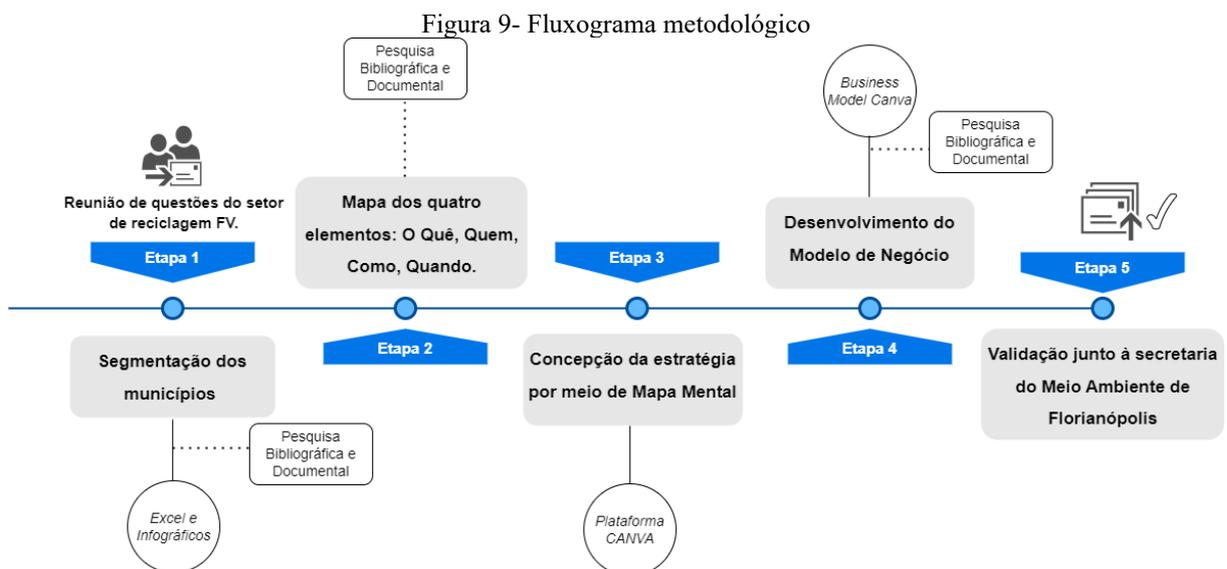
Essa metodologia foi aplicada para estabelecer um cenário inicial da estratégia, buscando-se responder as perguntas dos 4 elementos. Além dessa premissa, foram consultadas normas, incluindo a Lei 12.305/10 e o Projeto de Lei (PL) 3.784/2023, visando compreender a situação brasileira em relação à logística reversa. Partindo desse princípio, foi utilizada a ferramenta Canva para elaboração de um mapa mental. Esse recurso proporcionou um ponto de partida primordial na delimitação do modelo de negócio. Durante a criação do mapa mental, foram formuladas quatro questões orientadoras que desempenharam um papel crucial no direcionamento da estratégia. Dentro desse contexto, foram considerados quatro elementos essenciais para o funcionamento eficaz da estratégia, a saber: parceria estratégica, incentivo,

canal de comunicação e transporte. Esses elementos fazem parte das quatro perguntas delineadoras da estratégia e eles estão descritos no desenvolvimento do trabalho.

4.3 CONSTRUÇÃO DO MODELO DE NEGÓCIO

Após determinada a estratégia para solucionar a coleta de volumes menores de módulos FV, iniciou-se a construção do modelo de negócio. Para isso, foi utilizado a metodologia Business Model Canvas. Essa metodologia foi desenvolvida por Alexander Osterwalder e Yves Pigneur, autores do livro *Business Model Generation* (2010), que definem modelo de negócio como uma ferramenta que descreve a forma como uma organização cria, entrega e captura valor. O Business Model Canvas é uma metodologia popular que define nove blocos de construção de um negócio que são essenciais para a criação e captação de valor. Esses blocos são representados em um quadro, ajudando empreendedores a projetar um novo negócio ou reformular uma estratégia existente (OSTERWALDER, PGNEUR, 2011).

Por fim, o modelo de negócio foi submetido à validação junto à Secretaria do Meio Ambiente de Florianópolis, possibilitando a verificação da viabilidade de implementação do modelo. É importante que as organizações elaborem um estudo de viabilidade para assegurar a alocação dos recursos necessários à pilotagem de novas ideias, bem como à subsequente implementação, expansão e lançamento (BSI, 2017). O fluxograma da figura 9 representa o passo a passo metodológico adotado neste trabalho.



Fonte: Autora (2023)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

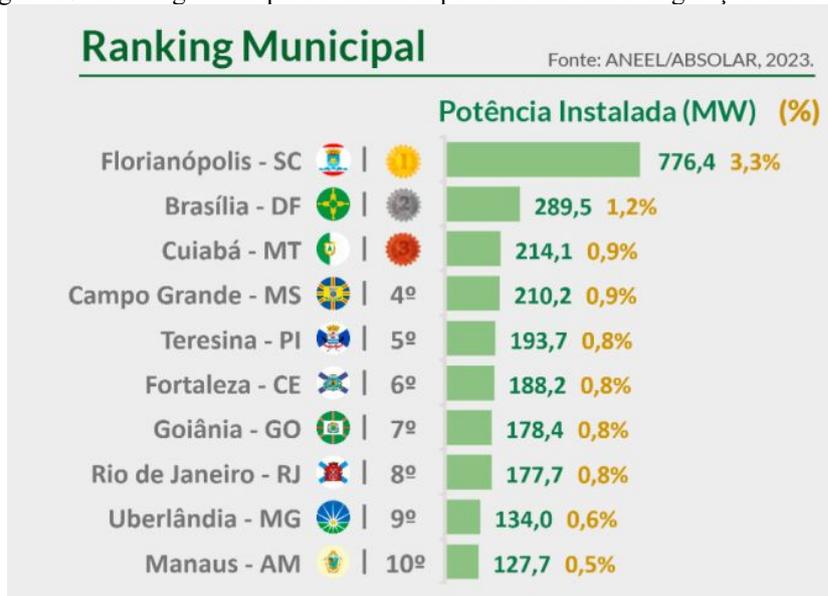
Os resultados obtidos são explorados nessa seção em conjunto com a ferramenta Business Model Canvas.

5.1 IDENTIFICAÇÃO DOS MUNICÍPIOS

5.1.1 Ranking dos municípios

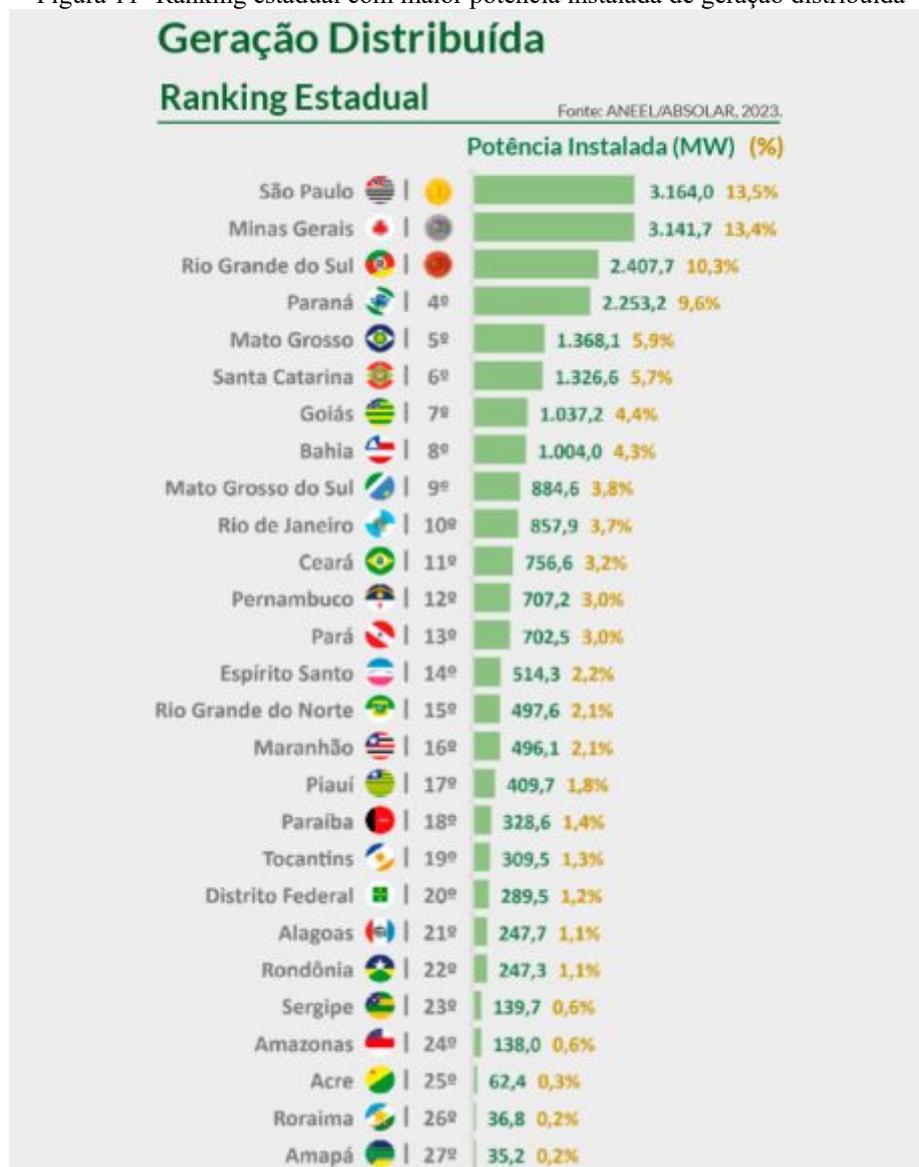
De acordo com o infográfico disponibilizado pela ABSOLAR (2023a) foi possível identificar os municípios que apresentam maior potência instalada em geração distribuída. Dessa forma, foi estabelecido uma condição de contorno do estudo, listando os municípios representados na figura 10. O ranking dos municípios disponibilizado pelo infográfico da Absolar, não apresenta municípios do estado de São Paulo. No entanto, no ranking estadual de geração distribuída, disponibilizado também pelo infográfico da Absolar (2023a), o estado de São Paulo se encontra em primeiro lugar como mostra a figura 11. Dessa forma, levando em conta que o local onde ocorre a reciclagem dos módulos é em Valinhos -SP, foram selecionados os três municípios com maior geração distribuída do estado de São Paulo conforme dados obtidos da EPBR (2023), otimizando então a distância da coleta para a reciclagem. A tabela 1 evidencia os municípios mapeados.

Figura 10- Ranking municípios com maior potência instalada de geração distribuída



Fonte: ABSOLAR (2023a).

Figura 11- Ranking estadual com maior potência instalada de geração distribuída



Fonte: ABSOLAR (2023a)

Tabela 1- Municípios brasileiros mapeados

Municípios Geração Distribuída	Potência Instalada [MW]
Florianópolis - SC	762,3
Brasília - DF	294
Cuiabá - MT	217,9
Campo Grande - MS	213,3
Teresina - PI	197,9
Rio de Janeiro - RJ	197,1

Fortaleza - CE	192,1
Goiânia - GO	182,9
Uberlândia - MG	135,2
Manaus - AM	129,7
São Paulo - SP	109,2
Ribeirão Preto - SP	84,1
Campinas - SP	75,4

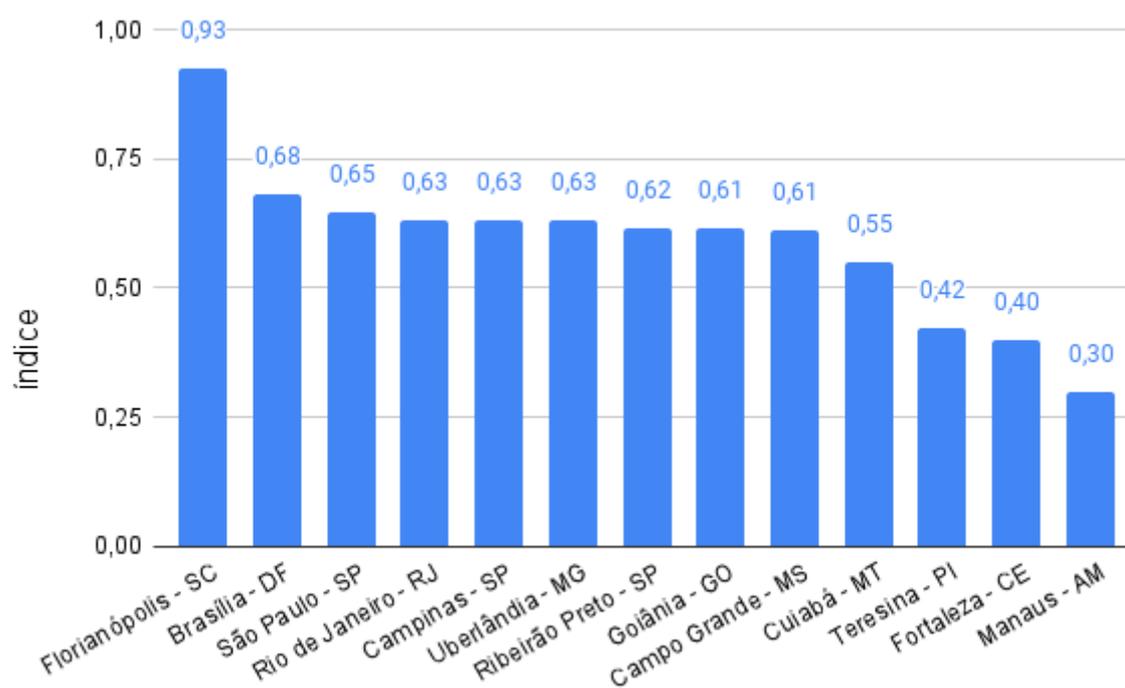
Fonte: Autora (2023)

5.1.2 Definição das alternativas

A descrição das alternativas e a definição dos pesos atribuídos aos critérios considerados são apresentados abaixo, acompanhadas das respectivas justificativas.

- Alternativa 1: Potência 0,4; Distância: 0,3; ODS: 0,3. Nesta alternativa, atribuiu-se o maior peso ao índice de potência, indicando uma maior importância dada à capacidade de potência dos municípios. Distância e ODS têm pesos menores, sugerindo que, embora importantes, não são tão decisivos quanto o potencial de potência na avaliação global.

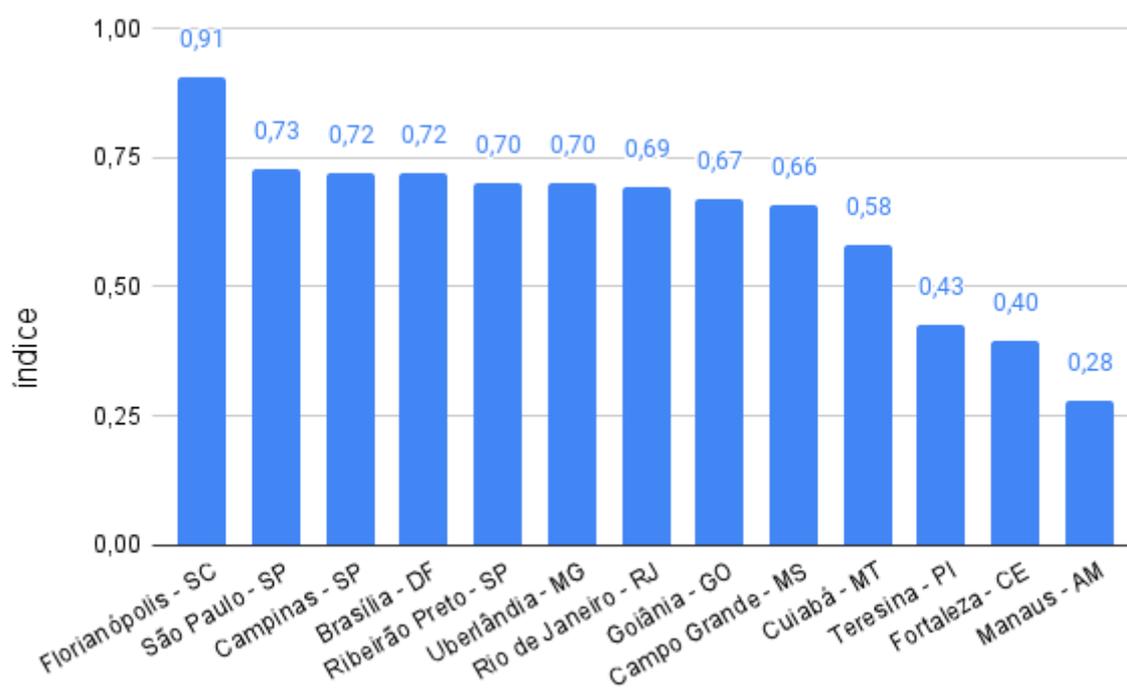
Figura 12 - Alternativa 1 – Potência: 0,4; Distância: 0,3 e ODS: 0,3



Fonte: Autora (2023)

- Alternativa 2: Potência: 0,3; Distância: 0,4; ODS: 0,3. Aqui, o índice de distância recebe um peso mais alto, indicando uma maior consideração dada à localização ou distância dos municípios. Potência e ODS têm pesos menores, mostrando que embora sejam relevantes, não são tão determinantes quanto a localização na análise.

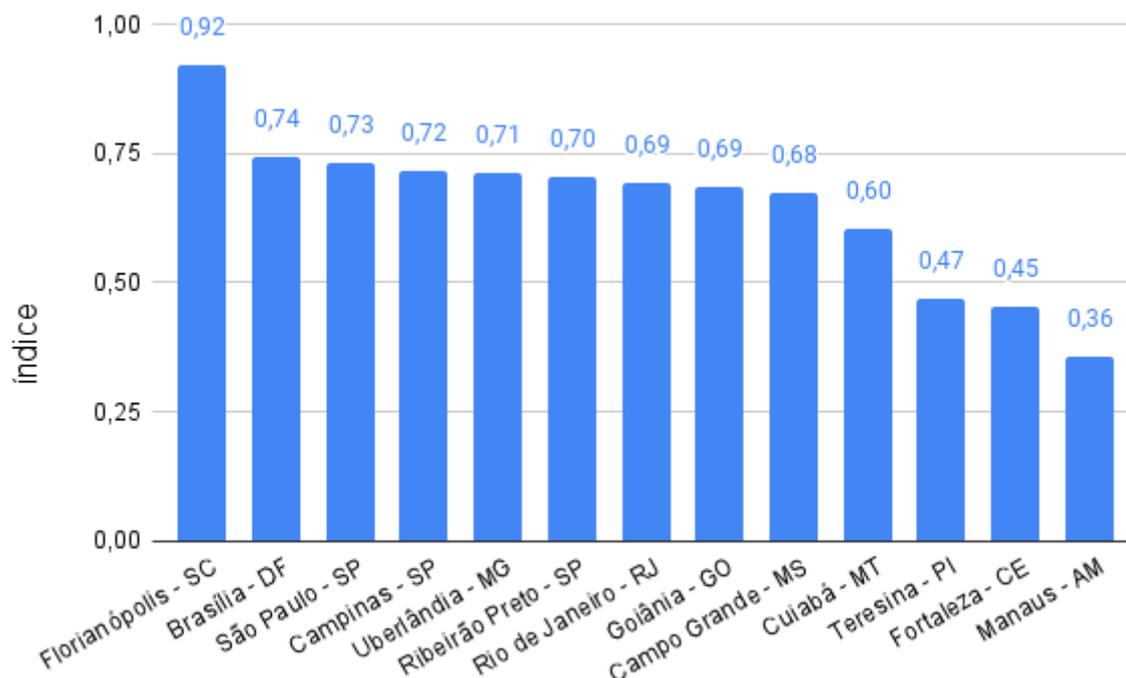
Figura 13 – Alternativa 2 – Potência: 0,3; Distância: 0,4 e ODS: 0,3



Fonte: Autora (2023)

- Alternativa 3: Potência: 0,3; Distância: 0,3; ODS: 0,4. Nesta abordagem, o índice ODS é atribuído o maior peso, sugerindo uma ênfase maior na sustentabilidade dos municípios medido pelo Índice de Desenvolvimento Sustentável, indicando que as cidades que apresentam um índice relevante em ODS serão mais receptivas a iniciativa proposta no modelo de negócio. Potência e Distância possuem pesos menores, demonstrando que, embora importantes, não são tão relevantes quanto a sustentabilidade na determinação da validação do município.

Figura 14- Alternativa 3 – Potência: 0,3; Distância: 0,3 e ODS: 0,4



Fonte: Autora (2023)

Diante de todas as alternativas expostas, Florianópolis demonstrou ser o município com mais vantagens para aplicação do modelo de negócio proposto neste trabalho. Ela apresentou vantagens mesmo em um contexto em que a distância tem um peso maior, devido à grande potência instalada. Realizar essas diferentes abordagens permite explorar como diferentes prioridades atribuídas a esses índices podem influenciar os resultados da análise e proporcionar uma visão mais abrangente sobre quais aspectos são mais críticos na avaliação da validação dos municípios em estudo.

5.2 PONTO DE ENTREGA DE MÓDULO SOLAR (PEMS)

A estratégia proposta envolve o estabelecimento de um Ponto de Entrega de Módulo Solar em Florianópolis e futuramente nos municípios brasileiros com maior geração distribuída, permitindo que pequenas empresas integradoras possam facilmente encaminhar seus módulos solares sem a necessidade de percorrer longas distâncias para descarte apropriado. Nesse contexto, a Secretaria do Meio Ambiente colabora na identificação e disponibilização de um local no município para o recebimento temporário e armazenamento desse material, visando sua posterior coleta pela empresa de reciclagem, transportadora

parceira ou cooperativa. A seguir, apresenta-se uma seção do mapa mental (Figura 15) elaborado com as quatro perguntas orientadoras que tiveram um papel fundamental na definição da estratégia. O mapa mental integral está disponível no Apêndice A.

Figura 15- Seção do mapa mental elaborado



Fonte: Autora (2023).

Ao considerar a implementação de um Ponto de Entrega de Módulo Solar (PEMS) nos municípios com maior geração distribuída, priorizando inicialmente aqueles com maior demanda, promove-se o agrupamento dos módulos descartados, otimizando a eficiência na coleta desses módulos. A coleta é programada de forma a ocorrer somente quando há uma quantidade suficiente para torná-la viável do ponto de vista financeiro para a empresa de reciclagem. Além disso, essa abordagem facilita o descarte por parte dos indivíduos, eliminando a necessidade de longos deslocamentos.

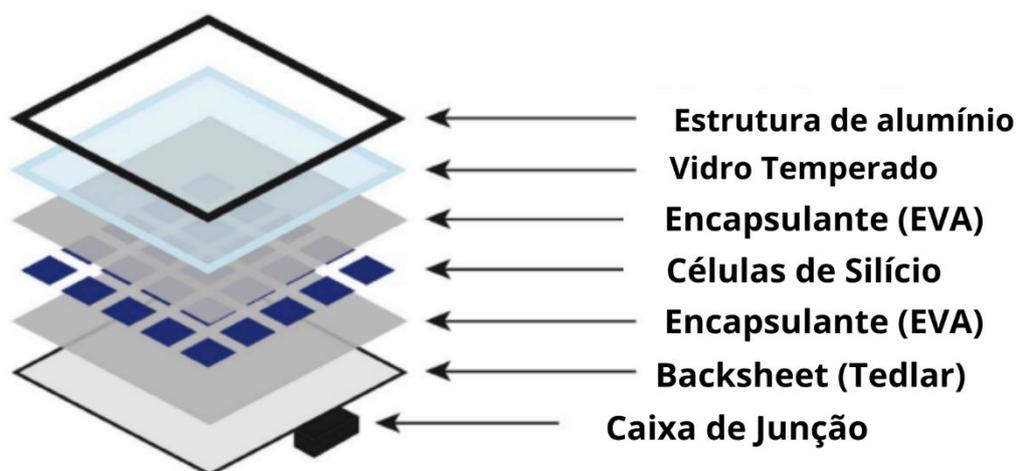
O PEMS implementa pontos estratégicos de entrega e coleta regional, contribuindo para a criação de parcerias locais e solucionando o desafio da coleta de volumes reduzidos de módulos FV de clientes.

O PEMS implementa pontos estratégicos de entrega e coleta regional, contribuindo para a criação de parcerias locais e solucionando o desafio da coleta de volumes reduzidos de módulos FV de clientes. A primeira consideração ao planejar um Ponto de Entrega de Painel

Solar é determinar quem será o responsável por disponibilizá-lo. Nesse contexto, foram analisados os órgãos ambientais encarregados de gerenciar e regulamentar as questões relacionadas ao meio ambiente, tais como as Secretarias do Meio Ambiente Municipais ou Estaduais. Portanto, cabe às secretarias a responsabilidade de disponibilizar um local no município para o recebimento e armazenamento temporário dos módulos, a serem posteriormente coletados pela empresa de reciclagem, cooperativa ou transportadora parceira. Além de disponibilizarem o local, as secretarias disponibilizarão um servidor para recebimento desses módulos conforme a demanda do município. Também haverá registro dos módulos (códigos), das quantidades depositadas e os detalhes do indivíduo que realizou a entrega.

É importante enfatizar que o local disponibilizado pela Secretaria do Meio Ambiente deve ter capacidade suficiente para o armazenamento dos módulos, os quais medem 2x1, totalizando 2 m² de área, podendo ser empilhados em fardos com até 30 módulos, com uma altura de 1,35 metros de altura, padrão esse estabelecido pela própria empresa de reciclagem, considerando o peso do material para transporte, portanto cada fardo ocupará em torno de 2 m². Considerando que a maior parte da produção global do mercado fotovoltaico corresponde a tecnologia de módulos FV de silício cristalino (c-Si) (MAHMOUDI et al.,2019), levou-se em conta a composição desses módulos, conforme ilustrado na figura 16.

Figura 16- Disposição dos componentes do módulo FV de silício cristalino.

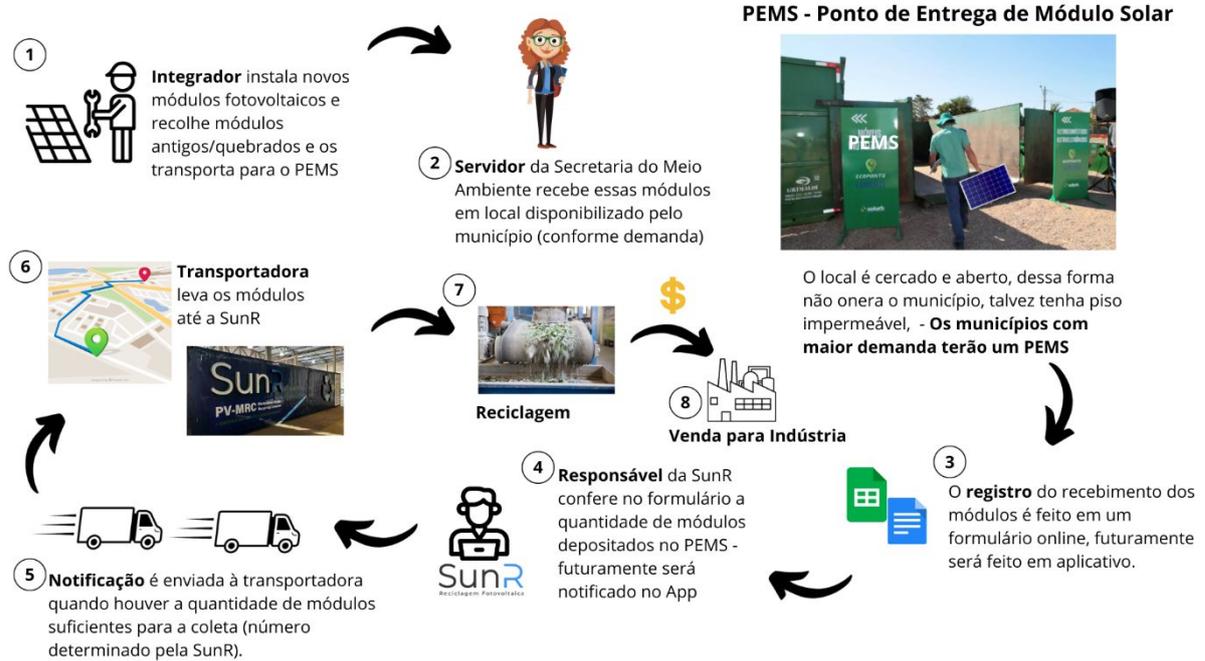


Fonte: Adaptado de FARREL et al. (2020)

Sabe-se que as células de silício cristalino apresentam uma camada antirreflexiva em sua superfície com filamentos de cobre revestido por estanho e chumbo (SANTOS et al., 2021). Embora os módulos fotovoltaicos não sejam considerados resíduos perigosos, uma vez que são projetados para serem seguros e duradouros, e seus principais componentes são vidro, alumínio e silício, eles podem conter certas quantidades de substâncias potencialmente tóxicas. Um estudo feito por Petroli (2023), que avalia a periculosidade de resíduos de módulos fotovoltaicos, classificou o painel policristalino de silício como perigoso pelas normas NBR 10004, TCLP 1311 e GB 5085.3, devido à presença de níveis elevados de chumbo (Pb), com concentrações de 8,68 mg/L, 8,68 mg/L e 7,35 mg/L, respectivamente. Portanto, para prevenir possíveis contaminações ambientais durante o armazenamento desses módulos, é necessário que o local disponha de um piso impermeável, evitando possíveis lixiviações no solo, especialmente no caso de módulos muito danificados. Além disso, medidas de segurança, como cercamento, são igualmente necessárias.

Os custos de coleta e transporte serão cobertos pela empresa de reciclagem ou transportadora/cooperativa parceira, sem onerar o município que participará apenas fornecendo o local de armazenamento e alguns dias de servidor. A gestão dos recebimentos e a liberação dos materiais para a empresa de reciclagem serão feitas de forma transparente, seja digitalmente ou através de comprovantes físicos, garantindo o registro de todas as movimentações. A figura 17 representa o fluxo de operação do PEMS.

Figura 17- Fluxo de operação do PEMS

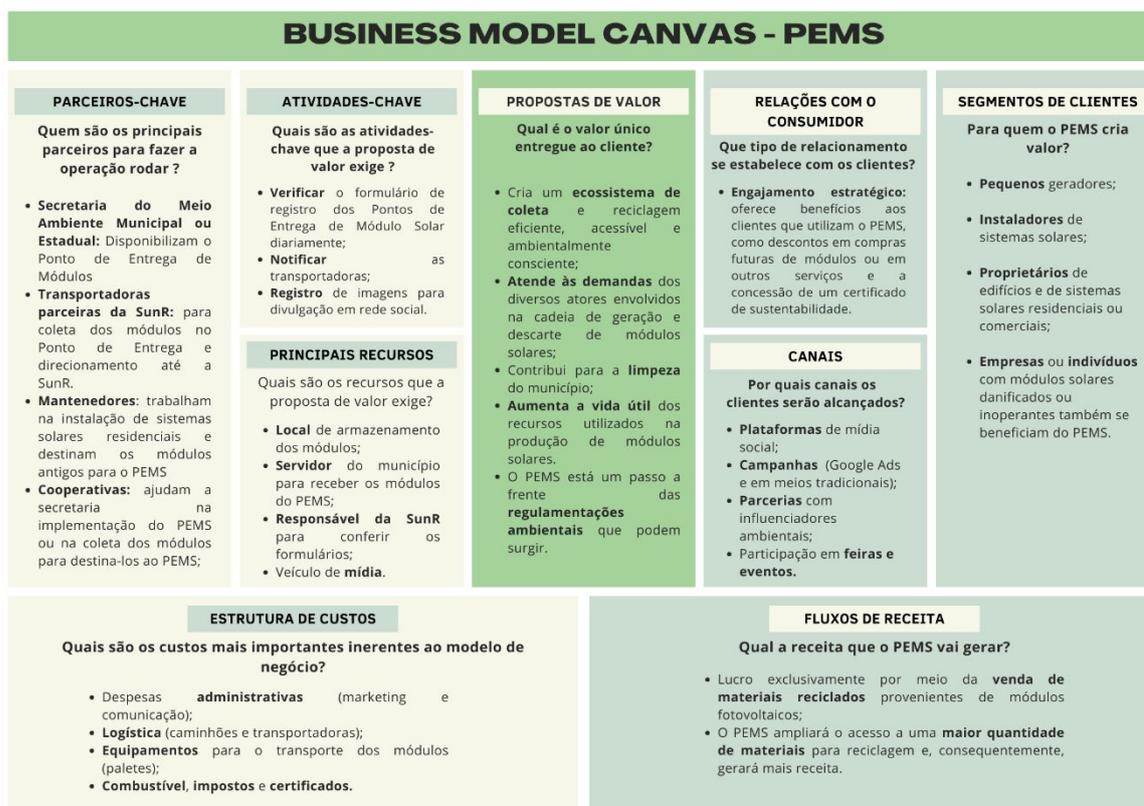


Fonte: Autora (2023).

5.3 MODELO DE NEGÓCIO

A ferramenta utilizada, o Business Model Canvas, apresenta 9 blocos e está representada na figura 18, cada bloco será explicado detalhadamente nos tópicos abaixo.

Figura 18- Business Model Canvas – Ponto de Entrega de Módulo Solar (PEMS)



Fonte: Autora (2023).

5.3.1 Parcerias-chave

Para formular uma proposta sustentável, que otimize o tempo e recursos de combustível, foi realizado um mapeamento dos parceiros estratégicos essenciais para a execução eficaz das operações, com o objetivo de expandir as operações da empresa para diferentes estados brasileiros. Os parceiros estratégicos identificados compreendem as Secretarias do Meio Ambiente Municipais, as transportadoras colaboradoras da empresa de reciclagem, as cooperativas e os integradores.

As Secretarias Municipais do Meio Ambiente atuam como agente de suporte, disponibilizando um local no município para o recebimento e armazenamento temporário dos módulos solares para posterior coleta pela empresa de reciclagem. Ademais, a Secretaria também vai disponibilizar um servidor para o recebimento do material, programado de acordo com a demanda de descarte para otimizar o tempo desse servidor. Este último também será responsável por fazer a gestão dos recebimentos e a liberação dos materiais para a empresa de reciclagem, emitindo comprovantes das movimentações. Essa iniciativa beneficia o

município, visto que o descarte de módulos fotovoltaicos se tornará uma questão ambiental pertinente nas próximas décadas (CHOWDHURY et al., 2020).

Em parceria com o município, as cooperativas podem atuar como pontos de recebimento e armazenamento temporário dos módulos fotovoltaicos, mantendo um controle preciso de todo material armazenado. Além disso, elas podem realizar a coleta desses módulos nas residências. A prefeitura de Florianópolis, por exemplo, por meio da Secretaria Municipal do Meio Ambiente (SMMA), estabeleceu a coleta de resíduos volumosos sob demanda, através de agendamentos ou pontos de entrega itinerantes (PREFEITURA DE FLORIANÓPOLIS, 2021). Ademais, a empresa de reciclagem e as cooperativas podem estabelecer uma parceria de longo prazo, com acordos contratuais que detalhem as responsabilidades de cada parte, incluindo custos e receitas compartilhadas, prazos e expectativas de qualidade.

Caso as cooperativas não assumam a coleta dos módulos solares provenientes de sistemas residenciais, os integradores, que são profissionais ou empresas especializadas na manutenção de sistemas de energia solar, podem desempenhar esse papel. Por exemplo, quando um mantenedor instala novos módulos fotovoltaicos na residência de um cliente, ele pode coletar os módulos antigos e direcioná-los para o local de armazenamento designado pelo município.

As transportadoras, também por meio de parcerias com a empresa de reciclagem, coletam os módulos armazenados nas instalações municipais designadas (PEMS) e os transportam para a empresa de reciclagem. Esse processo pode ser efetivado por meio de um contrato de longo prazo com a transportadora, estabelecendo um relacionamento de fidelidade entre a empresa de reciclagem e a transportadora, com benefícios mútuos.

5.3.2 Atividades-chave

Dentro do bloco das atividades, englobam-se as ações fundamentais, operacionais e estratégicas essenciais para o desempenho eficiente do modelo de negócio. Neste contexto, as atividades identificadas incluem:

- 1) Como parte da rotina diária, realizar a verificação do formulário de registro dos Pontos de Entrega Solar com o objetivo de identificar o momento em que atinge a quantidade mínima de módulos solares necessária para realizar a coleta e verificar sua localização. Esta prática é crucial, considerando a presença de vários PEMS distribuídos pelo território

brasileiro em um cenário futuro. O formulário online inclui informações como registro do integrador que depositou os módulos, a quantidade depositada por cada indivíduo e a quantidade total armazenada no PEMS. Futuramente pode ser desenvolvido um aplicativo da empresa de reciclagem para conter as informações de todos os municípios com PEMS, facilitando a visualização de todas as movimentações, as notificações também serão por meio do aplicativo. O uso inicial do formulário visa reduzir os custos de implementação desse modelo de negócio, funcionando como um Produto Mínimo Viável (MVP).

2) Notificação das transportadoras responsáveis pela realização da coleta. Essa notificação será feita pela empresa de reciclagem após conferir o formulário de movimentações. Futuramente, essa notificação será automatizada por meio do aplicativo, eliminando a necessidade de verificação manual das quantidades e notificação das transportadoras.

3) Registro de imagens dos PEMS, documentação do funcionamento e de todas as etapas do processo para divulgação em mídias sociais. Dessa forma, esse registro permitirá informar as pessoas sobre a importância da reciclagem e o engajamento nacional em prol da sustentabilidade.

5.3.3 Recursos

Mapear os recursos necessários para operar o Ponto de Entrega de Módulo Solar é crucial para garantir o eficiente funcionamento do negócio, uma vez que esses recursos estão intrinsecamente ligados aos custos. Os recursos necessários para operar o PEMS envolvem o local de armazenamento dos módulos. É importante ressaltar que os módulos serão empilhados em fardos contendo no máximo 30 unidades, ocupando uma área de 2m² cada. Assim, cada fardo demandará aproximadamente 2m² de espaço. Assumindo que uma coleta de até 100 módulos é considerada cara e classificada como uma demanda baixa, o espaço fornecido pela Secretaria Municipal do Meio Ambiente deve ter no mínimo 14m². Supondo que a coleta de 200 módulos seja considerada uma demanda adequada, isso equivaleria a 7 paletes. É recomendável que o local esteja equipado com um piso impermeável, uma vez que alguns módulos podem estar danificados e há a possibilidade de contaminação do solo, embora esses módulos não sejam considerados resíduos contaminantes. Além do piso impermeável, o local deve ser cercado por razões de segurança, sem a necessidade de ser completamente fechado.

Junto ao local de armazenamento, será imprescindível a disponibilização de um servidor pela Secretaria Municipal do Meio Ambiente. Este servidor desempenhará o papel de receber os módulos conforme a demanda de descarte. Nesse contexto, prevê-se que o servidor estará disponível de 1 a 2 vezes por mês, considerando que o Ponto de Entrega de Módulo Solar atenderá exclusivamente descartes de pequenos geradores, não abrangendo grandes usinas e fabricantes. A frequência de descarte de módulos fotovoltaicos de pequenos geradores não é elevada, dado que esses módulos são projetados para uma durabilidade de 25 a 30 anos (CORCELLI et al., 2016). Os motivos para o descarte podem incluir intempéries, defeitos de fabricação, instalação inadequada e o alcance do tempo de vida útil (JACKSON; GUNDA, 2021). Estas considerações são cruciais para a adequada provisionamento de recursos e planejamento das operações do PEMS, alinhando-se às características específicas do público-alvo.

Outro recurso fundamental é o formulário online, que será preenchido pelo servidor da Secretaria Municipal do Meio Ambiente ao receber os módulos. É relevante destacar que esse formulário pode ser elaborado nas plataformas do Gsuite, plataforma gratuita do google, não onerando a empresa de reciclagem. Além do servidor, será indispensável designar uma pessoa responsável dentro da empresa de reciclagem para verificar o preenchimento dos formulários e notificar a transportadora para efetuar a coleta.

Ademais, será necessário utilizar veículos de mídia para documentar o processo do PEMS, envolvendo parceiros locais e promovendo a participação da sociedade como um todo. Essas estratégias visam garantir uma gestão eficiente e transparente do processo de descarte, ao mesmo tempo em que fortalecem o engajamento com os diversos stakeholders envolvidos.

5.3.4 Proposta de Valor

As empresas de reciclagem criam oportunidades de negócio ao lidar com as ineficiências do mercado de energia solar e convertê-las em valores adicionais. Elas transformam módulos solares ineficientes em recursos valiosos para a indústria oferecendo uma solução para os módulos no final de sua vida útil. Dessa forma, a empresa de reciclagem agrega valor à indústria de energia solar.

Neste bloco, busca-se responder à pergunta “Qual é o valor único entregue pelo Ponto de Entrega de Módulos Solares e por que os clientes utilizarão?” A proposta de valor do PEMS reside em criar um ecossistema de coleta e reciclagem eficiente, acessível e

ambientalmente consciente, atendendo às demandas dos diversos atores envolvidos na cadeia de geração e descarte de módulos solares. Esse modelo beneficia a limpeza do município, aumenta a vida útil dos recursos utilizados na produção de módulos solares e atrai os clientes devido à sua responsabilidade ambiental e social. Dessa forma, o valor único entregue pelo PEMS está fundamentado na sua capacidade de fornecer uma solução abrangente que atende às demandas de diferentes participantes da cadeia de geração e descarte de módulos solares, destacando-se pela eficiência, acessibilidade e consciência ambiental e social.

Além disso, as regulamentações ambientais representam um risco para qualquer negócio (DAOU et al.,2020). A economia circular está cada vez mais incorporada nas agendas regulatórias e políticas, especialmente na União Europeia, onde o Plano de Ação para a Economia Circular e o Pacto Verde alcançaram diversas novas regulamentações e políticas. Iniciativas como a iniciativa de políticas de produtos sustentáveis e a nova taxonomia da EU estão impactando todos os negócios e criando incentivo (SITRA, 2023).

No Brasil, está em tramitação o Projeto de Lei 3784/2023, cujo propósito é tornar obrigatória para fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de módulos solares fotovoltaicos a organização e execução de sistemas de logística reversa. Se aprovado, um projeto como o PEMS facilitará o processo logístico, envolvendo todas as partes da cadeia de produção dos módulos, fazendo com que haja engajamento de todos os fornecedores e montadoras. Empresas na vanguarda da transformação para negócios sustentáveis irão se diferenciar dos concorrentes, aumentar a participação de mercado e expandir para novos mercados (SITRA, 2023).

5.3.5 Relacionamento

Ao fornecer um produto sob a forma de serviço, cria-se uma relação mais estreita com o cliente durante todo o ciclo de vida do produto (SITRA, 2023). O Ponto de Entrega de Módulo Solar (PEMS) não é um produto, mas um serviço de coleta dos módulos fotovoltaico que estão no término de sua vida útil. Oferecer benefícios ou recompensas aos integradores que utilizam o PEMS, são boas estratégias de fidelização. Essas estratégias podem incluir descontos em compras futuras de módulos ou em outros serviços de parceiros, créditos para produtos ou serviços relacionados à energia solar, brindes e a concessão de um certificado de sustentabilidade. Tais benefícios representam uma forma palpável de reconhecer o engajamento dos clientes com a sustentabilidade, potencialmente estimulando um envolvimento contínuo e fortalecendo o vínculo de fidelidade com os clientes.

Participar de feiras, congressos e eventos relacionados à sustentabilidade permite que empresas de reciclagem eduquem e informem o público sobre o impacto positivo que a iniciativa do PEMS tem na cadeia produtiva e no meio ambiente. Isso não apenas ajuda na conscientização, mas também fortalece a imagem da empresa como uma entidade comprometida com questões ambientais. Além desses pontos, buscar feedbacks constante dos clientes para aprimorar o serviço oferecido pelo PEMS, demonstra que as opiniões dos clientes são valorizadas, e implementar melhorias com base nessas avaliações cria um vínculo mais forte com o serviço.

5.3.6 Canais

O Ponto de Entrega de Módulo Solar pode promover sua missão e serviços por meio de diferentes canais, incluindo plataformas de mídia social (como Instagram, LinkedIn e Facebook), campanhas (anúncios em meios tradicionais e digitais, como o Google Ads), e comunicação verbal. À medida que os clientes buscam se relacionar com iniciativas sustentáveis, é essencial criar uma experiência envolvente, destacando os benefícios ambientais e a importância da reciclagem de módulos solares. A presença online do PEMS será fundamental, com destaque para um site informativo como base dessa estratégia de comunicação.

Colaborar com influenciadores ambientais pode ser uma abordagem eficaz para promover a reciclagem de módulos solares. Além disso, a organização e participação em eventos comunitários locais, feiras e congressos é essencial para sensibilizar o público sobre a importância da reciclagem de módulos solares. Parcerias com empresas de energia solar, revendedores especializados, montadoras e importadoras, organizações ambientais, empresas de reciclagem, cooperativas e iniciativas governamentais podem ampliar o alcance do PEMS. Essas estratégias visam não apenas informar, mas também envolver ativamente a comunidade na prática responsável da gestão de resíduos solares.

5.3.7 Clientes

Neste bloco, foram identificados potenciais utilizadores para o Ponto de Entrega de Módulo Solar (PEMS). A crescente conscientização e ampla cobertura midiática sobre questões ambientais, como mudanças climáticas, poluição ambiental e o uso de recursos naturais, impulsiona a busca por soluções sustentáveis, incluindo a reciclagem de módulos

solares. A empresa de reciclagem deste estudo de caso, atende clientes com grande volume de descarte de módulos FV, visto que o frete acaba sendo mais barato para grandes quantidades de descartes de módulos. Portanto, os clientes ideais para o PEMS incluem pequenos geradores, instaladores de sistemas solares, proprietários de edifícios e de sistemas solares residenciais ou comerciais que buscam descartar módulos antigos de maneira responsável. Empresas ou indivíduos com módulos solares danificados ou inoperantes também podem se beneficiar do PEMS. Em resumo, o público-alvo do PEMS são pessoas ambientalmente conscientes e comprometidas com a sustentabilidade, que necessitam de uma destinação adequada para seus resíduos.

5.3.8 Estrutura de Custos

Estimar o custo das atividades operacionais é um passo essencial na análise do modelo de negócio. Portanto, a estrutura de custos inicial é categorizada em custos fixos e custos variáveis, conforme discutido por Daou et al. (2020). Exemplos de custos fixos para a operação do Ponto de Entrega de Módulo Solar (PEMS) incluem despesas administrativas (marketing e comunicação) e logística (caminhões ou transportadoras). Já os custos variáveis incluem itens como equipamentos para o transporte dos módulos (paletes), combustível, impostos e certificados.

5.3.9 Fontes de Receita

Este passo consiste em definir as fontes de receita geradas pelo valor que é criado e entregue ao mercado. Por meio de estratégias de circularização, este bloco auxilia na definição das principais características do modelo de negócios circular do Ponto de Entrega de Módulo Solar. Durante a produção e utilização de módulos solares, recursos valiosos são muitas vezes desperdiçados quando não são adequadamente destinados. Esses recursos têm potencial para serem valorizados, por exemplo, por meio da reciclagem de materiais para a fabricação de novos produtos, ou pela recuperação de peças e componentes para reutilização. Isso já é feito pela empresa de reciclagem deste estudo de caso, agregando valor para suas operações, dessa forma ela demonstra importância pela cadeia de suprimentos dos módulos solares, seguindo os princípios da economia circular.

A empresa de reciclagem obtém lucro exclusivamente por meio da venda de materiais reciclados provenientes de módulos fotovoltaicos. Atualmente, ela não consegue atender a demanda de reciclagem de boa parte dos módulos de pequenos geradores devido os

custos elevados que estes clientes têm para fazer o envio dos módulos. Com a implementação do Ponto de Entrega de Módulo Solar (PEMS), a empresa ampliará o acesso aos materiais para reciclagem, resultando em um aumento nas receitas geradas por vendas. Será necessário estabelecer a quantidade mínima de módulos para coleta no PEMS, assim como definir os métodos de coleta.

5.4 RISCOS ASSOCIADOS AO MODELO DE NEGÓCIO

Os riscos inerentes a esse modelo de negócio estão associados às incertezas, incluindo os custos operacionais. A viabilidade econômica do PEMS depende desses custos, como manutenção do PEMS e despesas relacionadas ao transporte. Se esses custos forem muito altos e não houver um volume adequado de módulos solares sendo coletados para reciclagem, o modelo pode enfrentar problemas financeiros. Outro fator crítico diz respeito às parcerias estabelecidas, a colaboração com a Secretaria do Meio Ambiente e outras entidades requer uma coordenação contínua, e qualquer desalinhamento nessa colaboração pode impactar adversamente a eficiência e a continuidade do modelo proposto.

A eficiência do modelo depende da capacidade de realizar a coleta e reciclagem dos módulos solares de maneira oportuna e eficaz. Se houver problemas na logística, atrasos na coleta ou falta de parcerias confiáveis para o transporte, isso pode comprometer a credibilidade e funcionamento do serviço. Além dos aspectos descritos, o sucesso do modelo também depende da aceitação e adesão das pequenas empresas integradoras. Se elas não utilizarem ou confiarem no serviço oferecido pelo Ponto de Entrega de Módulo Solar, o modelo pode enfrentar dificuldades em se tornar viável.

5.5 IMPLICAÇÕES E LIMITAÇÕES DO ESTUDO

A proposta deste estudo contém implicações para a prática de negócios mais sustentáveis, visto que o objetivo é solucionar um desafio de logística existente em empresas de reciclagem. Especificamente, este estudo contribui para a literatura sobre modelos de negócio sustentáveis e circulares, bem como para a pesquisa em gestão ambiental, ao conceituar a incorporação de uma proposta de valor circular e introduzir uma abordagem legal, ambiental e social em um modelo de negócio.

Esse estudo apresenta algumas limitações. Não foram fornecidos pela empresa de reciclagem dados de custos médio do transporte dos módulos, nem o lucro por cada material

reciclado vendido. O desafio foi limitado somente à área de logística, e dados de custos e receitas foram considerados sensíveis, sendo disponibilizado apenas um indicador KPI. Portanto, não foi possível realizar uma projeção do custo do transporte do ponto de entrega de módulo solar (PEMS) até a empresa de reciclagem e nem o cálculo de quantos módulos devem ser acumulados para que compense financeiramente a empresa de reciclagem coletá-los e, conseqüentemente, não foi possível estabelecer um tamanho de área exato para o Ponto de Entrega de Módulos Fotovoltaicos.

6 CONCLUSÃO

A composição da matriz energética brasileira está passando por uma transformação significativa, impulsionada pelo crescente potencial de geração de energia solar nos últimos anos. Essa mudança está levando ao surgimento de empresas de reciclagem no setor solar, impulsionando iniciativas mais sustentáveis. Este estudo atendeu o objetivo de elaborar um modelo de negócio destinado a solucionar a problemática de coleta de pequenos volumes de descarte de módulos FV.

Para isso, foram identificados os municípios brasileiros com maior adoção de geração distribuída, com o intuito de iniciar a implementação da proposta na localidade que apresenta a maior demanda e viabilidade para a empresa de reciclagem deste estudo de caso. Paralelamente, foi realizado o mapeamento de outros municípios potenciais para uma futura aplicação do modelo de negócio, permitindo que a empresa atinja uma escala mais ampla. A análise do município mais vantajoso foi realizada através de uma matriz de decisão, concluindo-se que o município mais favorável para implementação do modelo de negócio é Florianópolis.

Para solucionar a problemática de destinação adequada de clientes com pequenas demandas, foi desenvolvido o Ponto de Entrega de Módulo Solare (PEMS), permitindo que pequenos integradores possam facilmente encaminhar seus módulos solares sem a necessidade de percorrer longas distâncias para descarte apropriado. Para esse fim, foi construído um Business Model Canvas, descrevendo detalhadamente cada etapa do modelo de negócio. Por fim, buscou-se validação do modelo de negócio com a Secretaria Municipal do Meio Ambiente e com a Superintendência de Gestão de Resíduos de Florianópolis, a fim de verificar a aplicabilidade do modelo de negócio, medidas de contato ainda estão sendo tomadas neste âmbito.

Para as próximas etapas, recomenda-se realizar análises do custo de transporte dos módulos para então calcular a quantidade de módulos que devem ser acumulados no PEMS para que a coleta seja financeiramente viável. Assim, será necessário dimensionar o ponto de entrega de módulo solar para que comporte a quantidade de módulos estabelecidas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA SENADO. **Carlos Viana propõe logística reversa para painéis solares.** Senadonotícias, 2023. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2023/08/16/carlos-viana-propoe-logistica-reversa-para-paineis-solares>>. Acesso em: 25 set. 2023

ANEEL. **ANEEL sinaliza novo recorde para expansão da geração em 2023.** 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/aneel-sinaliza-novo-recorde-para-expansao-da-geracao-em-2023>>. Acesso em: 18 maio 2023.

ABSOLAR. **A energia solar fotovoltaica e seus inúmeros benefícios para a rede elétrica.** São Paulo, 27 jun. 2022. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/noticia/a-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-inumeros-beneficios-para-a-rede-eletrica/>>. Acesso em: 12 set. 2023.

ABSOLAR. **Capacidade de produção da energia solar no primeiro semestre de 2023 supera todo o resultado de 2022.** São Paulo, 10 jul 2023. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/capacidade-de-producao-da-energia-solar-no-primeiro-semester-de-2023-supera-todo-o-resultado-de-2022/>>. Acesso em: 13 set. 2023.

ABSOLAR. **Infográfico nº 59 Energia Solar Fotovoltaica no Brasil.** 19 set. 2023a. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 15 de out. 2023

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Resolução Normativa ANEEL nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023.** Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.pdf>> Acesso em: 17 de set. de 1

BRASIL. **Decreto nº 11.456, de 28 de março de 2023.** Diário Oficial da União. Brasília, DF, n.61, Seção 1. 29 mar. 2023a. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-11.456-de-28-de-marco-de-2023-473390191>>. Acesso em: 15 out. 2023.

BRASIL. **Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022.** *Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as Leis nºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências.* Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/114300.htm>. Acesso em: 15 out. 2023.

BSI. **Framework for implementing the principles of the circular economy in organizations – Guide.** 2017

CHOWDHURY, Md. Shahariar; RAHMAN, Kazi Sajedur; CHOWDHURY, Tanjia; NUTHAMMACHOT, Narissara; TECHATO, Kuaanan; AKHTARUZZAMAN, Md.; TIONG, Sieh Kiong; SOPIAN, Kamaruzzaman; AMIN, Nowshad. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. **Energy Strategy Reviews**, [S.L.], v. 27, p. 100431, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.esr.2019.100431>.

CONFAZ. **Convênio ICMS nº 16**, de 22 de abril de 2015. *Autoriza a concessão de isenção nas operações internas relativas à circulação de energia elétrica, sujeitas a faturamento sob o Sistema de Compensação de Energia Elétrica de que trata a Resolução Normativa nº 482, de 2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL.* Diário Oficial da União, Brasília, DF, 22 abr. 2015. Disponível em: <https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/2015/CV016_15>. Acesso em: 18 set. 2023.

CORCELLI, Fabiana; RIPA, Maddalena; LECCISI, Enrica; CIGOLOTTI, Viviana; FIANDRA, Valeria; GRADITI, Giorgio; SANNINO, Lucio; TAMMARO, Marco; ULGIATI, Sergio. Sustainable urban electricity supply chain – Indicators of material recovery and energy savings from crystalline silicon photovoltaic panels end-of-life. **Ecological Indicators**. p. 37-51. 5 abr. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X16301327>>. Acesso em: 13 nov. 2023

CURTIS, T, L. et al. A Circular Economy for Solar Photovoltaic System Materials: Drivers, Barriers, Enablers, and U.S. Policy Considerations. **National Renewable Energy Laboratory**, abril 2021. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/publications>>. Acesso em: 24 nov. 2023

DAOU, Alain et al. The Ecocanvas as a business model canvas for a circular economy. **Journal of Cleaner Production**. v. 258, 10 jun. 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620309859?via%3Dihub>>. Acesso em: 16 nov. 2023

EERE - OFFICE OF ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY. **Homeowner's Guide to the Federal Tax Credit for Solar Photovoltaics**. Solar Energy Technologies Office, 2023. Disponível em: <<https://www.energy.gov/eere/solar/homeowners-guide-federal-tax-credit-solar-photovoltaics>>. Acesso em: 3 set. 2023

EERE - OFFICE OF ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY. **Federal Solar Tax Credits For Businesses**. Solar Energy Technologies Office, ago. 2023a. Disponível em: <<https://www.energy.gov/eere/solar/federal-solar-tax-credits-businesses>>. Acesso em: 3 set. 2023.

EPBR. **Minas Gerais lidera instalações de geração distribuída**. Transição energética. 30 jun. 2023. Disponível em: <<https://epbr.com.br/com-3-gw-minas-gerais-lidera-instalacoes-de-geracao-distribuida-veja-ranking-dos-estados>>. Acesso em: 16 nov. 2023

FARREL, C.C.; OSMAN, A. I.; DOHERTY, R.; SAAD, M.; ZHANG, X.; MURPHY, A; ROONEY, D.W. Technical challenges and opportunities in realising a circular economy for waste photovoltaic modules. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 128, p. 109911, 1 ago. 2020. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120302021?via%3Dihub>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

FIGGE, Frank; THORPE, Andrea Stevenson; GUTBERLET, Melissa. Definitions of the circular economy: circularity matters. **Ecological Economics**, [S.L.], v. 208, p. 107823, jun. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.107823>

FRANCO, M. A.; GROESSER, S. N. A Systematic Literature Review of the solar Photovoltaic Value Chain For Circular Economy. **Sustainability**, v.13, n. 17, p. 9615, 26 ago. 2021.

GREENER. **Estudo Estratégico de Geração Distribuída – 1 Semestre de 2023 – Mercado Fotovoltaico Brasil**. setembro de 2023.

GREENER. **Como as vendas de sistemas fotovoltaicos vem se comportando no início de 2023**. 19 abril. 2023a. Disponível em: < <https://www.greener.com.br/como-as-vendas-de-sistemas-fotovoltaicos-vem-se-comportando-no-inicio-de-2023/>>. Acesso em: 19 set. 2023.

GOVERNO DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. **Programa de Geração de Energias Renováveis (GERAR)**, 2021. Disponível em: <<https://investanoes.es.gov.br/gerar>>. Acesso em: 18 set. 2023.

HAGFELDT, A.; KADRO, J. The End-of-life of perovskite PV. **Joule**, v. 1, n. 1, p 29 -46, 6 set. 2017

IEA - Photovoltaic Power System Programme. **Snapshot of Global PV Markets 2023**. 2023. Disponível em: < <https://iea-pvps.org/snapshot-reports/snapshot-2023/>> Acesso em: 14 ago. 2023

IEA - Photovoltaic Power System Programme. **Snapshot of Global PV Markets 2022**. 2022. Disponível em: <<https://iea-pvps.org/snapshot-reports/snapshot-2022/>>. Acesso em: 14 ago. 2023

IEA. **Renewables 2022 – Analysis and forecast to 2027**. 2023a. Disponível em: < <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ada7af90-e280-46c4-a577-df2e4fb44254/Renewables2022.pdf>>. Acesso em: 4 set. 2023.

IEA. **World Energy Balances Highlights**. 2023. Disponível em: < <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances-highlights>> Acesso em: 14 ago. 2023

INDIA. Department of New & Renewable Energy. **Introduction JNNSM**, 2023. Disponível em: < <https://hareda.gov.in/intoduction-jnnsm/>>. Acesso em: 29 ago. 2023

INTELBRAS. **Descarte de Produto**. 2023 Disponível em: <<https://www.intelbras.com/pt-br/institucional/descarte-de-produto>>. Acesso em: 23 out. 2023.

INSTITUTO CIDADES SUSTENTÁVEIS. **Índice de Desenvolvimento Sustentável das Cidades – Brasil: Classificação para os municípios brasileiros**. [S.l.], 2023. Disponível em: < <https://idsc.cidadessustentaveis.org.br/rankings/>>. Acesso em: 17 nov. 2023

IRENA – International Renewable Energy Agency. **Solar Energy**. Disponível em: < <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Solar-energy>> Acesso em: 05 out. 2023.

JACKSON, N. D.; GUNDA, T. Evaluation of extreme weather impacts on utility-scale photovoltaic plant performance in the United States. **Applied Energy**, v.302, p. 117508, 15 nov. 2021

KHANNA, G. C. P. et al. **Jawaharlal Nehru National Solar Mission**. Ministry of New and Renewable Energy Government of India [s.d]. Disponível em: < <https://iitj.ac.in/CSP/material/JNNSM-Final.pdf>>. Acesso em: 05 out 2023.

SITRA. **Sustainable Growth with Circular Economy Business Models**. Finlândia. 3 Jan, 2023. Acesso em: 19 de maio 2023

MAHMOUDI, S. et al. End-of-life photovoltaic modules: A systematic quantitative literature review. **Resources, Conservation and Recycling**, v.146, p. 1-16, jul. 2019.

MIRANDA, Victor S. P. **A Lei Alemã de Fontes Renováveis de Energia em Confronto com a Resolução Normativa nº 482/2012 da Aneel**. In: Desenvolvimento Sustentável. EMERJ. Série Aperfeiçoamento de Magistrados, 17, p.128-136. 2013

MME. **Brasil supera marca de 5 GW de capacidade instalada de usinas solares com geração centralizada**. 30 maio 2022. Disponível em: < <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/brasil-supera-marca-de-5-gw-de-capacidade-instalada-de-usinas-solares-com-geracao-centralizada>>. Acesso em: 27 nov. 2023

MONIER, V.; HESTIN, M. **Study on Photovoltaic Panels Supplementing the Impact Assessment for a Recast of the WEEE Directive**. 2011. Disponível em: < <https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/weee/Study%20on%20PVs%20Bio%20final.pdf>> Acesso em: 14 dez. 2023

MORAN, Emilio F.; LOPEZ, Maria Claudia; MOORE, Nathan; MÜLLER, Norbert; HYNDMAN, David W.. Sustainable hydropower in the 21st century. **Proceedings Of The National Academy Of Sciences**, [S.L.], v. 115, n. 47, p. 11891-11898, 5 nov. 2018. Proceedings of the National Academy of Sciences. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1809426115>. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/epdf/10.1073/pnas.1809426115>. Acesso em: 17 maio 2023.

NEVES, L. Sun R já recebeu 723 toneladas de módulos fotovoltaicos no Brasil. **PV magazine**. Disponível em: <<https://www.pv-magazine-brasil.com/2023/06/27/sun-r-ja-recebeu-723-toneladas-de-modulos-fotovoltaicos-no-brasil/>>. Acesso em: 5 ago. 2023

NOVER, Jessica et al. Long-term leaching of photovoltaic modules. **Japanese Journal of Applied Physics**, v. 56, n. 8, p. 08MD02, jul. 2017. DOI: 10.7567/JJAP.56.08MD02. Disponível em:< <https://iopscience.iop.org/article/10.7567/JJAP.56.08MD02/meta>>. Acesso em: 11 dez. 2023

ONS. **O Sistema Interligado Nacional**. Disponível em: <<http://www.ons.org.br:80/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>. Acesso em: 17 maio. 2023

OSTERWALDER, A.; PGNEUR, Y. **Business Model Generation** – Inovação em Modelos de Negócios: um manual para visionários, inovadores e revolucionários. Rio de Janeiro, RJ. Alta Books, 300 p., 2011

OTTONELLI, J. et al. Oportunidades e desafios do setor de energia solar fotovoltaica no Brasil. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 52, n. 4, p. 8-26, 28, dez. 2021

PEREIRA, Rafael. **Geração distribuída de energia (GD): o que é, regras, benefícios e como fazer parte**. Porta Solar, 2023. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/geracao-distribuida-de-energia.html>>. Acesso em: 23 nov. 2023

PERLOTTI, E.; CAMARGO, F.; GRANVILLE, A.; CUNHA, G.; PEREIRA, M.V.F.; KELMAN, R. Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira. **ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica**, junho 2012. Disponível em: < <http://www.abinee.org.br/noticias/com133.htm>>. Acesso em: 23 nov. 2023

PETROLI, Pedro Amado. **Avaliação da Periculosidade de Resíduos de Módulos Fotovoltaicos**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre. 31 ago. 2023

POLLESCH, N.L.; DALE, V.H. Normalization in Sustainability assessment: Methods and implications. **Ecological Economics**, v. 130, p. 195 – 208, out. 2016. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800915305899>>. Acesso em: 17 nov. 2023

PORTAL SOLAR. Vantagens e desvantagens do painel solar de filme fino. Disponível em: < <https://www.portalsolar.com.br/vantagens-e-desvantagens-do-painel-solar-de-filme-fino>>. Acesso em: 14 dez. 2023

PREFEITURA DE FLORIANÓPOLIS. **Prefeitura implanta coleta de volumosos por agendamento**. 27 abr. 2021. Disponível em: <<https://www.pmf.sc.gov.br/noticias/index.php?pagina=notpagina¬i=23122>>. Acesso em: 26 out. 2023

RIO DE JANEIRO. **Lei nº 9594**, de 04 de março de 2022. *Dispõe sobre financiamento e aquisição facilitada do sistema de energia solar fotovoltaica por servidores públicos efetivos, civis e militares, ativos, inativos e pensionistas do Estado do Rio de Janeiro, com pagamento mensal por meio de consignação em folha e dá outras providências*. Assembleia Legislativa do Estado do Rio de Janeiro (ALERJ). Disponível em: <http://www3.alerj.rj.gov.br/lotus_notas/default.asp?id=53&url=L2NvbnsRzZWkubnNmL2M4YWEwOTAwMDI1ZmVlZjYwMzI1NjRIYzAwNjBkZmZmLzFkZGQzZjMwZWZlNzA3GMwMzI1ODdmZjAwNWFiMGVkp09wZW5Eb2N1bWVudA=>> . Acesso em: 18 set. 2023.

SANTOS, K. A.; GASPARIN, F. P.; RIES, L. A. S. **Módulos Fotovoltaicos de Silício Cristalino: Uma Análise Sobre Sua Composição e Reciclagem**. In: **Anais do 10º Siepex – Salão Integrado de Ensino, Pesquisa e Extensão da Uerg**, 2021. Disponível em: <<https://pev-proex.uergs.edu.br/index.php/xsiepex/article/view/3412/523>>. Acesso em: 06 out. 2023.

SARIATLI, Furkan. Linear Economy Versus Circular Economy: A Comparative and Analyzer Study for Optimization of Economy for Sustainability. In: **Visegard Journal on Bioeconomy and Sustainable Development**. Slovak University of Agriculture in Nitre, v. 6, n. 1, p. 31-34. 22 jun. 2017. Disponível em: <<https://sciendo.com/article/10.1515/vjbsd-2017-0005?tab=references>>. Acesso em: 16 nov. 2023

SHAHBAZBEGIAN, V.; HOSSEINI-MOTLAGH, S.M; HAERI, A. Integrated forward/reverse logistics thin-film photovoltaic power plant supply chain network design with uncertain data. **Applied Energy**, v. 277, p. 115538, nov. 2020.

SMOL, Marzena; KULCZYCKA, Joanna; AVDIUSHCHENKO, Anna. Circular economy indicators in relation to eco-innovation in European regions. **Clean Technologies and Environmental Policy: Focusing on Technology Research, Innovation, Demonstration, Insights and Policy Issues for Sustainable Technologies**, 04 jan. 2017, v.19, p. 669 – 678. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-016-1323-8>>. Acesso em: 16 nov. 2023

SUNR. **SunR Reciclagem Fotovoltaica - A energia solar, ainda mais renovável**. 27 set. de 2023. Slides de apresentação.

TEIXEIRA, A. **Os desafios da logística reversa de painéis fotovoltaicos**. Portal Solar, 07 jul. 2021. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/noticias/tecnologia/equipamentos-fv/os-desafios-da-logistica-reversa-de-paineis-fotovoltaicos>>. Acesso em: 24 set. 2023.

TEMBO, P. M.; SUBRAMANIAN, V. Current trends in silicon-based photovoltaic recycling: A technology, assessment, and policy review. **Solar Energy**, v. 259, p. 137-150, jul. 2023.

WECKEND, S.; WADE, A.; HEALTH, G. **End of Life Management Solar Photovoltaic Panels**. IRENA – International Renewable Energy Agency, Junho 2016. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>>. Acesso em: 20 nov. 2023

WITJES, Sjors; LOZANO, Rodrigo. Towards a more Circular Economy: Proposing a framework linking sustainable public procurement and sustainable business models. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 112, p. 37-44. Set. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344916300994>>. Acesso em: 16 nov. 2023

World Energy Balances – Data product. IEA, 2023. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview#energy-balances>>. Acesso em: 18 maio. 2023

WFCADMIN. **The German Feed-in Tariff**. 15 jul. 2015. Disponível em: <<https://www.futurepolicy.org/climate-stability/renewable-energies/the-german-feed-in-tariff/>>. Acesso em: 30 ago. 2023

YANG, Zituo et al. Unveiling the underwater threat: Exploring cadmium's adverse effects on tilapia. **Science of the Total Environment**. 2 dez. 2023. DOI: 10.7567/JJAP.56.08MD02. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723077343>>. Acesso em: 14 dez. 2023

APÊNDICE A – Fluxograma de desenvolvimento do Ponto de Entrega de Módulo Solar

