

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Júlia Possebon Spellmeier

**CONCEPÇÃO DE UM MODELO DE NEGÓCIOS PARA O
DESEMPENHO COMPETITIVO DO FINAL DA VIDA ÚTIL DE
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Santa Maria, RS
2023

Júlia Possebon Spellmeier

**CONCEPÇÃO DE UM MODELO DE NEGÓCIOS PARA O DESEMPENHO
COMPETITIVO DO FINAL DA VIDA ÚTIL DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro(a) de Produção**.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Carmen Brum Rosa
Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Paula Donaduzzi Rigo

Santa Maria, RS
2023

RESUMO

CONCEPÇÃO DE UM MODELO DE NEGÓCIOS PARA O DESEMPENHO COMPETITIVO DO FINAL DE VIDA ÚTIL DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

AUTORA: Júlia Possebon Spellmeier
ORIENTADORA: Carmen Brum Rosa

O mercado de energia solar experimentou um crescimento recorde nos últimos anos em todo o mundo. Conseqüentemente, o número de equipamentos fotovoltaicos sendo fabricados e instalados cresce na mesma proporção. Tais equipamentos, com o passar dos anos, se aproximam do seu final de vida útil (*End-of-life, EoL*). A sustentabilidade da tecnologia fotovoltaica é colocada em pauta quando se evidencia o EoL FV, visto que o mesmo é encontrado com uma lacuna em todo o mundo. Essa temática carece de estudos e discussões e é evidenciado como um segmento com grande potencial de desenvolvimento. Nesse sentido, o presente estudo tem como objetivo, portanto, criar, entregar e compartilhar valor ao EoL FV através do desenvolvimento de um modelo de negócios. Como objetivos específicos, esse estudo traz em primeiro plano a contextualização dos Fatores Críticos de Sucesso (FCS) que impulsionam a competitividade no EoL FV, a fim de preencher a lacuna existente no EoL FV. Em segundo plano, o mapeamento do relacionamento entre o EoL FV e seus agentes na cadeia de valor. Em terceiro plano, a tomada de opinião com agentes do setor acerca do EoL FV, através de uma análise estatística de conteúdo. Por fim, propor um modelo de negócios, através do *Business Model Canvas* (BMC) para obter êxito e alcançar os resultados esperados quanto à sustentabilidade e competitividade do setor, para isso aplicar-se-á a técnica do *Minimum Viable Product* (MVP) sobre do modelo de negócios.

Palavras-chave: Final de vida útil, Sistemas Fotovoltaicos, Modelo de Negócio, Competitividade.

ABSTRACT

CONCEPTION OF A BUSINESS MODEL FOR THE COMPETITIVE PERFORMANCE OF THE END OF USEFUL LIFE OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

AUTHOR: Júlia Possebon Spellmeier
ADVISOR: Carmen Brum Rosa

The solar energy market has experienced record growth worldwide in recent years. Consequently, the number of manufactured and installed photovoltaic equipment grows at the same rate. Over the years, such equipment has approached its end of life (*End-of-life, EoL*). The sustainability of photovoltaic technology is put at stake when EoL PV is highlighted since it is found with a gap all over the world. This theme needs studies and discussions, evidenced as a segment with great potential for development. In this sense, the present study aims to create, deliver and capture value to EoL FV by developing a business model. As specific objectives, this study brings to the forefront the contextualization of the Critical Success Factors (CSF) that drive competitiveness in EoL PV to fill the existing gap in EoL PV. In the background is mapping the relationship between EoL FV and its agents in the value chain. Thirdly, through statistical content analysis, opinion-taking with sector agents about the EoL FV. Finally, to propose a business model through the *Business Model Canvas* (BMC) to be successful and achieve the expected results in terms of the sustainability and competitiveness of the sector, for which the *Minimum Viable Product* (MVP) technique will be applied to the business model prototype.

Keywords: End of Life, Photovoltaic Systems, Business Model Canvas, Competitiveness.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	REFERENCIAL TEÓRICO	9
2.1	TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA E FINAL DE VIDA ÚTIL DE SISTEMAS	9
2.2	CONCEPÇÃO DE UM MODELO DE NEGÓCIOS	11
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	14
3.1	CENÁRIO	14
3.2	MÉTODO DA PESQUISA	14
3.3	ETAPAS DA PESQUISA	15
4	RESULTADOS	18
4.1	FATORES CRÍTICOS DE SUCESSO	18
4.1.1	PVF Econômico	19
4.1.1.1	Criar valor agregado ao equipamento FV inutilizado	19
4.1.1.2	Criar um segmento de mercado para o final de vida útil dos sistemas FV	20
4.1.2	PVF Soluções técnicas	21
4.1.2.1	Reparação	21
4.1.2.2	Reciclagem	22
4.1.3	PVF Normativo	23
4.1.3.1	Regulamentação específica para a destinação dos equipamentos FV	23
4.1.3.2	Realizar parceria Público-Privado	24
4.1.4	PVF Socioambiental	24
4.1.4.1	Economia Circular	25
4.1.4.2	Conscientização	26
4.2	MAPEAMENTO DA CADEIA DE VALOR DO EOL FV	27
4.3	ANÁLISE DE CONTEÚDO COM AGENTES DO SETOR	30
4.4	BUSINESS MODEL CANVAS E MINIMUM VIABLE PRODUCT	35
4.4.1	Segmento de clientes	35
4.4.2	Proposta de valor	36
4.4.3	Canais	36
4.4.4	Relacionamento com o cliente	37
4.4.5	Fontes de receita	37
4.4.6	Recursos chave	38
4.4.7	Atividades chave	38
4.4.8	Parceiros chave	38
4.4.9	Estrutura de custos	39
5	CONCLUSÃO	41
	PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS	43

REFERÊNCIAS.....	44
APÊNDICE A – ARTIGOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	49
APÊNDICE B – BUSINESS MODEL CANVAS: (RE)ENERGIA.....	52
APÊNDICE C – MINIMUM VIABLE PRODUCT: (RE)ENERGIA	53

1 INTRODUÇÃO

Nas suas mais variadas fontes, a energia é um produto essencial à vida humana. Dentre elas, a energia elétrica, que em termos de abastecimento energético é uma das formas mais propícias à sociedade, configurando-se como um recurso estratégico para o desenvolvimento de muitos países e regiões (DE ANDRADE *et al.*, 2017). O desenvolvimento econômico aproxima o cenário atual ao esgotamento dos recursos naturais. Diretamente relacionado a este desenvolvimento está o consumo de energia e a necessidade de buscar soluções sustentáveis capazes de impedir as consequências prejudiciais desse esgotamento. O uso de fontes renováveis para geração de energia elétrica é indubitavelmente necessário para suportar a demanda futura. Nesse sentido, estratégias globais de desenvolvimento tornam-se orientadas para o uso dessas fontes, pois além de serem menos nocivas ao meio ambiente, estão gradativamente apresentando-se como opções economicamente viáveis (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, 2017).

A energia solar é uma das fontes de energia mais promissora e viável para substituir os combustíveis fósseis, pois é ilimitada e não gera poluição, além de contribuir para a preservação do meio ambiente, já que diminui a utilização das usinas termelétricas, emissoras de gases causadores do efeito estufa (BAO *et al.*, 2020; SIMPSON; CLIFTON, 2017). Além dos aspectos ambientais, a energia solar aproveitada por meio da tecnologia fotovoltaica (FV) pode fornecer retornos perceptíveis sobre o investimento comparáveis aos combustíveis fósseis e podem atender às demandas de consumo mundial de energia elétrica.

Devido à sua vasta área terrestre e localização tropical, o Brasil está posicionado como um dos países com maior potencial de implantação de sistemas fotovoltaicos. Os valores de irradiação solar global incidentes no território brasileiro (1500-2500 kWh/m²), cuja maior irradiação é encontrada no norte do Estado da Bahia (6,5 kWh/m²), evidenciam o alto potencial de geração de eletricidade por meio da fonte solar (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, 2017). Nesse contexto, o país se destaca apresentando um crescimento exponencial da tecnologia FV, que de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica é empregada sob diversas classes (residencial, comercial, rural, industrial) e modalidades de geração (distribuída e centralizada) (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2022). Entretanto, concomitantemente à ascensão da tecnologia FV no país, o número de equipamentos FV sendo produzidos e instalados cresce na mesma proporção (MAHMOUDI *et*

al., 2019). A sustentabilidade da tecnologia FV é colocada em pauta quando se evidencia o final de vida útil (*End-of-Life, EoL*) do sistema FV, o qual é identificado como uma lacuna na literatura (MAHMOUDI *et al.*, 2019).

Essas reflexões iniciais remetem ao problema de pesquisa considerado neste estudo: Com o propósito de tornar a fonte solar FV de energia elétrica competitiva e sustentável em todo seu ciclo de vida, como agregar valor ao final da vida útil dos sistemas fotovoltaicos? Este trabalho tem como objetivo, portanto, criar, entregar e compartilhar valor ao EoL FV através do desenvolvimento de um modelo de negócios. Como objetivos específicos, o presente estudo traz em primeiro plano a contextualização dos Fatores Críticos de Sucesso (FCS) que impulsionam a competitividade no EoL FV, a fim de preencher a lacuna existente no EoL FV. Bem como o mapeamento do relacionamento entre o EoL FV e seus agentes na cadeia de valor. Seguido da coleta de opiniões dos agentes do setor sobre o EoL FV. Por fim, propor um modelo de negócios para obter êxito e alcançar os resultados esperados quanto à sustentabilidade e competitividade do setor.

O objetivo dessa pesquisa foi alcançado através de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) para explorar os FCSs que impulsionam a competitividade do EoL FV, seguido do uso da literatura cinzenta para mapear o relacionamento entre o EoL FV e seus agentes na cadeia de valor. Após a RSL e o estudo da literatura cinzenta, o estudo foi conduzido para uma tomada de opinião com agentes do setor para quantificar percepções acerca do EoL FV através e uma análise estatística de conteúdo. Por fim, a construção do modelo de negócios foi estabelecida através do *Business Model Canvas* (BMC) e a aplicação da técnica *Minimum Viable Product* (MPV) para a inserção do referido modelo de negócio no mercado.

Esse trabalho é justificado sob dois aspectos: a importância de agregar valor para o EoL de sistemas FV, haja vista a identificação da lacuna nessa temática, pois, pouco se sabe sobre o destino final de um sistema FV. A falta de regulamentação específica para tal é de grande responsabilidade sobre essa problemática. Em segundo plano, é necessário consolidar este nicho de mercado no segmento FV, visto que o mesmo se torna promissor quando claramente estabelecido. Para isso, o modelo de negócio escalável e bem definido é o primeiro passo para obter êxito e alcançar os resultados esperados quanto à sustentabilidade econômica, ambiental e social.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico abordado neste estudo está dividido em subseções. No primeiro momento, apresenta-se a tecnologia FV e seus modos de instalações, após é realizada a contextualização do EoL FV no Brasil e no mundo. Em sequência, são discutidos assuntos que tangem a concepção de um modelo de negócios, mais especificamente do *Bussines Model Canvas* e *Minimum Viable Product*.

2.1 TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA E FINAL DE VIDA ÚTIL DE SISTEMAS

A tecnologia FV é uma alternativa acessível para complementar a geração de eletricidade no Brasil. Devido ao seu caráter de expansão linear, essa tecnologia é empregada em diversas modalidades, podendo ser instalada em qualquer local, gerando assim, energia elétrica no próprio ponto de consumo (VILLALVA; GAZOLI, 2012). No Brasil, as usinas solares FV são instaladas sob duas possíveis categorias de geração: Geração Centralizada (GC) e a Geração Distribuída (GD). Na categoria GC as usinas costumam ter geração em larga escala e comercializadas em leilões promovidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica. Na categoria de GD, os sistemas são conectados à rede de distribuição próximos à carga, possibilitando a troca de eletricidade com a concessionária local. O potencial instalado no Brasil, até dezembro de 2022, em GC foi de 9,4 GW, e em GD foi de 16,3 GW (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2022a; AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2022b).

O relatório *End-of-life Management* (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2016) apontou que no fim do ano de 2016 eram esperados de 43,5 a 250 toneladas de resíduos provenientes dos módulos fotovoltaicos e estimou uma projeção de acúmulo de resíduos de até 8 milhões de toneladas até 2030. O peso de cada módulo é de aproximadamente 18 kg (YU; TONG, 2021).

Analisando estes números, o volume de resíduo fotovoltaico torna-se significativo para um país gerenciar. Em seu EoL, os módulos fotovoltaicos são classificados pela *Diretiva da Comunidade Europeia* como *Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos - REEE*, ou WEEE, do inglês *Waste Electrical and Electronic Equipment*. O lixo eletrônico, como o módulo FV, ainda não possui regulamentação específica no país, sendo considerado como “rejeitos

gerais” (KLEPA *et al.*, 2020). Destarte, há uma considerável ambiguidade, bem como ausência de regulamentações específicas para agilizar a coleta, recuperação e reciclagem dos resíduos solares fotovoltaicos (SHARMA *et al.*, 2021a). Assim, a maior parte dos resíduos solares é considerada como lixo eletrônico geral e despejada de maneira inadequada em aterros sanitários, como configura-se o cenário brasileiro (JAIN; SHARMA; GUPTA, 2022).

Em geral, dois segmentos de resíduos estão relacionados ao EoL FV, primário e secundário. Os resíduos primários compreendem os módulos FV. Em contrapartida, o fluxo secundário representa os componentes do sistema, como inversores, cabos, estrutura de alumínio e, em alguns casos, as baterias (OKOROIGWE *et al.*, 2020). Embora a expectativa de vida útil dos módulos FV seja entre 20 e 30 anos, quantidades significativas de resíduos prematuros também são geradas neste setor devido aos danos nos equipamentos durante o transporte, instalação e operação (MAJEWSKI *et al.*, 2021). Além disso, componentes como inversores e baterias têm uma vida útil variando entre 5 e 20 anos, o que pode levar à geração de um fluxo de resíduos numerosos em um futuro próximo. Porém, o volume de resíduos em módulos FV gerados por um sistema é ainda maior, visto que em um sistema é utilizada a proporção de apenas um inversor para uma quantidade maior de módulos FV.

Este fluxo de resíduos é motivo de preocupação pois envolve implicações para o meio ambiente e à saúde humana. Devido à presença de elementos perigosos em um sistema FV, como chumbo e cádmio, a eliminação regulamentada é necessária (CHOWDHURY *et al.*, 2020). Além dos desafios ambientais, a escassez de oferta de metais críticos como silício, germânio e lítio, usados na fabricação de painéis solares, também apresentam um desafio significativo de recursos para este setor. No entanto, estimou-se altas taxas de reciclabilidade dos materiais constituintes de energia solar FV e, que poderiam reduzir os resíduos de energia solar FV EoL em cerca de 90% (JAIN; SHARMA; GUPTA, 2022).

A gestão de resíduos de energia solar FV no EoL pode tornar-se perigosa para países que ainda não regulamentaram a destinação correta desses resíduos, exigindo uma abordagem estratégica para sua gestão. O atual ciclo de gerenciamento de resíduos solares FV segue um caminho de circuito aberto (SHARMA *et al.*, 2021a). No entanto, este setor oferece uma oportunidade para explorar o conceito '4Rs' de gestão sustentável de resíduos, ou seja, Reduzir, Reutilizar, Reciclar e Recuperar, a fim de fechar o circuito aberto e dar circularidade no ciclo de vida dos equipamentos solares FV, o qual poderá se consolidar no mercado se possuir um modelo de negócios bem definido (FARRELL *et al.*, 2020). O alto potencial de reciclabilidade

(60%–90%) dos materiais solares fotovoltaicos (SANTOS; ALONSO-GARCÍA, 2018) apresenta as possibilidades de reciclagem de resíduos fotovoltaicos, fechando o ciclo de fluxo de materiais e garantindo a circularidade neste setor (GAUTAM; SHANKAR; VRAT, 2021).

A reciclagem FV está em seu estágio inicial em todo o mundo (SHARMA *et al.*, 2021b). Sica et al 2018, explora os elementos críticos, oportunidades e limitações derivadas das opções tecnológicas, gerenciais e organizacionais disponíveis para aumentar as taxas de recuperação e reciclagem de painéis fotovoltaicos. Através de pesquisas na literatura cinzenta, é corroborada a baixa incidência de usinas de Reciclagem FV no Brasil. Diante disso, configura-se palpável que a maioria do volume de resíduos fotovoltaico produzidos no país ainda não tenha a sua destinação correta, questionando, desta forma, a sustentabilidade dessa fonte renovável de energia.

Em contrapartida, o setor está evoluindo no desenvolvimento e difusão de métodos organizacionais e tecnológicos inovadores para a gestão de resíduos. Um papel estratégico será desempenhado pela necessidade de um planejamento adequado do fim de vida de sistemas FV através da implementação de métodos adequados de recuperação e reciclagem e da adoção de tecnologias inovadoras para o tratamento de resíduos derivados do desmonte de centrais elétricas (SICA *et al.*, 2018). Juntamente ao crescente desperdício de painéis fotovoltaicos, oportunidades únicas são identificadas para criar valor, negócios locais e empregos e, portanto, novos caminhos econômicos. Assim, encontra-se uma lacuna no mercado, onde um modelo de negócios bem definido ajudará a alavancar e preencher este espaço, bem como tornar factível a criação de um novo segmento dentro da tecnologia FV capaz de suprir as lacunas relacionadas à sustentabilidade dessa tecnologia.

Neste cenário, analisando a gestão de resíduos FV no Brasil e no mundo, oportuniza-se a construção de um modelo de negócios competitivo e com isso a proposta de um novo setor de atuação e desenvolvimento dentro da energia solar FV.

2.2 CONCEPÇÃO DE UM MODELO DE NEGÓCIOS

Um modelo de negócios demonstra como uma empresa cria valor econômico, explicando os fatores associados à oferta, mercado, estratégia, capacidade interna, concorrência e investidores (RIGO *et al.*, 2022). O modelo de negócios que pode arbitrar entre inovação tecnológica e criação de valor econômico é bem-sucedido (CHESBROUGH; ROSENBLOOM,

2002). O *Business Model Canvas* (BMC) é um dos modelos utilizado e conhecido na sociedade de empreendedores. Sendo que sua principal vantagem de aplicação é o fato de ser um método conhecido e bem recebido pelo mercado. Nove componentes constituem o BMC e o seu desenvolvimento deve seguir a sequência dos componentes, sendo eles: segmento de cliente, proposta de valor, canais, relacionamento com o cliente, fontes de receita, recursos chave, atividades chave, parceiros chaves e estrutura de custos. A Figura 1 descreve como funciona o processo de pensamento para seu desenvolvimento. As nove seções do BMC representam um cenário interativo e de relacionamento, explicitando as trocas entre os diferentes atores e ambientes.

Figura 1 – Seções que compõem o BMC

Componente BMC	Perguntas que fundamentam um BMC
Segmento de clientes	Para quem estamos criando valor? Quem são nossos consumidores mais importantes?
Proposta de valor	Que valor entregamos ao cliente? Qual problema estamos ajudando a resolver? Quais necessidades estamos ajudando a entender? Que conjunto de produtos e serviços estamos oferecendo para cada segmento de cliente?
Canais	Por quais canais nossos segmentos de clientes desejam ser contatados? Como podemos alcançá-los? Como nossos canais se integram? Qual deles funciona melhor? Quais são os mais rentáveis? Como eles são integrados à rotina dos clientes?
Relações com o consumidor	Que tipo de relacionamento cada um de nossos segmentos de clientes espera que estabeleçamos com eles? Quais já estabelecemos? Quanto custa cada um? Como eles se integram ao restante do nosso modelo de negócios?
Fluxo de receita	Quais valores nossos clientes estão realmente dispostos a pagar? O que eles pagam atualmente? Como eles preferem pagar? Quanto cada fonte de receita contribui para a receita total?
Recursos chave	Quais recursos-chave nossa proposta de valor exige?
Atividades chave	Quais atividades-chave nossa proposta de valor exige?
Parceiros chave	Quem são nossos principais parceiros? Quem são nossos principais fornecedores? Quais recursos-chave estamos recebendo dos parceiros? Quais atividades-chave os parceiros realizam?
Estrutura de custos	Quais são os custos mais importantes em nosso modelo de negócio? Quais recursos principais são mais caros? Quais atividades-chave são mais caras?

Fonte: Adaptado de DORNELAS (2020)

Para o desenvolvimento ideal de um novo produto no mercado ao qual este está inserido, o mesmo precisa ser testado. Uma das metodologias existentes para essa testagem é o *Minimum Viable Product* (MVP). O MVP é uma estratégia de avanço na qual um novo produto ou serviço é criado com recursos suficientes para sua inserção no mercado e atender o primeiro cliente (AGHNIA; LARSO, 2018). Como o nome sugere, o MVP deve ser mínimo a custo, mas ainda

viável para o mercado. A metodologia do MVP é aplicada ao o modelo de negócios, uma vez que um negócio precisa ser desenvolvido com o mínimo de esforço para atender aos objetivos do negócio (TRIPATHI *et al.*, 2019).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia abordada neste estudo está dividida em subseções. Em primeiro plano, é feita a discussão do cenário da pesquisa. Em segundo plano é apresentado o método da pesquisa. Posto isso, as etapas da pesquisa são expostas. As subseções estão esclarecidas na sequência.

3.1 CENÁRIO

O cenário desta pesquisa aplica-se a todos os clientes finais que possuem unidades distribuídas ou centralizadas de geração de energia solar por meio da tecnologia FV, os quais terão que se desfazer de seu sistema após o final de vida útil do mesmo. Até dezembro de 2022 no Brasil, este número é de 16.396 unidades instaladas para Geração Centralizada (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2022a). Para a Geração Distribuída, o número é de 1.567.915 unidades instaladas (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2022b). A população representada para esta pesquisa, se dá pelo número de instalações tanto para GC quanto para GD. Ressalta-se que este número cresce exponencialmente desde 2012 no Brasil, com estimativas de continuar com a taxa crescente para os próximos anos, conforme o Plano Decenal de Expansão de Energia para 2030 realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021).

3.2 MÉTODO DA PESQUISA

O presente estudo classifica-se quanto a natureza como aplicada. A pesquisa de natureza aplicada busca compreender problemas elencados no cenário de vivência do pesquisador, e fornecem informações que acrescentam conhecimento científico à sociedade (GIL, 2010). No contexto da abordagem, esta tem como característica empregar a qualificação e quantificação, ou seja, denota uma abordagem qualitativa e quantitativa, pois desenvolve conceitos de forma subjetiva, e os mesmo são transformados em dados numéricos, passando para uma análise objetiva.

No que tangem os objetivos, esta pesquisa enquadra-se como exploratória e descritiva. Exploratória, pois cumpre trazer proximidade com o tema e problema estudado para que o torne

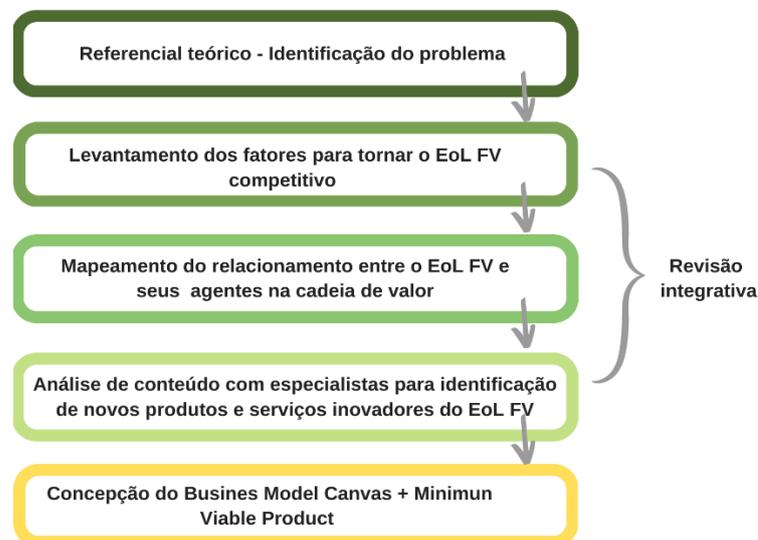
explícito ou para definir hipóteses (MATIAS-PEREIRA, 2016). Descritiva, porque proporciona descrever as características de determinada população ou o estabelecimento de relações entre fatores e característica e, para isso, envolve o uso de técnicas padronizadas de coleta de dados, para validação do conteúdo como questionários.

Por conseguinte, no que se refere aos procedimentos técnicos, a pesquisa fez o uso de cinco procedimentos. Nesse contexto, o primeiro plano é a pesquisa bibliográfica, a qual consiste no levantamento de referências publicadas em artigos científicos, livros, dissertações de mestrado e teses de doutorado (MARCONI; LAKATOS, 2017). Para o desenvolvimento de fatores críticos de sucesso, foi feita a RSL, por proporcionar uma visão abrangente e robusta do tema estudado (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JÚNIOR, 2014). A exploração da literatura cinzenta foi realizada para obter informações as quais não se encontram na literatura, como informações específicas do setor e dados atuais de empresas. Após, será feita a análise estatística de conteúdo, a qual visa quantificar percepções acerca do EoL FV. Por fim, fez-se o uso da metodologia BMC para arquitetar o modelo de negócios focado no EoL FV e a sua validação através do MVP.

3.3 ETAPAS DA PESQUISA

Para compreender os principais aspectos abordados e alcançar o objetivo proposto, o procedimento metodológico foi conduzido em quatro etapas, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Representação esquemática das etapas da pesquisa



Fonte: Autora (2022).

Para o cumprimento das primeira etapa, referente a construção do referencial teórico desta pesquisa, foi utilizado o Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes/MEC), consulta em livros, artigos publicados em anais de eventos e Notas Técnicas referentes à energia solar FV, com a finalidade de buscar embasamento teórico para a identificação do contexto dos sistemas solares instalados no Brasil, bem como entender o funcionamento da fase EoL no país.

Para a realização da segunda etapa, o protocolo de RSL compreendeu à exploração de estudos científicos sobre o EoL ao redor do mundo. O ponto de partida da RSL foi o desenvolvimento da questão de pesquisa: Quais os fatores para tornar o EoL competitivos? Para isso, duas bases de artigos científicos foram selecionadas: *SCOPUS* e *Web of Science*. As leituras iniciais permitiram selecionar as palavras-chave que resultaram na seguinte frase de pesquisa: TITLE-ABS-KEY (("Solar PV" OR "Photovoltaic") AND ("End of Life" OR "End of Use")). A estratégia de busca empregada nas bases de dados compreendeu os metadados "Título", "Resumo" e "Palavras-chave", com a restrição de tipo de documento, o qual foi selecionado apenas artigos; bem como o filtro de tempo, restringindo aos últimos cinco anos e apenas publicações em inglês. A frase de pesquisa submetida nas duas bases de artigos resultou em 210 títulos, destes foram removidos os duplicados. Assim, foi aplicado um filtro, o qual consistiu na leitura dos títulos e resumos de todos os artigos para separar os que tinham potencial para apresentar alguma lacuna que poderia ser desenvolvida em possível fator crítico de sucesso encontrado no EoL FV, para isso, respondeu-se às seguintes questões de filtragem: O artigo aborda energia renovável/sustentável/limpa ou, mais especificamente, energia solar fotovoltaica? (sim/não); O artigo aborda algum fator, lacuna ou barreira ao tratar do EoL FV? (sim/não). Se pelo menos uma das respostas a essas questões foi "Não", o artigo foi excluído da amostra. Este processo resultou em 114 artigos. Deste modo, a segunda filtragem foi realizada, os artigos oriundos do filtro foram analisados com o intuito de extrair fatores críticos de sucesso que auxiliarão na construção do modelo de negócios, resultando em 33 artigos que apresentaram em um ou mais fatores para tornar o EoL FV competitivo.

A etapa sucessora é composta pelo levantamento de dados da literatura cinzenta, a qual corresponde à investigação de informações sobre o setor, como estudos de empresa de pesquisa e consultoria Greener (GREENER, 2022a), estatísticas da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022), e dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2022b). A pesquisa em catálogos de instaladores fotovoltaicos online

e sites de recicladoras FVs ao redor do mundo nos permitiu entender as características atuais do relacionamento entre o EoL e seus agentes na cadeia de valor.

A sequência deu-se com a coleta de opiniões acerca do EoL FV. Para esta etapa foi considerada a opinião de agentes do setor, como consumidores com sistema de geração em operação, empresários do setor e pesquisadores, através da análise estatística de conteúdo, a qual consiste em um método estatístico para validação de ideias predominantes. Assim, após a conclusão dessas três etapas, a revisão integrativa foi finalizada, a qual é definida como um método que proporciona a síntese de conhecimento e a aplicabilidade de resultados de estudos significativos na prática. Normalmente, a revisão integrativa é a mais ampla abordagem metodológica referente às revisões, permitindo a inclusão de estudos experimentais e não-experimentais para a compreensão completa do fenômeno analisado (SOUZA, M. T. De; SILVA; CARVALHO, 2010).

Por fim, após a quantificação da análise de ideias dos especialistas, a solução predominante e vista com maior potencial de inovação foi a essência da construção do BMC, e então a última etapa pôde ser elaborada. Portanto, o estudo é concluído através da construção e discussão do modelo de negócios para a competitividade no mercado EoL FV, devidamente explicado e arquitetado conforme proposto pelo BMC e assim a técnica do MVP foi aplicada sobre o modelo de negócios.

4 RESULTADOS

Nessa seção é apresentada a sequência de procedimentos executados e o detalhamento de cada uma das partes para concepção do modelo de negócio. Os resultados encontram-se divididos em subseções. Primeiramente, os Fatores Críticos de Sucesso são esclarecidos e justificados como impulsores da competitividade no EoL FV. Após, é realizado o mapeamento do EoL FV e seus principais agentes na cadeia de valor. Em terceiro, a análise estatística de conteúdo com os especialistas da área para quantificar percepções dos agentes do setor acerca do EoL FV é argumentado. Por fim, a concepção do *Business Model Canvas* (BMC) e a aplicação do *Minimum Viable Product* (MVP) sobre o modelo de negócios.

4.1 FATORES CRÍTICOS DE SUCESSO

O levantamento dos Fatores Críticos de Sucesso foi feito através da RSL. Fundamentalmente, as leituras dos materiais científicos e documentais evidenciaram alguns pontos como os principais entraves para a consolidação de um mercado FV voltado para o EoL FV, os quais podem ser explorados a fim de garantir a competitividade e consequente circularidade do setor, bem como preencher a lacuna encontrada no mesmo. Neste sentido, foram encontrados os Fatores Críticos de Sucesso (FCS) e os mesmos foram agrupados em quatro Pontos de Vista Fundamentais (PVFS), sendo eles: Econômico, Soluções Técnicas, Normativo e Socioambiental. O Quadro 1 apresenta a esquematização dos FCSs e seus PVFs. A sistematização dos autores que as justificam está anexada no Apêndice A.

Quadro 1 – Fatores Críticos de Sucesso e seus Pontos de Vista Fundamentais.

Ponto de Vista Fundamental (PVF)	Fator Crítico de Sucesso (FCS)
Econômico	Criar valor agregado ao equipamento FV inutilizado
	Criar um segmento de mercado para o final de vida útil dos sistemas FV
Soluções Técnicas	Reparação
	Reciclagem
Normativo	Regulamentação específica para a destinação dos equipamentos FV
	Realizar parceria Público-Privado
Socioambiental	Economia Circular
	Conscientização

Fonte: Autora (2022).

4.1.1 PVF Econômico

Ao apresentar as projeções de crescimento do uso de sistemas FV para geração de energia elétrica faz-se necessário expor medidas preventivas e definir um roteiro para garantir o uso adequado da tecnologia FV, principalmente no âmbito da projeção de produção de resíduos. As medidas preventivas ajudarão a aumentar a acessibilidade à eletricidade, sem causar maiores impactos negativos no futuro quando os equipamentos atingirem o EoL. O mapeamento do ciclo de vida dos equipamentos FV possibilita a criação de valor econômico e ambiental e a geração de oportunidades nas cadeias produtivas ao garantir que o desenvolvimento de produtos se ajuste aos ciclos naturais, buscando a minimização das externalidades negativas dos processos produtivos (OLIVEIRA; FRANÇA; RANGEL, 2018). O viés econômico deve ser explorado detalhadamente, pois são as perspectivas de ganhos financeiros futuros advindos do EoL dos equipamentos FV que podem tornar essa atividade duradoura e abrangente à nível nacional. Ainda, os possíveis modelos de negócios de EoL de equipamentos FV deverão apresentar-se economicamente viáveis para que uma cadeia de logística reversa de sucesso seja implementada no Brasil. Uma avaliação econômica é importante para simular situações em que, embora a temática promova impacto positivo socioambiental, os custos podem inviabilizar tais iniciativas. Este PVF divide-se em dois FCSs: Criar valor agregado ao equipamento FV inutilizado e Criar um segmento de mercado para o final de vida útil dos sistemas FV, os quais, serão discutidos na sequência.

4.1.1.1 Criar valor agregado ao equipamento FV inutilizado

O crescente desperdício de módulos fotovoltaicos apresenta oportunidades únicas para criar valor (SICA *et al.*, 2018). Uma das principais ações para uma estratégia bem sucedida de criação de valor para a EoL FV é a estruturação de uma cadeia de valor para os stakeholders. Empregar um processo de identificação de stakeholders garante que todos os órgãos relevantes sejam envolvidos (LEDOUX *et al.*, 2005). Sabe-se que criação de valor é a percepção de um benefício que vai além das finalidades da mercadoria ou do serviço adquirido pelo consumidor. Isto é, a possibilidade de oficinas de discussão da cadeia de valor dos equipamentos, sob a ótica de uma análise concentrada na geração de valor para o público-alvo, como consumidores, integradores, distribuidores e fabricantes, pode resultar em insights para o ganho de

competitividade do setor. Em outra perspectiva, é importante salientar o valor que os metais críticos constituintes dos módulos agregam, através do consumo competitivo e escassez de oferta dos mesmos, como o silício, germânio e lítio, usados para fabricação de módulos fotovoltaicos e a dependência significativa das importações de prata usada nos painéis solares são desafios importantes para a indústria solar e justifica o valor agregado ao módulo (JAIN; SHARMA; GUPTA, 2022). Segundo o (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2016) as matérias-primas reutilizadas podem possuir um valor agregado de até 450 milhões de dólares até 2030, desenvolvendo novas indústrias e empregos no setor fotovoltaico.

4.1.1.2 Criar um segmento de mercado para o final de vida útil dos sistemas FV

O final de vida útil dos módulos FV não deve ser considerado apenas como o processo de disposição final, dado que o EoL também é uma oportunidade de criar e capturar valor (KADRO; HAGFELDT, 2017). Uma abordagem colaborativa entre a comunidade empresarial, formuladores de políticas, instituições e fabricantes no intuito de abraçar a sustentabilidade como um imperativo de negócios, adotando modelos que criem valor compartilhado e impulsionem mudanças sistêmicas em direção aos objetivos da economia circular são essenciais para a consolidação desse segmento de mercado (SICA *et al.*, 2018). Inúmeras são as novas oportunidades de negócios que podem ser criadas a partir do EoL, como uma startup que conecte o público-alvo diretamente ao processo de reciclagem, gerando, assim, valor para ambas as partes e sendo o elo que os une. A criação de serviços logísticos especializados para a coleta de módulos, o transporte seguro e apropriado, avaliação das condições de operação e armazenamento, a criação de uma plataforma de comunicação e emissão de certificados de destinação são bons exemplos de oportunidades de mercado a serem explorados no âmbito do EoL. O desenvolvimento de um modelo de negócio para o EoL FV é uma oportunidade de geração de novos empregos no processo de desmontagem de dispositivos e tratamentos de materiais, bem como a criação de uma oportunidade de negócio para tratamento especializado de resíduos perigosos e sua disposição final. Através da implementação do modelo de negócio circular, a consciência ambiental dos consumidores pode ser aprimorada ao permitir informações qualificadas acerca de como os produtos EoL devem ser desinstalados e devolvidos (SALIM *et al.*, 2019). Isto não apenas garantirá uma taxa de retorno ou cobrança mais alta, mas também reduzirá o custo de coleta (KALMYKOVA; SADAGOPAN; ROSADO,

2018). Neste contexto, o presente estudo cumpre explorar a fundo esse FCS, através da concepção dos modelos de negócios voltado ao EoL, oportunizando um novo negócio nesse segmento.

4.1.2 PVF Soluções técnicas

Este PVF é justificado por Sirisawat e Kiatcharoenpol (2018), o qual traz em seu estudo as barreiras tecnológicas, incluindo a falta de sistemas de informação para o EoL FV, a falta de infraestrutura tecnológica disponível para adoção de práticas de reciclagem e a falta de conhecimento técnico para apoiar estas práticas. É essencial o desenvolvimento de soluções técnicas para impedir que os resíduos fotovoltaicos desenvolvam problemas ambientais como: lixiviação de chumbo, de cádmio, perda de recursos recuperáveis, como 1 milhão de toneladas de Al, 0,3 milhão de toneladas de silício, 7,4 milhões de toneladas de vidro e perda de metais raros recuperáveis como prata, índio, gálio e germânio (XU *et al.*, 2018). Xu et al (2018), também traz em seu estudo diversas formas técnicas de separação dos módulos e extração dos principais metais, bem como métodos de reparação dos componentes. Um cenário otimista é considerado através do estudo de (SICA *et al.*, 2018), o qual mostra que a P&D do setor está focada na economia de material e eficiência do módulo, isto levará à uma redução no uso de materiais por unidade de energia e no uso de substâncias potencialmente perigosas. Este PVF divide-se em reparação e reciclagem, os quais, serão expostos na sequência.

4.1.2.1 Reparação

Para a opção de reparo, os painéis que não estão em condições operacionais devem ser avaliados para definir a falha e identificar se ela pode ser corrigida. A substituição de componentes tem o objetivo de revisar os sistemas e evitar a falha elétrica dos grupos de placas, mas não envolve a separação de componentes ou a reciclagem de materiais (XU *et al.*, 2018). Com base na (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2016) 19% das falhas apresentadas por módulos solares fotovoltaicos correspondem aos cabos, que eventualmente podem ser substituídos no local de utilização. O serviço especializado na reparação dos componentes do sistema FV é de suma importância para que outros tipos de falhas possam ser resolvidas sem que todo o sistema seja indevidamente descartado. Este FCS deve ser associado

às boas práticas de operação e manutenção (O&M) de usinas, como a avaliação de indicadores de desempenho da produção de energia pelos equipamentos do sistema (REDISKE *et al.*, 2022).

4.1.2.2 Reciclagem

A questão desafiadora da reciclagem é justificar os custos deste processo com os possíveis ganhos, para então, tornar a indústria de reciclagem de usinas FV atrativas para investidores. Para isto, a automatização do processo de separação dos materiais, bem como a avaliação do valor de mercado de tais materiais deve ser estudada. Os componentes são todos altamente recicláveis em células de silício, com recuperação aproximada de 96% para silício, vidro, alumínio e outros componentes metálicos (DALJIT SINGH *et al.*, 2021). Ainda que o ganho econômico seja necessário para a durabilidade da atividade, é importante ressaltar o ganho ambiental, como Cucchiella, D'Adamo e Rosa (2015), que verificaram em sua pesquisa que a reciclagem de 185 toneladas de módulos fotovoltaicos com capacidade instalada de 2,46 MW permite uma economia de cerca de 1.480–2.220 toneladas de CO₂ equivalente. De acordo com (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2016), o acumulado de resíduos de módulos até 2030 é capaz de produzir 60 milhões de novos módulos. Do ponto de vista da redução das emissões de carbono pela reciclagem, foi demonstrado que as emissões de carbono da produção de Al reciclado chegam a apenas 4,16% das emissões para a mesma quantidade de Al produzida a partir de minerais naturais (DING *et al.*, 2012). Xu et al (2018) exemplifica em seu estudo o potencial significativo de redução de emissões de carbono quando a coleta, transporte e reciclagem de resíduos de módulos fotovoltaicos forem efetivamente organizados. Outro aspecto importante digno de análise, é o fato do Brasil figurar como um dos líderes mundiais na produção de silício grau metalúrgico (DE SOUZA, L. E. V.; CAVALCANTE, 2016), principal componente dos módulos FV. O país também representa um dos principais exportadores de silício para a Europa (BARTIE *et al.*, 2021), sendo assim, é importante pensar também na exploração cada vez mais avançada do silício no meio ambiente, o que poderá trazer a escassez do mesmo no Brasil. Desta forma, investir em soluções técnicas reduzirá a extração de silício do meio ambiente através da extração do mesmo nos próprios módulos FV em seu EoL.

4.1.3 PVF Normativo

O PVF Normativo é justificado por (SIRISAWAT; KIATCHAROENPOL, 2018), o qual, traz em seu estudo como barreira legal ao desenvolvimento de mercado do EoL FV, a falta de regulamentação específica e políticas governamentais. Uma estratégia eficaz de gestão de fim de vida pode assumir a forma de um esquema de gestão do produto, princípio de responsabilidade estendida do produtor (EPR) ou abordagem voluntária liderada pela indústria para processos de coleta e recuperação (NICOL; THOMPSON, 2007). Porém, no Brasil, a falta de interesse do poder público em novas políticas que incentivem a sustentabilidade na cadeia tecnológica, faz com que este resíduo não seja devidamente preocupante para a sua cadeia. Este PVF divide-se em dois FCSs, Regulamentação específica e Parceria público-privada, os quais, serão discutidos na sequência.

4.1.3.1 Regulamentação específica para a destinação dos equipamentos FV

Em relação ao FCS regulamentação específica, destaca-se que as usinas FV precisam da adoção de uma regulamentação eficaz de resíduos, visando expandir sua infraestrutura de EoL com a inovação necessária à gestão de resíduos. Em geral, a maioria dos países considera os resíduos de módulos FV, como “resíduos gerais”, porém, a União Europeia (UE) foi a primeira a adotar regulamentos para os resíduos oriundos de sistemas solares fotovoltaicos, que incluem coleta, recuperação e reciclagem específicas para resíduos FV (NDZIBAH; ANDREA PINILLA-DE LA CRUZ; SHAMSUZZOHA, 2022). A diretiva de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos de 2012 – WEEE exige dos fabricantes que fornecem para a EU, o financiamento dos custos de coleta e reciclagem dos módulos implementados em seu território. Além disto, todos os fabricantes de painéis fotovoltaicos que fornecem componentes para o mercado europeu devem pagar uma taxa de reciclagem (XU *et al.*, 2018). Em alternativa, a aplicação de multa para a destinação incorreta desses resíduos mostra-se como uma solução possível, visto que a preocupação econômica pode ser mais importante do que a ambiental pelo público-alvo, como consumidores, integradores e fabricantes (XU *et al.*, 2018). A estruturação de lei para a Responsabilidade Estendida do Produtor (REP) terá um impacto no controle do lixo eletrônico, pois assim os produtores desenvolveriam seus produtos e os projetariam de forma a facilitar seu processo de reciclagem e reutilização, bem como utilizariam menos materiais e pensariam em

prolongar a vida útil de seus produtos (KHAWAJA; GHAITH; ALKHALIDI, 2021). Além disso, a inovação da tecnologia de reciclagem evoluiria.

4.1.3.2 Realizar parceria Público-Privado

Parcerias podem desempenhar um papel relevante na consecução de materiais normativos com base na sinergia e complementaridade dos recursos, e competências do poder público e privado, setores que buscam avançar na transição energética (SAMBRANI, 2014). Em particular, parcerias público-privado (PPPs) entre governos, indústrias, universidades e grupos sociais podem ajudar a realizar ações que viabilizem projetos envolvendo a conscientização e até mesmo a criação de um negócio que busque tratar o EoL FV de forma competitiva. Ademais, em relação aos retornos do setor privado da PPP, os riscos e as responsabilidades seriam compartilhados com o governo, por isso seria mais desejável investir nestes projetos (KHAWAJA; GHAITH; ALKHALIDI, 2021). Essencialmente, os grupos de interessados relevantes para o setor incluem governo, pesquisadores, recicladores, distribuidores, ONGs e fabricantes, os quais, possuem alto nível de interesse em promover a implementação da gestão EoL FV. Particularmente recicladores, fabricantes, ONGs, consultores e governos, pois eles acreditam que a questão tem um impacto potencial em sua organização, seja ambiental, social ou economicamente (SALIM *et al.*, 2019). Além disso, Salim traz em sua pesquisa que recicladores, ONGs, governos e instituições de pesquisa e/ou educação afirmam ter uma grande influência na elaboração de políticas ou na tomada de decisões para o gerenciamento do EoL FV. De outra banda, distribuidores e/ou instaladores afirmam ter o menor interesse e influência em comparação com os outros grupos de interessados.

4.1.4 PVF Socioambiental

As atividades que envolvem o EoL de um produto devem ter como premissa o respeito ao meio ambiente. A responsabilidade socioambiental ocorre quando todos participantes da cadeia de valor são efetivamente responsáveis pela preservação ambiental. Para os sistemas FV, a responsabilidade deve partir dos consumidores, integradores, distribuidores, fabricantes e governantes, os quais, possuem relacionamento com o EoL FV. O artifício mais eficiente para

e elevar a responsabilidade socioambiental de qualquer sociedade está na educação. A educação e a formação são um fator fundamental na construção de um sistema sustentável para o gerenciamento adequado do EoL FV (NDZIBAH; ANDREA PINILLA-DE LA CRUZ; SHAMSUZZOHA, 2022). As partes interessadas relataram a falta de lucratividade, indisponibilidade de regulamentos e incentivos, bem como a falta de conscientização sobre opções de descarte seguro, como sendo as barreiras mais significativas no EoL FV (SALIM *et al.*, 2019). A falta geral de conscientização sobre a importância da recuperação de materiais, além da falta de participação na reciclagem, que prevalece nos sistemas fotovoltaicos, atuam como ônus impeditivos para que a cadeia de suprimentos FV mude para uma forma circular (TANSKANEN, 2013). É possível vislumbrar a segunda vida de módulos fotovoltaicos através da reutilização destes em locais estratégicos, como em comunidades estruturalmente carentes e na iluminação pública, contribuindo socialmente através de programas públicos como Luz para Todos e ONGs (REPORTAGEM PORTAL SOLAR). Esse PVF divide-se em dois FCSs, Economia Circular e Conscientização, os quais, serão discutidos na sequência.

4.1.4.1 Economia Circular

A economia circular é um novo modelo de desenvolvimento sustentável, bem como um instrumento de proteção ambiental (WATTS, 2017), e é recomendada como uma abordagem de crescimento econômico alinhada com o desenvolvimento socioambiental sustentável (OLIVEIRA; FRANÇA; RANGEL, 2018). A Comissão Europeia estimou que as transações econômicas associadas à economia circular podem gerar ganhos econômicos anuais de 600 bilhões de euros apenas para o setor manufatureiro da União Europeia (OLIVEIRA; FRANÇA; RANGEL, 2018). O primeiro passo para qualquer caminho circular é a coleta. Se os resíduos não forem coletados no EoL, eles são considerados aterrados (OVAITT *et al.*, 2022). Se recolhidos, podem ser reutilizados, reparados ou reciclados, e, assim, agregar valor ao produto descartado. Retornar os resíduos para onde eles foram fabricados é uma forma de sustentabilidade, porém no Brasil este termo ainda é pouco conhecido e adotado pelos consumidores. A economia circular da tecnologia FV deve ser impulsionada pelo planejamento estratégico empresarial no intuito de capacitar a recuperação mais eficaz de material (KHAWAJA; GHATH; ALKHALIDI, 2021). Diante disto, o que geralmente é classificado como resíduo pode ser visto como um recurso potencial que pode ser usado como matéria-

prima, componente ou fonte de energia, seja dentro do mesmo processo ou em outra cadeia de abastecimento. O EoL FV está inserido em um cenário otimista no que diz respeito à reciclagem dos componentes, podendo fechar o ciclo atualmente aberto e garantir a circularidade do setor (GAUTAM; SHANKAR; VRAT, 2021). Para tanto, existem duas perspectivas complementares para a implementação de práticas de economia circular: uma baseada na adoção de estratégias que melhorem a circularidade dos recursos e outra baseada no desenvolvimento de novos modelos de negócios (JABBOUR *et al.*, 2012).

4.1.4.2 Conscientização

A conscientização das partes envolvidas em um sistema FV é fundamental para que a sustentabilidade do EoL FV seja efetiva. Por isso, é importante que os mesmos tenham informações necessárias sobre os materiais perigosos, potenciais poluentes do meio ambiente e prejudiciais à saúde humana, bem como, acerca do volume de resíduo acumulado que virá a ser um problema ambiental para os próximos anos. A conscientização pode levar à diminuição dos impactos ambientais e de saúde associados aos resíduos FV, assim como a conformidade com as normas internacionais na gestão de resíduos solares fotovoltaicos e aumento da eficiência no uso de recursos na melhoria da tecnologia solar FV (NDZIBAH; ANDREA PINILLA-DE LA CRUZ; SHAMSUZZOHA, 2022). Porém, muitos consumidores e fabricantes preferem descartar equipamentos fotovoltaicos obsoletos em vez de buscar seu caminho reverso, pois acreditam que descartá-los seria uma opção mais barata, enfatizando a falta de conscientização de consumidores e produtores sobre a importância da recuperação de materiais e da cadeia de suprimentos do sistema fotovoltaico correlacionada à economia circular (BESIOU; VAN WASSENHOVE, 2016). Um cenário otimista é visto através dos estudos de (GASTALDO *et al.*, 2019), os quais, apontam que grande parte dos investidores brasileiros em tecnologia FV – pessoas que instalam sistemas em suas residências, comércios e indústrias – possui um perfil ecocêntrico voltado ao bom relacionamento com a natureza. Isto significa que estas pessoas se preocupam com as próximas gerações e com o meio ambiente. Esta constatação é animadora para o EoL, uma vez que a população que adquiriu sistemas fotovoltaicos possui inclinação a ter boas práticas sustentáveis. Estas pessoas estão no início da cadeia de logística reversa, e irão atuar “empurrando” os sistemas FV para o seu próximo destino. Ademais, poderão ser uma peça chave na busca por soluções antes dos problemas relacionados ao EoL FV surgirem.

4.2 MAPEAMENTO DA CADEIA DE VALOR DO EOL FV

A presente subseção utilizou-se do levantamento de dados na literatura cinzenta, coletados em empresas de pesquisa, catálogos e websites de instaladores FVs, empresas recicladoras de sistemas FVs nacionais e internacionais, e também, estudos na literatura internacional, com o intuito de investigar informações sobre o setor e entender as características atuais do relacionamento entre o EoL e seus agentes na cadeia de valor. Observar as interações entre os diferentes atores na cadeia de valor é crucial para verificar de que forma criam e transferem conhecimento, bem como de qual maneira fazem negócios para ampliar a adoção e difusão de um segmento (JUNTUNEN; HYYSAALO, 2015). O mapeamento da cadeia de valor facilita o esclarecimento dos aspectos que podem representar vantagens competitivas aos diferentes atores envolvidos na cadeia.

No estudo de (GARLET *et al.*, 2020) a cadeia de valor FV é classificada essencialmente em *upstream*, *midstream*, *downstream* e cadeia de valor auxiliar, as quais, englobam todas as atividades realizadas por diferentes atores desde a produção dos materiais necessários para a instalação do sistema fotovoltaico até à entrega aos consumidores finais, sua posterior desativação e descarte em seu final de vida útil.

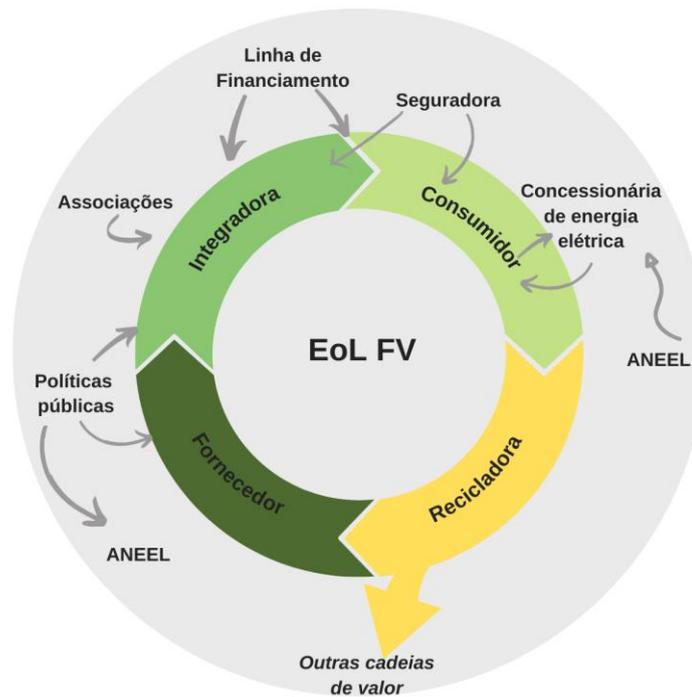
A cadeia *upstream* contempla as etapas anteriores à fabricação do módulo FV, a produção das matérias primas da parte estrutural do módulo FV e a fabricação de materiais presentes nos componentes necessários ao balanceamento do sistema fotovoltaico. O setor *midstream* constitui a parte central da cadeia de valor e engloba a produção da célula FV, caixa de junção, moldura, cabos elétricos, *backsheet*, filme encapsulante, vidro especial fotovoltaico, silicone de vedação e módulo fotovoltaico. Ainda, são fabricados os componentes para balanceamento do sistema fotovoltaico, como inversores, estruturas de fixação, dispositivos de instalação para os lados de corrente contínua e alternada e medidor. Por sua vez, o setor de *downstream*, abrange as atividades mais diretamente ligadas ao consumidor final, como a integração do sistema fotovoltaico, composta pelo desenvolvimento do projeto, instalação do sistema fotovoltaico e conexão à rede. Ademais, engloba a operação e manutenção do sistema FV, a desativação do sistema, a disposição de resíduos e a reciclagem de materiais. Na cadeia de valor auxiliar, são identificadas as atividades essenciais que suportam a estrutura principal e permitem a interação de empresas, instituições acadêmicas e governo para troca de

conhecimento técnico e informações de mercado, permitindo que o setor fotovoltaico se posicione de forma competitiva diante da concorrência.

Nesse cenário, o EoL FV, principal segmento em questão nesse estudo, está inserido no contexto do *downstream*. Entretanto, todas as atividades anteriores, como o *upstream*, *midstream*, bem como posterior a ele, como a cadeia de valor auxiliar, possuem relação com o EoL FV, pois a interação entre as partes e atores são influenciadas mutuamente, tendo em vista a relação de dependência entre eles. A Figura 3 esquematiza a cadeia como um ciclo, em que o EoL atende novamente o *upstream* ou outras cadeias.

Destaca-se que classificação teórica discutida acima, traça um caminho linear dentro do segmento FV. Em contrapartida, o EoL FV é capaz modificar tal cenário, explorando o conceito *reverse stream*, com o propósito de fechar o atual circuito aberto e trazer a circularidade para o setor. A proposição do conceito *reverse stream* pode ser visualizado Figura 3.

Figura 3 – Relacionamento entre EoL FV e os agentes da cadeia de valor em uma reverse stream



Fonte: Autora (2022).

Os atores em contato direto com o EoL FV são os consumidores e empresas recicladoras, responsáveis por dar segunda vida ao sistema FV. Os consumidores são considerados os clientes finais, localizados no extremo da cadeia de valor, e são os principais envolvidos na destinação final dos sistemas FV. Eles possuem uma relação direta com as

empresas integradoras, as quais, atendem, instalam e prestam o serviço de manutenção aos sistemas fotovoltaicos. As empresas recicladoras podem ser vistas como o elo principal para a efetivação da segunda vida de equipamentos FV, assim como pela conscientização dos consumidores finais. De outra banda, as empresas integradoras estão envolvidas diretamente com os fabricantes e fornecedores dos equipamentos que compõem o sistema FV.

As empresas recicladoras FV usualmente já reciclam algum outro resíduo eletrônico, ou são voltadas apenas para o setor FV. Os componentes secundários dos sistemas, como inversores, cabos e estruturas de fixação estão inseridos na cadeia de reciclagem, pois podem ser facilmente reaproveitados em recicladoras de equipamentos eletrônicos e metais. Por sua vez, os componentes primários dos sistemas, como os módulos, detêm diferentes critérios para a sua reciclagem, devido a presença de elementos perigosos e críticos, como chumbo, cádmio, silício, germânio e lítio. Estas substâncias requerem uma reciclagem específica, uma vez que se faz necessária a separação desses componentes para possibilitar sua reinserção na cadeia produtiva.

Uma estratégia importante nesse segmento pode ser traçada através da concretização de um canal entre o consumidor final e as empresas recicladoras, visando ser o principal caminho para que os consumidores realizem a correta destinação de seus sistemas em desuso, para a reinserção em segunda vida destes ou o seu descomissionamento para reutilização e reciclagem de componentes. Neste sentido, outro aspecto relevante é a atuação de grupos e instituições de pesquisa, como o *Grupo Fotovoltaico UFSC* (REPORTAGEM PORTAL SOLAR), responsável por estudar a segunda vida dos sistemas FV e reinseri-los em comunidades por intermédio de programas sociais como o Programa Luz para Todos, promovendo, desta forma, a circularidade do setor e contribuindo com avanços socioambientais. Outrossim, a prática de economia circular alinha-se aos requisitos do ESG – *Environmental, Social and Corporate Governance*, e demonstra ser uma possível alternativa para os desafios do EoL FV.

Por outra perspectiva, outro fator de grande influência no EoL FV é o papel desempenhado pelas seguradoras de sistemas fotovoltaicos, responsáveis pela proteção dos sistemas FV e reposição de equipamentos danificados. Todavia, muitas destas empresas não se responsabilizam pelo descarte de equipamentos inutilizados, ficando este por conta do segurado. Neste sentido, em usinas de larga escala seguradas, volumes consideráveis de equipamentos novos são danificados durante o transporte e instalação, os quais, ficam sem um

destino final adequado, vale destacar que estes resíduos prematuros possuem grande potencial para serem reparados e reinseridos no mercado, ou em outras cadeias de valor.

Frisa-se, também, a função exercida pelas financiadoras de sistemas FV, como a *Sol Fácil*, já que a inadimplência do consumidor ocasiona o recolhimento de seu sistema FV, os quais, em sua grande maioria são sistemas novos e eficientes. Outro ator de importância na cadeia de valor FV é o das associações de energia solar, como *ABSOLAR*, *ABGD*, *ABINEE*, *ABESCO*, *AGSOLAR*, *ABENS*, entre outras, que possuem influência direta neste segmento e podem ser pontos focais para promoção de fóruns e discussões temáticas destinadas às entidades governamentais, sobretudo, acerca da regulamentação do EoL FV.

4.3 ANÁLISE DE CONTEÚDO COM AGENTES DO SETOR

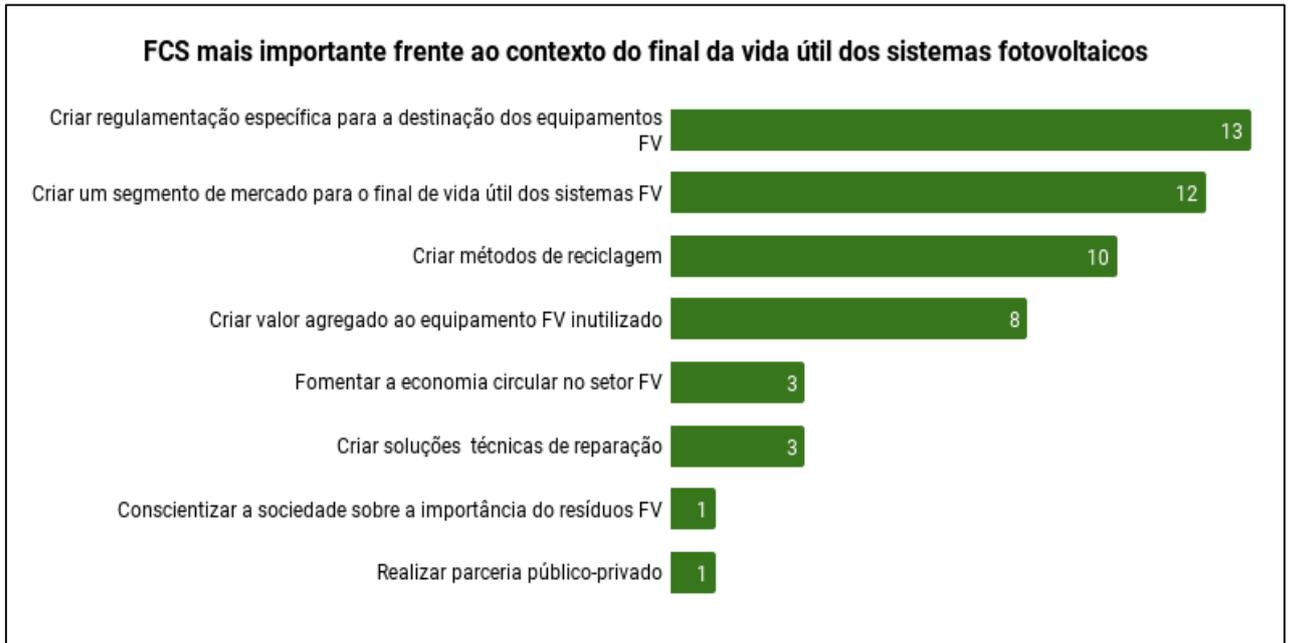
A análise estatística de conteúdo com agentes do setor visa analisar percepções sobre o EoL FV, no intuito de identificar possíveis soluções, bem como entender quais as opiniões acerca dos resíduos fotovoltaicos. Na análise em questão foi utilizado o instrumento de coleta de dados *Google Forms*, o qual foi composto por uma questão de múltipla escolha e cinco questões dissertativas. O referido instrumento foi aplicado a 51 especialistas, dentre os quais: 19 pesquisadores (37%); 18 integradores (35%); 13 consumidores residenciais (26%) e um fornecedor de linhas de financiamento solar (2%).

À vista disso, a pergunta de múltipla escolha buscou compreender qual FCS é considerado o mais importante no contexto do EoL FV. O FCS com maior frequência de resposta (26%) foi “*Criar regulamentação específica para a destinação dos equipamentos FV*” com 13 respostas, as quais, foram oriundas de oito pesquisadores, três consumidores e dois integradores. Em segundo lugar, “*Criar um segmento de mercado para o final de vida útil dos sistemas FV*”, com 24% das respostas assinaladas por cinco integradores, cinco pesquisadores e dois consumidores. Assim, pode-se considerar a regulamentação específica como o primeiro passo em busca da consolidação do EoL FV, uma vez estruturado, buscar-se-á o desenvolvimento e difusão de um segmento mercado voltado aos resíduos fotovoltaicos.

Os FCSs “*Conscientizar a sociedade sobre a importância dos resíduos FV*”, afirmado por um consumidor, e “*Realizar parceria Público-Privado*”, assinalado pelo especialista em financiamento solar, obtiveram o menor percentual de frequência, cada qual possuindo apenas

uma resposta. A seguir, a Figura 4 apresenta o gráfico da distribuição e contagem unitária das respostas obtidas no instrumento de coleta de dados.

Figura 4– Frequência de resposta para cada FCS



Fonte: Autora (2022).

Posteriormente, a primeira pergunta dissertativa aplicada foi “*O que você pensa sobre o final de vida útil dos sistemas fotovoltaicos?*”, onde se buscou, de forma dissertativa, evidenciar o que os especialistas estão refletindo sobre EoL FV. Estas respostas podem ser divididas em 6 grupos. O primeiro segmento faz menção à segunda vida do equipamento, ao valor desse resíduo inutilizado e seu correto descarte (29%), sendo composto por sete pesquisadores, quatro integradores, três consumidores e um especialista em financiamento solar. A segunda seção percebe o EoL FV como um problema a ser resolvido (20%), constituído por sete integradores, dois pesquisadores e um consumidor. O terceiro grupo elenca a preocupação com o meio ambiente e com a destinação incorreta dos metais presentes em módulos FV, os quais, são prejudiciais ao equilíbrio ambiental; bem como, cita a necessidade de maior sustentabilidade no segmento FV (17%), formado por quatro pesquisadores, quatro integradores e um consumidor. O quarto agrupamento citou a importância de métodos de reciclagem (16%), totalizando quatro consumidores, três integradores e um pesquisador. O quinto conjunto manifestou-se, principalmente, no que tange à necessidade de regulamentação do setor (12%), englobando cinco pesquisadores e um consumidor. Derradeiramente, o sexto

segmento aduziu na irrelevância do EoL FV, ou ainda não havia pensado sobre o mesmo (6%), sendo composto por três consumidores. Por conseguinte, resta claro que os consumidores, principais envolvidos no EoL FV, carecem de informações sobre este segmento capaz de conferir mais sustentabilidade à cadeia FV.

A segunda pergunta dissertativa, focada no descarte dos sistemas fotovoltaicos, foi estruturada da seguinte maneira: *“Como você pensa em descartar o sistema fotovoltaico?”*. As respostas dos especialistas podem ser classificadas majoritariamente em 3 grupos. O primeiro segmento representa 77% dos respondentes e é composto por 17 integradores, 14 pesquisadores, oito consumidores e um de linha de financiamento solar, os quais, pensam em descartar corretamente o sistema, reciclar ou recuperar materiais, procurar uma empresa específica para efetuar o descarte e a destinação correta dos resíduos, mencionam a importância da logística reversa e economia circular, possibilidade de utilização destes resíduos para contribuir socialmente em comunidades carentes, citam que o descarte dos demais resíduos eletrônicos também devem seguir uma lógica de sustentabilidade, e, por fim, trazem o descarte de resíduos FV como uma temática pouco abordada que precisa de maior desenvolvimento. O segundo grupo totaliza 18% dos especialistas, sendo cinco pesquisadores, três consumidores e um integrador, menciona como possibilidade de descarte o contato com a empresa que fez a instalação, já que esta possui mais interação com o consumidor final e detém um elo de confiança com o mesmo. A terceira seção, que engloba 6% dos respondentes e é composta por dois consumidores e um pesquisador, pensa em destinar em conformidade com a legislação vigente. Insta frisar a resposta de um consumidor, o qual menciona que sem a presença de uma legislação específica, destinaria os resíduos FV em algum ferro velho, prejudicando o meio ambiente, a saúde humana e inutilizando um equipamento com alto valor agregado que poderia ser reaproveitado em uma nova cadeia de valor.

Na sequência, a terceira pergunta dissertativa aplicada foi formulada da seguinte maneira: *“O que você enxerga como uma solução para os resíduos fotovoltaicos?”*. As respostas foram divididas em 5 grupos, sendo que o primeiro apontou o reaproveitamento destes resíduos na própria cadeia ou em outras cadeias de valor, totalizando 31% dos respondentes, compostos por seis pesquisadores, seis integradores e quatro consumidores. O segundo segmento de respondentes indicou a reciclagem como possível solução, correspondendo à 29% da totalidade de respostas, as quais, foram assinaladas por seis integradores, cinco consumidores e quatro pesquisadores. A terceira seção, que representa 18% das respostas,

aduziu no desenvolvimento de mercado direcionado ao EoL FV e agregar valor ao resíduo FV; esta solução foi apontada por quatro pesquisadores, dois consumidores, dois integradores e um de linha de financiamento solar. O quarto conjunto indica a regulamentação como solução e totaliza 12% das respostas, as quais, compõem-se de três pesquisadores, dois integradores e um consumidor. Por fim, o quinto estrato de respostas, correspondente à 10% do total e formado por dois pesquisadores, dois integradores e um consumidor, não apontou alguma solução para os resíduos FV. Interessante frisar uma resposta oriunda de um consumidor e que poderá servir como base do BMC estruturado no presente estudo: *“Seria interessante que tivesse empresas que recolhesse esse tipo de material para algum tipo de reaproveitamento, inclusive com algum retorno financeiro...”*.

Destarte, a quarta pergunta dissertativa foi *“Você conhece algum produto ou serviço relacionado ao final de vida útil dos sistemas fotovoltaicos? Se sim, qual? Se não, você tem ideia de algum?”*, 78% dos respondentes disseram não conhecer ou não saber quaisquer tipos de produtos ou serviços, sendo 13 integradores, 13 pesquisadores, 13 consumidores e um especialista em linhas de financiamento solar. À vista disso, torna-se necessário o desenvolvimento desse mercado, bem como a discussão dele, pois 100% dos consumidores respondentes não conhecem algum produto ou serviço no EoL FV, sendo assim, não saberão onde destinar seus resíduos. O montante de 22% dos respondentes sugeriram algumas empresas de reciclagem, como a *SunR, ALDO Solar, recicla E-Waste e O&M Operação e Manutenção Solar*. Cabe ressaltar que desses 11 respondentes, seis são pesquisadores e cinco são integradores.

Finalmente, a última pergunta do instrumento de pesquisa foi *“Você entende o valor do final de vida útil do sistema fotovoltaico? Escreva sobre esse valor”*. Impende realçar que 37% dos respondentes não entendem o valor do final de vida útil dos sistemas FV, dos quais oito consumidores, seis integradores e cinco pesquisadores. Destaca-se algumas das respostas obtidas, as quais, apresentam relevância temática e estão apresentadas no Quadro 2.

Assim sendo, conclui-se que agentes com maior embasamento no EoL FV são os pesquisadores, seguido dos integradores, ambos possuem maior conhecimento técnico acerca do tema. Por outro lado, os consumidores compreendem de forma rasa o EoL FV, sendo necessário, desta forma, buscar uma maior proximidade dos consumidores com a temática do EoL FV, visto que eles são os agentes que possuem contato direto com os resíduos FV.

Quadro 2 – Principais respostas sobre o valor do EoL FV

Resposta	Classe
<i>“Sim. Alto valor dos materiais. É necessário otimizar a logística reversa e aproveitar todos para o setor de produção do país.”</i>	Pesquisador
<i>“Acho que o principal valor criado é de fato referente a natureza. Com a instalação em massa de painéis (que contém metais pesados) podem gerar problemas muito graves ao meio ambiente. Se ocorrer da forma correta muitos são os materiais que podem ser reaproveitados (como o vidro) e novos produtos poderiam surgir, além da geração de empregos e até redução dos custos dos painéis.”</i>	Pesquisador
<i>“O valor pode ser visto de várias formas: financeiro, ambiental, social. Empresas podem ampliar seu faturamento aproveitando um novo nicho de mercado que possui um potencial imenso em um futuro próximo. Um correto descarte e a reciclagem dos materiais do módulo ao fim da vida útil fortalecem o valor sustentável da GD FV, tornando-a ainda mais limpa. Além disso, a reciclagem reduz o custo com insumos para fabricação de novos módulos, que certamente podem ser vendidos com valor agregado por serem construídos com materiais reciclável. Ainda, estimula-se vários nichos de economia circular, possibilitando que cooperativas de recicladores atuem no setor. As possibilidades de agregar valor são diversas e devem ser consideradas.”</i>	Pesquisador
<i>“O gerenciamento, descarte adequado e reciclagem de componentes fotovoltaicos ao final de sua vida útil agregam valores ambientais, sociais e econômicos ao sistema. Os valores ambientais estão relacionados à economia circular e à preservação do meio ambiente diante da exposição a substâncias nocivas, que também protegem e geram valor à sociedade. Os valores econômicos estão associados à possibilidade de reciclagem dos componentes fotovoltaicos e sua reutilização em novos projetos.”</i>	Pesquisador
<i>“Entendo como valor o resultado do bom gerenciamento do final da vida útil do sistema fotovoltaico, que pode se tornar uma oportunidade econômica e trazer benefícios para o meio ambiente com o descarte responsável. A reciclagem pode gerar matéria-prima. Além disso, existe a possibilidade de gerar novas indústrias e empregos no setor público e privado.”</i>	Pesquisador
<i>“A análise financeira para a instalação de Sistemas Fotovoltaicos deveria prever um "Valor Residual" (capital para destinação dos materiais) no fluxo de caixa do empreendimento para o final da vida útil dos equipamentos que compõem o Sistema, sendo que este montante financeiro (final) deveria auxiliar na realocação dos materiais descartados em novos sistemas (usinas). Se não há previsibilidade financeira para que no final da vida útil de uma usina seja possível "desmontar" um sistema fotovoltaico e dar o devido tratamento para os materiais, este sistema fotovoltaico (usina) acabará sendo um problema para a sociedade e não uma solução para reaproveitamento em novos sistemas que serão desenvolvidos, o que acarreta diretamente no "valor" que esses materiais representam para o mercado.”</i>	Integrador

Fonte: Autora (2022).

Em contrapartida, cabe ressaltar que a ideia dotada de maior potência de desenvolvimento para o presente BMC veio de um consumidor, o qual menciona uma empresa específica para essa coleta e destinação, bem como trazer algum retorno financeiro advindo desta destinação responsável.

4.4 BUSINESS MODEL CANVAS E MINIMUM VIABLE PRODUCT

O modelo de negócios esquematizado neste estudo tem base na análise estatística de conteúdo feita anteriormente. Visto a necessidade de uma coleta específica e destinação correta de sistemas FV pelas partes respondentes e falta de um mercado voltado a isso, este modelo de negócio facilita a destinação correta de sistemas fotovoltaicos, visto que muitas pessoas conhecem empresas recicladoras, mas por questões geográficas o transporte até estes locais muitas é inviável economicamente, em razão das recicladoras se encontrarem concentradas nas regiões sul e sudeste.

Neste sentido, o presente *Business Model Canvas*, bem como seu *Minimum Viable Product*, será desenvolvido através de uma plataforma digital, *site*, sendo este um elo a conectar o consumidor ao destino correto de seus equipamentos FV em seu final de vida útil, com proposta de valor na desinstalação, recolhimento e destinação desses equipamentos.

Nesta seção, são discutidos os componentes do BMC para impulsionar a competitividade no final de vida útil de sistemas FV. Foram consideradas as diversas possibilidades de cada componente, apresentados a seguir, com base nos estudos anteriormente apresentados. A figura do BMC completo está anexada como Apêndice B.

4.4.1 Segmento de clientes

Os clientes são o alvo para o qual a empresa cria valor. Em um negócio baseado no EoL de um produto, os clientes são os diversos participantes da cadeia de valor que tenham algum equipamento FV para descarte, mas principalmente, o consumidor final de sistemas FV e o primeiro agente da logística reversa (por exemplo, a recicladora). Especificamente na modalidade GD, onde a parcela FV é expressiva, os consumidores podem pertencer a uma das seguintes classes: residencial, comercial, rural, industrial, poder público, serviço público e iluminação pública. Os dados da ANEEL de 2022 mostram que em GD a maior parcela de clientes são residências e comércios, atingindo aproximadamente 80%. Destaca-se também como clientes desse modelo de negócio as empresas seguradoras, financeiras e integradoras, as quais destinam majoritariamente equipamentos novos, mas danificados.

4.4.2 Proposta de valor

É o conjunto de serviços que o modelo de negócios irá oferecer aos seus clientes. Este modelo de negócio tem a especialidade no EoL FV, sendo assim, a principal proposta de valor é conectar os consumidores finais de sistemas FV em uma cadeia de logística reversa adequada e remunerada. Por isso, esta proposta de valor engloba: a conscientização dos agentes da cadeia, localização dos agentes importantes (por exemplo recicladoras, empresas de remanufatura e centros de pesquisa), a recomendação da logística para a destinação correta dos equipamentos FV, serviço de desinstalação dos sistemas FV, e também, a gestão logística de resíduos prematuros de equipamentos FV em empresas integradoras, seguradoras de sistema FV e instituições bancárias de financiamento, levando-os ao seu destino correto.

4.4.3 Canais

É a forma de conectar o cliente à proposta de valor por meio de canais de distribuição e/ou informação. Para isso, esse modelo irá operar por meio de uma plataforma digital, *site*, sendo esse o MVP do estudo e o principal canal de comunicação com os seus clientes, que pode ser visualizado no Apêndice C. O site terá uma estrutura intuitiva que facilitará a solicitação do cliente, operando essencialmente em cinco passos, descritos a seguir: O cliente procura pelo site para destinar seus equipamentos FV, assim o primeiro passo é o seu cadastro com dados básicos como: nome, CPF, telefone, e-mail e endereço para retirada dos equipamentos. O segundo passo contempla a especificação de quais equipamentos deseja-se destinar, sendo possível selecionar: módulos e/ou inversores e/ou estruturas de fixação e/ou cabos. A terceira etapa visa especificar esses equipamentos, para os módulos e inversores, o cliente deve especificar quantas unidades, marca, potência, quanto tempo faz desde a sua instalação e anexar fotos. Já para as estruturas de fixação, o cliente deve especificar qual o tipo/material das estruturas, para quantos módulos são essa estrutura, quanto tempo desde a sua instalação e anexar fotos. Em relação aos cabos, os clientes devem especificar o comprimento dos cabos, a sua bitola, seu material, quanto tempo faz que instalou e anexar fotos. O quarto passo visa confirmar o endereço para coleta desses equipamentos, agendar um dia e horário para essa desinstalação ou recolhimento, nessa parte o cliente especifica se deseja que esses equipamentos sejam apenas recolhidos ou se há necessidade de sua desinstalação. Assim será

gerado um prazo para que a equipe de desinstalação ou recolhimento vá até a casa do cliente, bem como um prazo para que esses equipamentos sejam entregues até a sua destinação final. É especificado também a empresa recicladora a qual irá receber esses equipamentos, levando em consideração a localização do cliente e a localização da empresa recicladora. O quinto passo contempla o pagamento por esse serviço. Depois de concluído os quatro passos, o cliente acompanha o andamento da sua solicitação em seu cadastro no *site*, onde pode também acompanhar o rastreamento da logística de seus equipamentos.

4.4.4 Relacionamento com o cliente

O modelo precisa definir como será o relacionamento com o cliente e quais procedimentos adotar sob os diferentes clientes. A empresa em questão irá adotar as seguintes práticas: possuir SAC, responder a todas as dúvidas dos clientes, ter um *chat online* no *site*, realizar a desinstalação do sistema com uma explicação detalhada de onde esses equipamentos serão destinados, auxiliá-los no rastreamento de onde os equipamentos se encontram, manter seus processos transparentes aos clientes, notificá-los quando os seus equipamentos forem entregues corretamente e onde esses equipamentos foram entregues, atender aos prazos estabelecidos para desinstalação e entrega desses equipamentos e gerar um certificado de destinação correta dos equipamentos FV aos clientes. Através desse certificado o cliente poderá ganhar desconto para obtenção de um novo sistema com as empresas integradoras parceiras.

4.4.5 Fontes de receita

As fontes de receitas desse modelo de negócios serão através do serviço de desinstalação ou recolhimento dos equipamentos e a gestão logística até seu destino sustentável. As margens de lucro variam de acordo com a quantidade de equipamentos a serem destinados, o serviço de desinstalação e a gestão logística. A política de precificação irá variar de acordo com a especificação da solicitação do cliente, se ele deseja o serviço de desinstalação ou será apenas o recolhimento, a quantidade de equipamentos e também o custo logístico, o qual dependerá da distância do cliente até o destino final.

4.4.6 Recursos chave

Nesse modelo de negócio, em que sua principal proposta de valor é a gestão logística de equipamentos FV, os recursos chave são as pessoas e suas diferentes competências. Considerando que as equipes de desinstalação e de transporte logístico serão terceirizadas, manter o padrão em seus processos é essencial para garantir o sucesso em seus serviços. A equipe de desinstalação precisa desinstalar os sistemas de modo seguro e confiável, a fim de garantir que esse processo não conceba mais danos ao equipamento. Já a equipe de logística deve assegurar que os equipamentos sejam entregues ao seu destino final no prazo estabelecido aos clientes. O capital organizacional e o capital humano de uma empresa que presta serviços é extremamente essencial, e por isso, investir em treinamentos é uma opção para manter o padrão em suas atividades.

4.4.7 Atividades chave

Neste item busca-se responder “Quais atividades nossa proposta de valor requer?” (DORNELAS, 2020). Em geral, os principais macroprocessos são gerir vendas/clientes, desinstalar, transportar e destinar equipamentos. Esses processos são diretamente relacionados aos serviços apontados anteriormente no BMC.

4.4.8 Parceiros chave

Em geral, os parceiros chave são: (1) empresas recicladoras, como a *SunR, Recicla E-Waste, O&M Operação e Manutenção Solar e Aldo Solar*; (2) grupos de pesquisa, como o grupo *Fotovoltaico da UFSC*; (3) empresas integradoras; (4) seguradoras de sistema FV; (5) financiadoras de sistema FV, como a *Sol Fácil*; (6) equipes terceirizadas especialistas em desinstalação de sistemas FV; (7) equipes terceirizadas especialistas em logística; e (8) clientes satisfeitos.

4.4.9 Estrutura de custos

Os principais custos estão relacionados a manutenção do *site* e o custo de terceirização do serviço de desinstalação e logística e equipes de marketing para divulgação da marca. O pagamento realizado pelos clientes para a destinação de seus equipamentos fotovoltaicos será por meio do próprio site, após especificar os equipamentos a serem destinados. As formas de pagamento serão: boleto, pix e cartão de crédito. O valor a ser pago pelo cliente dependerá da quantidade de equipamentos a serem destinados, sua desinstalação ou recolhimento e também a distância do cliente até o destino final dos seus equipamentos. Esse valor irá cobrir o custo da empresa para esse serviço, englobando os custos com desinstalação, logística e marketing.

Insta destacar o diferencial desse modelo de negócios em relação as empresas recicladoras citadas anteriormente, como a *SunR*, *Recicla E-Waste*, *O&M Operação e Manutenção Solar e Aldo Solar*, as quais realizam a reciclagem dos resíduos FV, entretanto não realizam a desinstalação e coleta dos referidos resíduos. Cabe ressaltar que por limitações geográficas, tais resíduos não chegam a essas recicladoras, pois elas estão concentradas nas regiões sul e sudeste do país. Dessa forma, a logística reversa dos resíduos FV pode ser um entrave para a sua destinação correta e reciclagem. Assim, o proposto modelo de negócio beneficia não somente os consumidores como também as empresas de reciclagem.

É importante salientar o elo de confiança entre o consumidor e a empresa integradora, a qual pode ser uma ameaça para o desenvolvimento do referido modelo de negócio, haja vista que a integradora poderá desenvolver na sua organização um mercado voltado ao EoL FV. Porém, é importante destacar que muitas dessas empresas ainda estão se estruturando no mercado, pois possuem poucos anos de experiência e ainda estão em processo de ajustes de gestão e operações técnicas (RIGO *et al.*, 2022). Portanto, muitas dessas empresas não efetivam a sua estruturação de forma sólida, logo, ficam pouco tempo no mercado. Assim, quando os equipamentos de seus clientes atingirem o EoL FV eles deverão procurar outra alternativa para seus resíduos, nesse momento, o presente modelo de negócios pode ser uma alternativa viável, visto que facilita a logística e destinação desses resíduos, levando praticidade ao consumidor.

Por conseguinte, o *Minimum Viable Product* (MVP) é utilizado para validar a ideia do modelo de negócio e inseri-lo no mercado de forma enxuta e com o mínimo de recurso para o seu desenvolvimento. Destarte, é possível a visualização da ideia de negócio e a interação com a marca proposta. Dessa forma, após todos os componentes do BMC serem estruturados, o

MVP desse estudo foi desenvolvido através de um *site*. A sua estruturação e suas principais interfaces estão apresentados no Apêndice C.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo contribuiu com o desenvolvimento do destino dos sistemas fotovoltaicos ao final de vida útil de sistemas fotovoltaicos, tanto em termos de pesquisa quanto de mercado. Além disso, este estudo fomenta o empreendedorismo em um novo segmento dentro do mercado fotovoltaico, bem como para a sua competitividade.

A partir da revisão sistemática de literatura, o conhecimento teórico sobre o EoL FV foi aprimorado. Dessa forma, os Fatores Críticos de Sucesso foram explorados e elencados em Pontos de Vista Fundamentais. Tais fatores foram apontados como principais entraves para a consolidação do EoL FV, os quais podem ser explorados a fim de garantir o desenvolvimento de um mercado voltado ao EoL FV, com o propósito de garantir a sua competitividade e circularidade.

A sequência deu-se pelo mapeamento do relacionamento entre o EoL FV e seus principais agentes na cadeia de valor, onde foi possível analisar o vínculo entre as partes envolvidas nesse segmento. A classificação teórica da cadeia de valor FV está dividida essencialmente em *upstream*, *midstream*, *downstream* e cadeia de valor auxiliar. Essa classificação segue um caminho linear, em contrapartida, o EoL FV é capaz de mudar tal cenário, trazendo a circularidade pro setor através do conceito *reverse stream*. Os atores em contato direto com o EoL FV são os consumidores e empresas recicladoras, responsáveis por dar segunda vida ao sistema FV, sendo os consumidores, principais envolvidos na destinação final dos sistemas FV. As empresas recicladoras podem ser vistas como o elo principal para a efetivação da segunda vida de equipamentos FV, assim como pela conscientização dos consumidores finais.

Logo após, o presente estudo sucedeu pela análise de conteúdo com agentes do setor, a fim de investigar suas percepções acerca do EoL FV, através de um instrumento de coleta de dados. Isto posto, infere-se que os respondentes preocupam-se com os resíduos FV, pretendem destiná-los corretamente, porém ainda não sabem de que maneira o farão. Destarte, conclui-se que os agentes com maior embasamento no EoL FV são os pesquisadores, seguido dos integradores. Em contrapartida, a solução com maior potencial de desenvolvimento para o presente modelo de negócios surgiu de um consumidor.

Finalmente, este estudo foi completo quando o *Business Model Canvas* e o *Minimum Viable Product* foram estruturados. Essencialmente, a construção do BMC adveio da solução

de um consumidor, como discutido na etapa anterior do estudo. O preferido modelo de negócios foi desenvolvido através de uma plataforma digital, sendo assim, realizou-se o MVP através de um *site*, a fim de conectar resíduos FV em uma cadeia de logística reversa até seu destino final, desempenhando os serviços de desinstalação, logística e entrega consciente até empresas recicladoras.

Isto posto, o objetivo geral de criar, entregar e compartilhar valor ao EoL FV através do desenvolvimento de um modelo de negócios foi alcançado, uma vez que criou-se um modelo de negócios, o qual será confiado aos agentes em contato com resíduos FV, bem como às demais partes envolvidas nesse segmento. Portanto, o valor encontrado no EoL FV foi partilhado com os agentes envolvidos nesta cadeia de valor.

PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS

Durante o período de dedicação à graduação em Engenharia de Produção até o presente momento, houve a publicação de alguns artigos científicos, os quais estão listados a seguir.

1. **SPELLMEIER, J. P.**; RIGO, P. D.; ROSA, C. B.; MICHELS, L. ; SILUK, J. C. M. Potencial de Crescimento de Sistemas Fotovoltaicos de Geração Distribuída nas Capitais Brasileiras. In: ENEGEP 2020 Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2020, Online, 2020.
2. RIGO, P. D. ; SILUK, JULIO CEZAR M. ; LACERDA, DANIEL P. ; **SPELLMEIER, J. P.**. Competitive business model of photovoltaic solar energy installers in Brazil. RENEWABLE ENERGY, v. 181, p. 39-50, 2022.
3. **SPELLMEIER, J. P.**; RIGO, P. D.; ROSA, C. B.; LACERDA, D. P.; SILUK, J. C. M.. Modelo de negócios das integradoras de energia solar fotovoltaica. In: VI Simpósio Gaúcho de Engenharia de Produção, 2021, Online. Anais do VI SIGEPRO - Simpósio Gaúcho de Engenharia de Produção, 2021.
4. **SPELLMEIER, J. P.**; ROSA, C. B.; RIGO, P. D.; SILUK, J. C. M.; REDISKE, G. A preocupação ambiental como motivação para a adoção de sistemas fotovoltaicos por proprietários de residências. In: 10º Fórum Internacional Ecoinnovar, 2021, Santa Maria. 10º Fórum Internacional Ecoinnovar - Anais, 2021.
5. **SPELLMEIER, J. P.**; GASTALDO, N. G.; RIGO, P. D.; REDISKE, G.; ROSA, C. B.; SILUK, J. C. M. Avaliação da gestão da construção de uma usina solar fotovoltaica. In: IX Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2022, Florianópolis. Anais CBENS 2022, 2022.
6. **SPELLMEIER, J. P.**; ROSA, C. B.; RIGO, P. D.; SILUK, J. C. M.; SANTOS, P. A.. FATORES CRÍTICOS DE SUCESSO PARA A COMPETITIVIDADE DO FINAL DA VIDA ÚTIL DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS. In: ENEGEP 2022 Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2022, FOZ DO IGUACU/SP - BRASIL, 2022.

REFERÊNCIAS

- AGHNIA, Mutiara Cahya; LARSO, Dwi. DEVELOPING NEW PRODUCT USING MINIMUM VIABLE PRODUCT. **JURNAL APLIKASI MANAJEMEN**, [s. l.], v. 16, n. 2, p. 234–245, 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Capacidade de Geração do Brasil**. [S. l.: s. n.], 2022a. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOjR9>. Acesso em: 1 mar. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Geração Distribuída**. [S. l.: s. n.], 2022b. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZjM4NjM0OWYtN2IwZS00YjViLTllMjltN2E5MzBkN2ZlMzVkIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOjR9>. Acesso em: 1 mar. 2022.
- BAO, Q *et al.* A human-centered design approach to evaluating factors in residential solar PV adoption: A survey of homeowners in California and Massachusetts. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 151, p. 503–513, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.047>
- BARTIE, N. J. *et al.* The resources, exergetic and environmental footprint of the silicon photovoltaic circular economy: Assessment and opportunities. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 169, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105516>
- BESIOU, Maria; VAN WASSENHOVE, Luk N. Closed-loop supply chains for photovoltaic panels: A case-based approach. **Journal of Industrial Ecology**, [s. l.], v. 20, n. 4, p. 929–937, 2016.
- CHESBROUGH, Henry; ROSENBLOOM, Richard S. The role of the business model in capturing value from innovation: evidence from Xerox Corporation’s technology spin-off companies. **Industrial and Corporate Change**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 529–555, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/icc/11.3.529>
- CHOWDHURY, Md. Shahariar *et al.* An overview of solar photovoltaic panels’ end-of-life material recycling. **Energy strategy reviews**, [s. l.], v. 27, p. 100431, 2020.
- CUCCHIELLA, Federica; D’ADAMO, Idiano; ROSA, Paolo. End-of-Life of used photovoltaic modules: A financial analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 47, p. 552–561, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.076>
- DALJIT SINGH, Jasleen Kaur *et al.* Life cycle analysis of disposed and recycled end-of-life photovoltaic panels in australia. **Sustainability (Switzerland)**, ST ALBAN-ANLAGE 66, CH-4052 BASEL, SWITZERLAND, v. 13, n. 19, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su131911025>

DE ANDRADE, Maurício Guy *et al.* Statistical quality control for the evaluation of the uniformity of microsprinkler irrigation with photovoltaic solar energy. **Renewable & sustainable energy reviews**, [s. l.], v. 78, p. 743–753, 2017.

DE SOUZA, Luiz Enrique Vieira; CAVALCANTE, Alina Mikhailovna Gilmanova. Towards a sociology of energy and globalization: Interconnectedness, capital, and knowledge in the Brazilian solar photovoltaic industry. **Energy Research & Social Science**, [s. l.], v. 21, p. 145–154, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2016.07.004>

DING, Ning *et al.* Comparative analysis of primary aluminum and recycled aluminum on energy consumption and greenhouse gas emission. **The Chinese Journal of Nonferrous Metals**, [s. l.], v. 22, n. 10, p. 2908–2915, 2012.

DORNELAS, José. **Plano de negócios com o modelo Canvas : guia prático de avaliação de ideias de negócio**. São Paulo: Empreende Ltda., 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Empresa de Pesquisa Energética**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030**. [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/PDE>. Acesso em: 8 ago. 2021.

FARRELL, C C *et al.* Technical challenges and opportunities in realising a circular economy for waste photovoltaic modules. **Renewable & sustainable energy reviews**, [s. l.], v. 128, p. 109911, 2020.

GARLET, Taís Bisognin *et al.* Value chain in distributed generation of photovoltaic energy and factors for competitiveness: A systematic review. **Solar Energy**, [s. l.], v. 211, p. 396–411, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2020.09.040>

GAUTAM, Ayush; SHANKAR, Ravi; VRAT, Prem. End-of-life solar photovoltaic e-waste assessment in India: a step towards a circular economy. **Sustainable Production and Consumption**, [s. l.], v. 26, p. 65–77, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.09.011>

GREENER. **Estudo e viabilidade de energia solar fotovoltaica**. <https://www.greener.com.br/>: [s. n.], 2022a. Disponível em: <https://www.greener.com.br/estudos/>

GREENER. **Estudo Estratégico Geração Distribuída - 2 Semestre de 2021**. [S. l.: s. n.], 2022b. Disponível em: <https://www.greener.com.br/estudo/estudo-estrategico-mercado-fotovoltaico-de-geracao-distribuida-1-semester-de-2021/>

INTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Atlas Brasileiro de Energia Solar- 2 ed. [s. l.], p. 80, 2017. Disponível em: <http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP3W34P/3PERDJE>

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **END-OF-LIFE**

MANAGEMENT: Solar Photovoltaic Panels, 2016. Disponível em:

https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf

JABBOUR, Charbel José Chiapetta *et al.* “Verdes e competitivas?” A influência da gestão ambiental no desempenho operacional de empresas brasileiras. **Ambiente e Sociedade**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 151–172, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2012000200009>

JAIN, Suresh; SHARMA, Tanya; GUPTA, Anil Kumar. End-of-life management of solar PV waste in India: Situation analysis and proposed policy framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 153, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111774>

JUNTUNEN, Jouni K.; HYYSALO, Sampsa. Renewable micro-generation of heat and electricity—Review on common and missing socio-technical configurations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 49, p. 857–870, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.04.040>

KADRO, Jeannette M.; HAGFELDT, Anders. The End-of-Life of Perovskite PV. **Joule**, 50 HAMPSHIRE ST, FLOOR 5, CAMBRIDGE, MA 02139 USA, v. 1, n. 1, p. 29–46, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.07.013>

KALMYKOVA, Yuliya; SADAGOPAN, Madumita; ROSADO, Leonardo. Circular economy – From review of theories and practices to development of implementation tools. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 135, p. 190–201, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2017.10.034>

KHAWAJA, Mohamad K.; GHAITH, Marwa; ALKHALIDI, Ammar. Public-private partnership versus extended producer responsibility for end-of-life of photovoltaic modules management policy. **Solar Energy**, [s. l.], v. 222, p. 193–201, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.022>

KLEPA, Rogério Bonette *et al.* Potencial De Resíduos Fotovoltaicos Reutilizados Através Da Logística Reversa Verde (Lrv). [s. l.], p. 84891, 2020.

LEDOUX, Laure *et al.* Towards sustainable flood and coastal management: identifying drivers of, and obstacles to, managed realignment. **Land use policy**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 129–144, 2005.

MAHMOUDI, Sajjad *et al.* End-of-life photovoltaic modules: A systematic quantitative literature review. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 146, p. 1–16, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2019.03.018>

MAJEWSKI, Peter *et al.* Recycling of solar PV panels- product stewardship and regulatory approaches. **Energy Policy**, [s. l.], v. 149, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.112062>

NDZIBAH, Emmanuel; ANDREA PINILLA-DE LA CRUZ, Giovanna; SHAMSUZZOHA, Ahm. End of life analysis of solar photovoltaic panel: roadmap for developing economies. **International Journal of Energy Sector Management**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 112–128, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/IJESM-11-2020-0005>

NICOL, Scott; THOMPSON, Shirley. Policy options to reduce consumer waste to zero: comparing product stewardship and extended producer responsibility for refrigerator waste. **Waste management & research**, [s. l.], v. 25, n. 3, p. 227–233, 2007.

OKOROIGWE, Florence C *et al.* Photovoltaic Modules Waste Management: Ethical Issues for Developing Nations. **Energy Technology**, [s. l.], v. 8, n. 11, p. 2000543, 2020.

OLIVEIRA, Fábio Ribeiro de; FRANÇA, Sergio Luiz Braga; RANGEL, Luís Alberto Duncan. Challenges and opportunities in a circular economy for a local productive arrangement of furniture in Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 135, n. October 2017, p. 202–209, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.031>

QUAL SERÁ O DESTINO DOS MODULOS FOTOVOLTAICOS APOS A REPOTENCIACAO DOS SISTEMAS. [S. l.: s. n.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/opiniaio/opiniaio-tecnologia/qual-sera-o-destino-dos-modulos-fotovoltaicos-apos-a-repotenciacao-dos-sistemas>

REDISKE, Graciele *et al.* Management of operation and maintenance practices in photovoltaic plants: Key performance indicators. **International Journal of Energy Research**, [s. l.], v. n/a, n. n/a, 2022. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/er.7737>

RIGO, Paula D. *et al.* Competitive business model of photovoltaic solar energy installers in Brazil. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 181, p. 39–50, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2021.09.031>

SALIM, Hengky K. *et al.* End-of-life management of solar photovoltaic and battery energy storage systems: A stakeholder survey in Australia. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 150, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104444>

SAMBRANI, Vinod N. PPP from Asia and African Perspective towards Infrastructure Development : A Case Study of Greenfield Bangalore International. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, [s. l.], v. 157, p. 285–295, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.11.031>

SANTOS, J. D.; ALONSO-GARCÍA, M. C. Projection of the photovoltaic waste in Spain until 2050. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 196, p. 1613–1628, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.252>

SHARMA, Hari Bhakta *et al.* Evaluation of heavy metal leaching under simulated disposal

conditions and formulation of strategies for handling solar panel waste. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 780, p. 146645, 2021a. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146645>

SHARMA, Hari Bhakta *et al.* Evaluation of heavy metal leaching under simulated disposal conditions and formulation of strategies for handling solar panel waste. **The Science of the total environment**, [s. l.], v. 780, p. 146645, 2021b.

SICA, Daniela *et al.* Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy. **Renewable & sustainable energy reviews**, [s. l.], v. 82, p. 2934–2945, 2018.

SIMPSON, G; CLIFTON, J. Testing Diffusion of Innovations Theory with data: Financial incentives, early adopters, and distributed solar energy in Australia. **Energy Research and Social Science**, [s. l.], v. 29, p. 12–22, 2017. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.04.005>

SIRISAWAT, Pornwasin; KIATCHAROENPOL, Tossapol. Fuzzy AHP-TOPSIS approaches to prioritizing solutions for reverse logistics barriers. **Computers & Industrial Engineering**, [s. l.], v. 117, p. 303–318, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2018.01.015>

SOUZA, Marcela Tavares de; SILVA, Michelly Dias da; CARVALHO, Rachel de. Integrative review: what is it? How to do it? **Einstein (São Paulo)**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 102–106, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1679-45082010rw1134>

TANSKANEN, Pia. Management and recycling of electronic waste. **Acta materialia**, [s. l.], v. 61, n. 3, p. 1001–1011, 2013.

TRIPATHI, Nirnaya *et al.* Startup ecosystem effect on minimum viable product development in software startups. **Information and Software Technology**, [s. l.], v. 114, p. 77–91, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.INFSOF.2019.06.008>

VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. **São Paulo: Érica**, [s. l.], v. 2, 2012.

WATTS, Philip. Walking the Talk: The Business Case for Sustainable Development. [s. l.], 2017.

XU, Yan *et al.* Global status of recycling waste solar panels: A review. **Waste management (Elmsford)**, United States, v. 75, p. 450–458, 2018.

YU, Haofan; TONG, Xin. Producer vs. local government: The locational strategy for end-of-life photovoltaic modules recycling in Zhejiang province. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 169, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105484>

APÊNDICE A – ARTIGOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Quadro 3 – Fatores e códigos dos artigos relacionados

Fatores	Código dos artigos
Criar valor agregado ao equipamento FV inutilizado	R1A02 R1A07 R1A09 R1A21 R1A25 R1A71 R1A107
Criar um segmento de mercado para o EoL FV	R1A02 R1A09 R1A21 R1A25 R1A71 R1A77 R1A82
Reparação	R1A02 R1A107 R1A08 R1A09 R1A10 R1A12 R1A28 R1A29 R1A35 R1A39 R1A40 R1A71 R1A89
Reciclagem	R1A04 R1A07 R1A08 R1A09 R1A10 R1A12 R1A21 R1A29 R1A34 R1A71 R1A80 R1A93 R1A107 R1A109
Regulamentação	R1A02 R1A07 R1A08 R1A09 R1A10 R1A11 R1A12 R1A14 R1A21 R1A25 R1A29 R1A69 R1A77 R1A107
Parceria público-privado	R1A02 R1A10 R1A21 R1A25 R1A29 R1A77 R1A90 R1A91
Economia circular	R1A02 R1A07 R1A08 R1A09 R1A10 R1A14 R1A27 R1A40 R1A111
Conscientização	R1A02 R1A11 R1A14 R1A25 R1A77 R1A111 R1A114

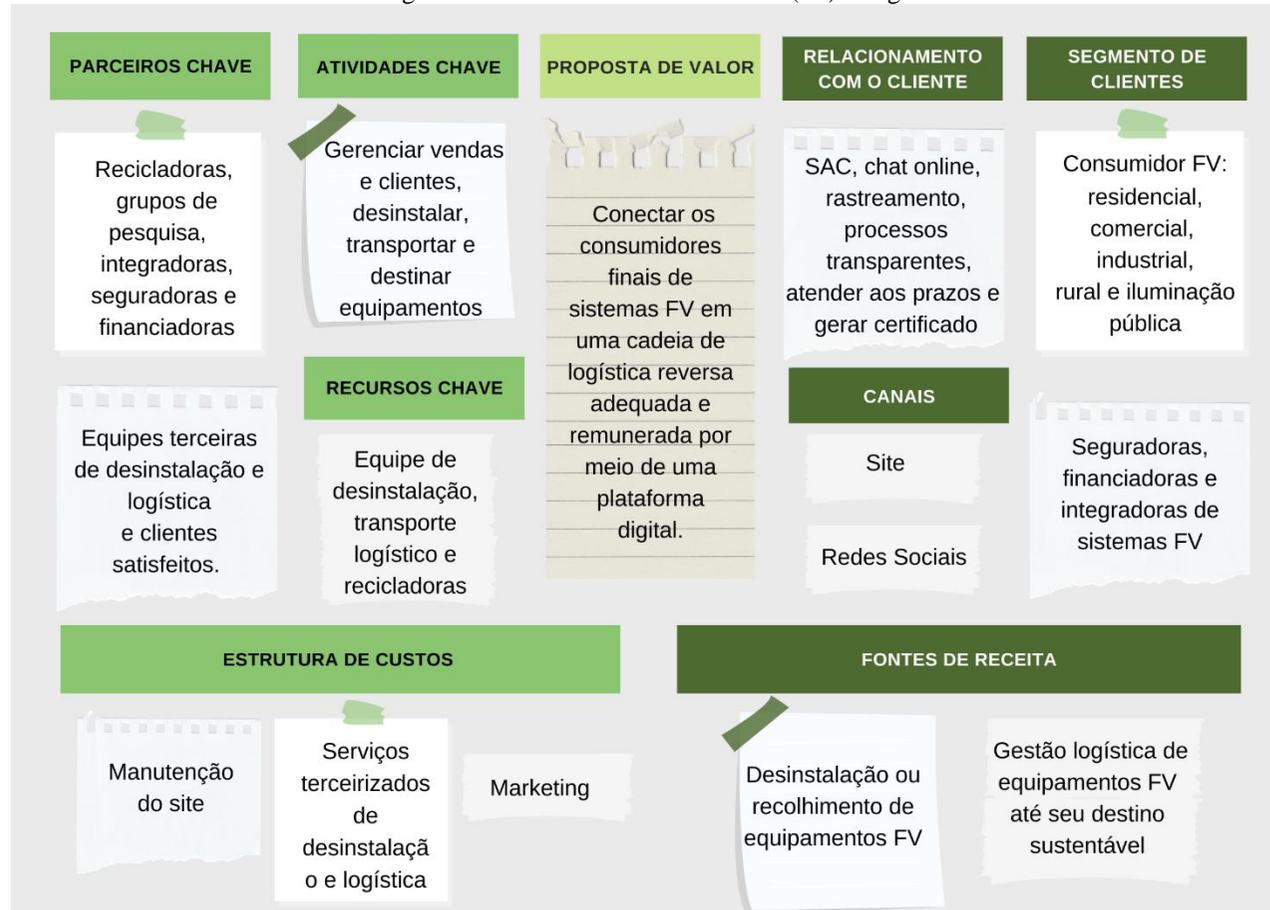
Quadro 4 – Legenda dos códigos dos artigos da revisão sistemática da literatura

Código	Artigo
R1A02	NDZIBAH, E; ANDREA PINILLA-DE LA CRUZ, G; SHAMSUZZOHA, A. End of life analysis of solar photovoltaic panel: roadmap for developing economies. <i>International Journal of Energy Sector Management</i> .
R1A04	XANTHOPOULOS, P et al. Recovery of copper, zinc and lead from photovoltaic panel residue. <i>RSC Advances</i> , [s. l.], v. 12, n. 4, p. 2351–2360, 2022.
R1A07	THEOCHARIS, M et al. An Integrated Thermal and Hydrometallurgical Process for the Recovery of Silicon and Silver from End-of-Life Crystalline Si Photovoltaic Panels. <i>Waste and Biomass Valorization</i> , [s. l.], 2022.
R1A08	LI, Y et al. Recycling schemes and supporting policies modeling for photovoltaic modules considering heterogeneous risks. <i>Resources, Conservation and Recycling</i> , [s. l.], v. 180, 2022.
R1A09	GAUTAM, A; SHANKAR, R; VRAT, P. Managing end-of-life solar photovoltaic e-waste in India: A circular economy approach. <i>Journal of Business Research</i> , [s. l.], v. 142, p. 287–300, 2022.
R1A10	TASNIM, S S et al. Current challenges and future perspectives of solar-PV cell waste in Bangladesh. <i>Heliyon</i> , [s. l.], v. 8, n. 2, 2022.
R1A11	NDZIBAH, E; PINILLA-DE LA CRUZ, G A; SHAMSUZZOHA, A. Collaboration towards value creation for end-of-life solar photovoltaic panel in Ghana. <i>Journal of Cleaner Production</i> , [s. l.], v. 333, 2022. : ://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129969
R1A12	LIM, M S W et al. Experimental, economic and life cycle assessments of recycling end-of-life monocrystalline silicon photovoltaic modules. <i>Journal of Cleaner Production</i> , [s. l.], v. 340, 2022.
R1A14	DANIELA-ABIGAIL, H.-L. et al. Does recycling solar panels make this renewable resource sustainable? Evidence supported by environmental, economic, and social dimensions. <i>Sustainable Cities and Society</i> , [s. l.], v. 77, 2022.
R1A21	JAIN, Suresh; SHARMA, Tanya; GUPTA, Anil Kumar. End-of-life management of solar PV waste in India: Situation analysis and proposed policy framework. <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> , [s. l.], v. 153, 2022.
R1A25	NAIN, Preeti; KUMAR, Arun. Understanding manufacturers' and consumers' perspectives towards end-of-life solar photovoltaic waste management and recycling. <i>Environment, Development and Sustainability</i> , [s. l.], 2022.
R1A27	OVAITT, Silvana et al. PV in the circular economy, a dynamic framework analyzing technology evolution and reliability impacts. <i>iScience</i> , [s. l.], v. 25, n. 1, 2022.
R1A28	THOMASSEN, Gwenny; DEWULF, Jo; VAN PASSEL, Steven. Prospective material and substance flow analysis of the end-of-life phase of crystalline silicon-based PV modules. <i>Resources, Conservation and Recycling</i> , [s. l.], v. 176, 2022.
R1A29	XU, Xinhai et al. A systematically integrated recycling and upgrading technology for waste crystalline silicon photovoltaic module. <i>Resources, Conservation and Recycling</i> , [s. l.], v. 182, 2022.
R1A30	POLVERINI, Davide; DODD, Nicholas; ESPINOSA, Nieves. Potential regulatory approaches on the environmental impacts of photovoltaics: Expected improvements and impacts on technological innovation. <i>Progress in Photovoltaics: Research and Applications</i> , [s. l.], v. 29, n. 1, p. 83–97, 2021.
R1A34	PROTOPAPA, M. L. et al. Optical methods to identify end-of-life PV panel structure. <i>Resources, Conservation and Recycling</i> , [s. l.], v. 171, 2021.

R1A35	PANG, Sheng et al. Enhanced separation of different layers in photovoltaic panel by microwave field. <i>Solar Energy Materials and Solar Cells</i> , [s. l.], v. 230, 2021.
R1A39	CONTRERAS-LISPERGUER, Rubén et al. A set of principles for applying Circular Economy to the PV industry: Modeling a closed-loop material cycle system for crystalline photovoltaic panels. <i>Sustainable Production and Consumption</i> , [s. l.], v. 28, p. 164–179, 2021.
R1A40	DALJIT SINGH, Jasleen Kaur et al. Life cycle analysis of disposed and recycled end-of-life photovoltaic panels in australia. <i>Sustainability (Switzerland)</i> , [s. l.], v. 13, n. 19, 2021.
R1A69	TEMBO, P. M.; HENINGER, M.; SUBRAMANIAN, V. An Investigation of the Recovery of Silicon Photovoltaic Cells by Application of an Organic Solvent Method. <i>ECS Journal of Solid State Science and Technology</i> , [s. l.], v. 10, n. 2, p. 025001, 2021.
R1A71	SICA, Daniela et al. Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy. <i>Renewable & sustainable energy reviews</i> , [s. l.], v. 82, p. 2934–2945, 2018.
R1A77	Salim, Hengky K. Stewart, Rodney A. Sahin, Oz End-of-life management of solar photovoltaic and battery energy storage systems: A stakeholder survey in Australia Dudley, Michael
R1A79	CHOWDHURY, Md. Shahariar et al. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. <i>Energy strategy reviews</i> , [s. l.], v. 27, p. 100431, 2020
R1A80	DING, Ning et al. Comparative analysis of primary aluminum and recycled aluminum on energy consumption and greenhouse gas emission. <i>The Chinese Journal of Nonferrous</i>
R1A82	KADRO, Jeannette M.; HAGFELDT, Anders. The End-of-Life of Perovskite PV. <i>Joule</i> , 50 HAMPSHIRE ST, FLOOR 5, CAMBRIDGE, MA 02139 USA, v. 1, n. 1, p. 29–46, 2017.
R1A89	LIN, W; CHEN, E; SUN, Y L. Analysis of old photovoltaic component junction box disassembling mode. <i>Sol. Energy</i> , [s. l.], v. 7, p. 26, 2011.
R1A90	NICOL, Scott; THOMPSON, Shirley. Policy options to reduce consumer waste to zero: comparing product stewardship and extended producer responsibility for refrigerator waste. <i>Waste management & research</i> , [s. l.], v. 25, n. 3, p. 227–233, 2007.
R1A91	SAMBRANI, Vinod N. PPP from Asia and African Perspective towards Infrastructure Development : A Case Study of Greenfield Bangalore International. <i>Procedia - Social and Behavioral Sciences</i> , [s. l.], v. 157, p. 285–295, 2014.
R1A93	SANTOS, J. D.; ALONSO-GARCÍA, M. C. Projection of the photovoltaic waste in Spain until 2050. <i>Journal of Cleaner Production</i> , [s. l.], v. 196, p. 1613–1628, 2018.
R1A107	SIRISAWAT, Pornwasin; KIATCHAROENPOL, Tossapol. Fuzzy AHP-TOPSIS approaches to prioritizing solutions for reverse logistics barriers. <i>Computers & Industrial Engineering</i> , [s. l.], v. 117, p. 303–318, 2018.
R1A109	CUCCHIELLA, Federica; D'ADAMO, Idiano; ROSA, Paolo. End-of-Life of used photovoltaic modules: A financial analysis. <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> , [s. l.], v. 47, p. 552–561, 2015.
R1A111	TANSKANEN, Pia. Management and recycling of electronic waste. <i>Acta materialia</i> , [s. l.], v. 61, n. 3, p. 1001–1011, 2013.
R1A114	BESIOU, Maria; VAN WASSENHOVE, Luk N. Closed-loop supply chains for photovoltaic panels: A case-based approach. <i>Journal of Industrial Ecology</i> , [s. l.], v. 20, n. 4, p. 929–937, 2016.

APÊNDICE B – BUSINESS MODEL CANVAS: (Re)Energia

Figura 4 – Business Model Canvas da (Re)Energia



APÊNDICE C – MINIMUM VIABLE PRODUCT: (Re)Energia

Figura 5 – Página inicial

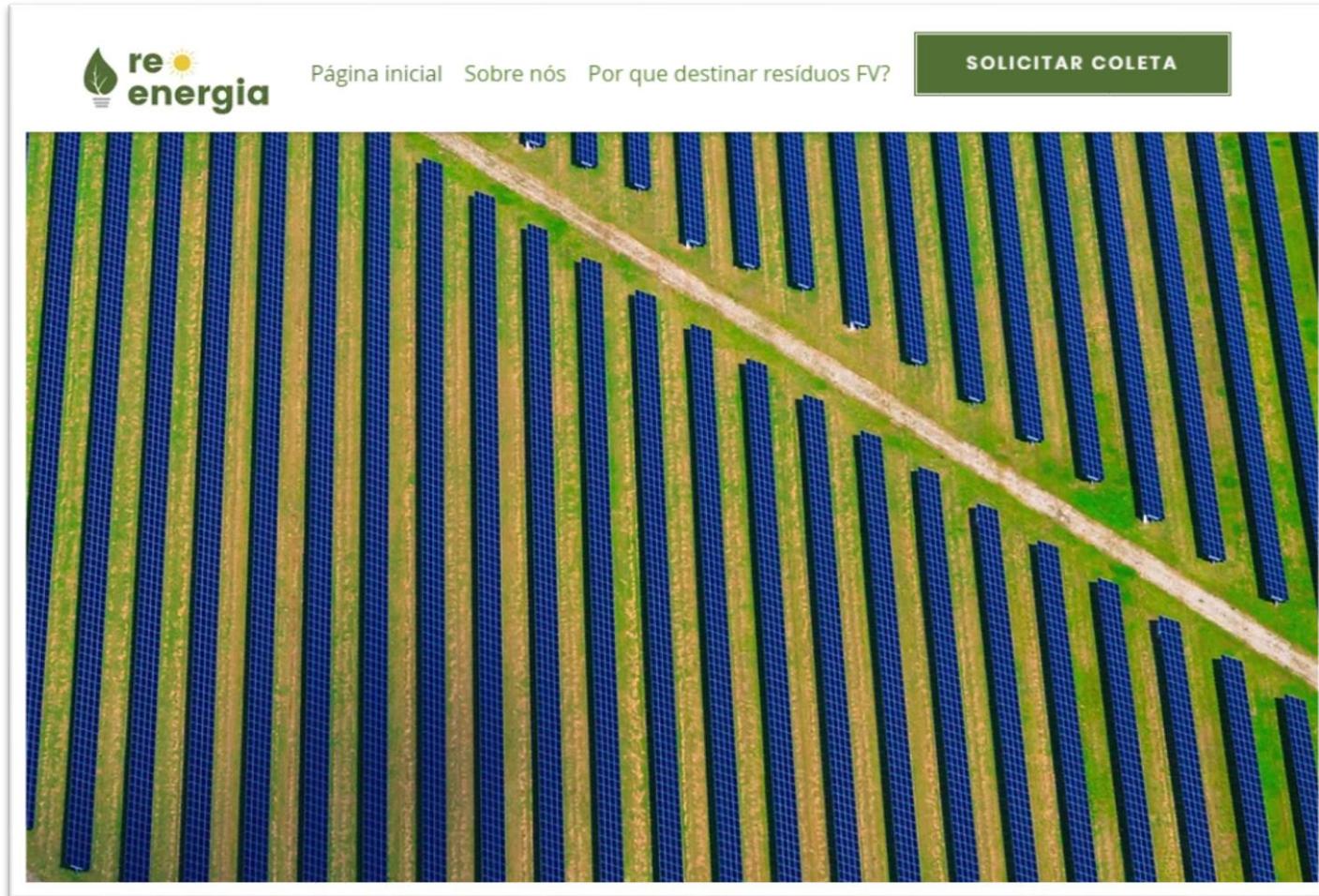


Figura 6 – Página “Quem somos nós?”

The image shows a webpage layout for 're energia'. At the top left is the logo, which consists of a green leaf and a yellow sun above the text 're energia'. To the right of the logo are navigation links: 'Página inicial', 'Sobre nós', and 'Por que destinar resíduos FV?'. Further right is a dark green button with the white text 'SOLICITAR COLETA'. The main heading is 'Quem somos nós?' in a large, bold, green font. Below this heading are four distinct sections, each with an icon and a text block. The first section has a green leaf icon and text about being the link between consumer and waste disposal. The second has a lightbulb with a leaf icon and text about specialized services for photovoltaic system end-of-life. The third has a green recycling symbol icon and text about reverse logistics for damaged equipment. The fourth has a yellow sun icon and text about contributing to a sustainable circular economy.

re energia

[Página inicial](#) [Sobre nós](#) [Por que destinar resíduos FV?](#) [SOLICITAR COLETA](#)

Quem somos nós?

Somos o **elo** entre o consumidor e o **destino correto de** resíduos fotovoltaicos.

Uma empresa especializada em **desinstalar, recolher e destinar corretamente** seu Sistema Fotovoltaico em final de vida útil.

Realizamos a **logística reversa** de equipamentos novos e eficientes que são danificados durante o transporte e instalação.

Contribuímos com a **economia circular** do mercado Fotovoltaico em busca de um mundo mais **sustentável**.

Figura 7 – Página “Por que destinar corretamente os resíduos FV?”

re energia [Página inicial](#) [Sobre nós](#) [Por que destinar resíduos FV?](#) [SOLICITAR COLETA](#)

Por que destinar corretamente os resíduos fotovoltaicos?

A energia solar, por meio da tecnologia fotovoltaica, **crece exponencialmente** no decorrer dos anos no mundo inteiro. O volume de equipamentos fabricados e instalados cresce na mesma proporção.

De acordo com o International Renewable Energy Agency - IRENA, o acúmulo de resíduos de módulos, até 2030, é capaz de gerar **60 milhões de novos módulos**.

Considerando a presença de elementos químicos como **chumbo, cádmio, silício, germânio e lítio**, os quais, são **perigosos** tanto para o meio ambiente, quanto para a saúde humana, a destinação correta desses equipamentos é de suma importância para trazer ainda mais **sustentabilidade** à esta **fonte de energia renovável**.

A **(Re)Energia** foi idealizada no intuito de facilitar a destinação correta desses resíduos, visando contribuir para o equilíbrio ambiental e para a **circularidade do setor**.

Figura 8 – Página “Solicitar coleta”

re energia

Página inicial Sobre nós Por que destinar resíduos FV? SOLICITAR COLETA

PASSO 01: Dados pessoais

SOLICITAÇÃO DE COLETA DE RESÍDUOS FOTOVOLTAICOS

Nome Completo * CPF *

Código * Telefone *

BR +55

Email * Endereço do Cliente *

Endereço da Instalação *

Cidade * Região/Estado/Provincia *

Região/Estado/Provincia

Código postal (CEP) * País *

xxx xxx-xx

re energia

Página inicial Sobre nós Por que destinar resíduos FV? SOLICITAR COLETA

PASSO 02: Destinação

Po favor, escolher pelo menos 01 opção das seguintes abaixo: *

Quero destinar os módulos.

Quero destinar o(s) inversor(es).

Quero destinar a estrutura.

PROSSEGUIR

PASSO 03: Especificação

Preencher apenas se destinar os **módulos** foi selecionado.

Quantos Módulos? Marca?

Qual a potência dos Módulos? Quanto tempo de instalação?

NUP: 23081.009161/2023-14

Prioridade: Normal

Homologação de ata de defesa de TCC e estágio de graduação

125.322 - Bancas examinadoras de TCC: indicação e atuação

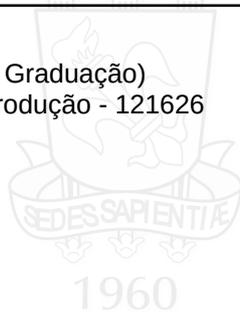
COMPONENTE

Ordem	Descrição	Nome do arquivo
4	Trabalho de conclusão de curso (TCC) (125.32)	TCC 2 _versão final_Julia Possebon Spellmeier.pdf

Assinaturas

30/01/2023 20:21:04

JULIA POSSEBON SPELLMEIER (Aluno de Graduação)
07.09.08.01.0.0 - Curso de Engenharia de Produção - 121626



Código Verificador: 2317025

Código CRC: 721f62f1

Consulte em: <https://portal.ufsm.br/documentos/publico/autenticacao/assinaturas.html>

