

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
*CAMPUS* LITORAL NORTE  
DEPARTAMENTO INTERDISCIPLINAR  
ENGENHARIA DE GESTÃO DE ENERGIA

MARTINA RÖNNAU

**CADEIA PRODUTIVA DO SETOR SOLAR FOTOVOLTAICO NO  
BRASIL: TENDÊNCIAS DE INOVAÇÃO**

Tramandaí

2023

MARTINA RÖNNAU

## **CADEIA PRODUTIVA DO SETOR SOLAR FOTOVOLTAICO NO BRASIL: TENDÊNCIAS DE INOVAÇÃO**

Este trabalho foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da atividade de ensino “Trabalho de Conclusão de Curso”, do Departamento Interdisciplinar e aprovado em sua forma final pelo(a) Orientador(a) e pela Banca Examinadora.

Orientador(a): Prof(a). Dr(a) Aline Cristiane Pan, UFRGS

Doutora pela Universidade Politécnica de Madri – Madri, Espanha.

Co-Orientador(a): Prof(a). Dr(a) Juliana Klas, UFRGS.

Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre, Brasil.

Banca Examinadora:

Prof(a). Dr(a). Gabriela Pereira da Silva Maciel, UFRGS.

Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil.

Prof. Dr. Néstor Fabián Ayala, UFRGS.

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil.

**Coordenador(a) COMGRAD-EGE:** \_\_\_\_\_

**Prof(a). Dr(a). Gabriela Pereira da Silva Maciel**

Tramandaí-RS, 13 de abril de 2023.

# CADEIA PRODUTIVA DO SETOR SOLAR FOTOVOLTAICO NO BRASIL: TENDÊNCIAS DE INOVAÇÃO

Martina Rönnau – martina.ronnau20@gmail.com

Aline Cristiane Pan – alinecpan@gmail.com

Juliana Klas – juliana.klas@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento Interdisciplinar – Engenharia de Gestão de Energia.

## Resumo.

A geração solar fotovoltaica é atualmente o segundo recurso energético mais utilizado pelo sistema elétrico brasileiro, e cresce exponencialmente a cada ano. Devido a esta expansão, ocorre paralelamente o crescimento da cadeia produtiva fotovoltaica no Brasil, que tem contribuído para agregar valor ao setor através das empresas integradoras. O desenvolvimento de um componente ou produto é possível devido à sua cadeia produtiva. Cadeia produtiva é o conjunto de atividades econômicas que envolvem a produção, distribuição e comercialização de um determinado produto ou serviço, desde a extração de matérias-primas até a entrega do produto final ao consumidor. Apesar da expansão da cadeia produtiva do setor fotovoltaico no Brasil, acredita-se que ainda existam potencialidades de desenvolvimento e inovação. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é descrever dados de referenciais bibliográficos para realizar uma análise crítica da cadeia produtiva da fonte solar fotovoltaica no Brasil, com intuito de propor tendências de inovação para o segmento. O estudo auxilia na gestão de mercado ao mostrar o atual cenário brasileiro e também colabora com a cadeia de valor da indústria fotovoltaica. As empresas integradoras são as responsáveis por fazer a interface entre as distribuidoras de equipamentos, os agentes de financiamentos e os clientes interessados na tecnologia fotovoltaica, e que possuem maior democratização do acesso ao emprego. Propostas de inovação são colocadas, como o investimento na qualificação das empresas integradoras a partir de indicadores, o desenvolvimento de serviços de desativação e reciclagem do sistema fotovoltaico, além de ações beneficentes através da reutilização de módulos menos eficientes em locais públicos.

**Palavras-chave:** Energia Solar, tendências de inovação, cadeia produtiva

## Abstract.

Photovoltaic solar generation is currently the second most used energy resource by the Brazilian electricity system and grows exponentially every year. Due to this expansion, the growth of the photovoltaic production chain in Brazil is in parallel, which has contributed to adding value to the sector through integrating companies. The development of a component or product is possible thanks to its production chain. Productive chain is the set of economic activities that involve the production, distribution and marketing of a particular product or service, from the extraction of raw materials to the delivery of the final product to the consumer. Despite the expansion of the production chain of the photovoltaic sector in Brazil, it is believed that there is still potential for development and innovation. Thus, the objective of this work is to describe data from bibliographic references to perform a critical analysis of the production chain of photovoltaic solar source in Brazil, in order to propose innovation trends for the segment. The study helps in market management by showing the current Brazilian scenario and also collaborates with the value chain of the photovoltaic industry. The integrating companies are responsible for making the interface between the equipment distributors, the financing agents and the customers interested in photovoltaic technology, and that have greater democratization of access to employment. Innovation proposals are placed, such as investment in the qualification of integrating companies from indicators, the development of deactivation and recycling services of the photovoltaic system, as well as charitable actions through the reuse of less efficient modules in public places.

**Keywords:** Solar Energy, innovation trends, productive chain

## 1. INTRODUÇÃO

A energia é um elemento essencial em nosso dia a dia, impulsionando o desenvolvimento humano e contribuindo para o crescimento econômico e a produtividade (FAUSTINO, 2022). A energia solar fotovoltaica é uma das formas mais abundantes de energia em toda a superfície terrestre, e é inesgotável em uma escala de tempo humana. Pode ser empregada em todo território nacional, em áreas rurais e urbanas, produzindo eletricidade limpa e renovável a partir da irradiância do Sol. Dessa forma, diferentemente das fontes de energia tradicionais, como o carvão e o petróleo, a produção de energia solar fotovoltaica não emite gases de efeito estufa e não polui o ambiente, contribuindo para a criação de uma nova matriz energética de geração de eletricidade no Brasil (VILLALVA, 2012).

Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica estão cada vez mais presentes na sociedade, pois contribuem para a política de mitigação das mudanças climáticas, a diversificação e descarbonização do setor de energia, além de garantir a segurança energética (FRANCO *et al.*, 2021). A utilização da energia solar fotovoltaica no Brasil apresenta um grande potencial, na qual através da geração distribuída os sistemas solares são instalados em telhados de casas e edifícios comerciais. A partir dela, os consumidores e empresas têm a capacidade de produzir sua própria eletricidade, o que traz mais autonomia e independência para o setor energético ao reduzir a dependência das distribuidoras de energia, evidenciando assim, sua relevância para o desenvolvimento do país (PINHO *et al.*, 2014). O Brasil, no entanto, não participa do desenvolvimento de grande parte dos componentes necessários para a implementação de um sistema fotovoltaico conectado à rede, importando-os. O volume de importação em 2022 apresentou um crescimento de 71% em relação a 2021 (GREENER, 2023b).

O desenvolvimento de um componente ou produto é possível devido à sua cadeia produtiva. A cadeia produtiva é um conjunto de atividades interligadas que envolve o desenvolvimento de um produto, desde a aquisição da matéria-prima até a entrega ao consumidor final. As etapas, quando bem gerenciadas, contribuem para aumentar a eficiência e a competitividade, reduzir os custos e agregar valor à determinado produto em questão (NÚÑEZ, 2018).

A China é um exemplo de país que apostou em uma política pública de desenvolvimento da cadeia produtiva. O país participa nas cadeias de produção globais da indústria eletroeletrônica de consumo, com especial atenção à questão da agregação de valor. Assim, o país progrediu na hierarquia das cadeias de valor, afastando-se do papel de simples montador contratado, responsável por atividades rotineiras e menos qualificada para ser uma líder na criação de valor. Atualmente, o país detém a liderança no mercado internacional de exportação de equipamentos fotovoltaicos, graças à sua cadeia produtiva completa (MORAIS, 2012).

No Brasil, o setor do agronegócio é um exemplo de cadeia produtiva que agrega valor. Ao longo dos anos, a agricultura brasileira tem crescido significativamente, tornando-se um setor de importância crucial para o desenvolvimento do país, sendo um dos principais pilares da economia e gerador de empregos. A soja é o principal item de exportação (SOARES, 2015). A cadeia produtiva da soja é uma das mais importantes no mundo, com uma estrutura bem definida e eficiente (DE MELLO *et al.*, 2020).

Em fevereiro de 2023, a fonte de energia solar fotovoltaica alcançou uma potência instalada de 26GW, representando 12% da matriz elétrica, de acordo com a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR, 2023a). Essa fonte renovável é atualmente o segundo recurso mais utilizado pelo sistema elétrico brasileiro. Devido a esta expansão ocorre paralelamente o crescimento da cadeia produtiva fotovoltaica no Brasil, que tem contribuído para agregar valor ao setor através das empresas integradoras. Por meio da disseminação da geração de empregos, da redução dos custos com energia elétrica tanto para a população quanto para as empresas, da produção de energia limpa, renovável e sustentável, da diversificação da matriz energética brasileira e, conseqüentemente, do cumprimento das metas de redução de emissões. Esses fatores são fundamentais para a evolução deste mercado e tornam a energia solar fotovoltaica uma tendência promissora (GARLET, 2021).

Investir em tendências no setor fotovoltaico é importante para aprimorar a vantagem competitiva das empresas integradoras, impulsionar o avanço de novas tecnologias e explorar novos mercados para ampliar as operações. Além disso, é importante otimizar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos para reduzir os custos operacionais e contribuir para impactos ambientais positivos que ajudem a acelerar a transição rumo a uma economia mais sustentável. Por fim, o setor é beneficiado por incentivos governamentais que oferecem incentivos fiscais e financeiros para empresas e consumidores que investem em energia solar, através de políticas públicas, como a isenção de impostos e a criação de linhas de crédito. É crucial que o Brasil invista em tendências de inovação no setor fotovoltaico para garantir seu desenvolvimento contínuo (TATAGIBA, 2023). Além disso, é importante que o país estimule a criação de empregos e renda, além de se preparar para qualificar profissionais da área. Isso requer a expansão de instituições de ensino e agentes de capacitação, de forma a garantir que o país esteja pronto para lidar com as demandas do mercado solar (GIZ, 2021).

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é descrever dados de referenciais bibliográficos para realizar uma análise crítica da cadeia produtiva da fonte solar fotovoltaica no Brasil, com intuito de propor tendências de inovação para o segmento. O estudo auxilia na gestão de mercado ao mostrar o atual cenário brasileiro e também colabora com a cadeia de valor da indústria fotovoltaica.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Setor Solar Fotovoltaico no Brasil**

A energia solar fotovoltaica é produzida por meio do efeito fotovoltaico, o qual permite a transformação direta da energia solar em energia elétrica por meio de células fotovoltaicas. Essa fonte de energia é considerada altamente promissora para aumentar a oferta de eletricidade no mundo com impacto ambiental reduzido. A geração da energia solar fotovoltaica centralizada é a forma mais convencional de produzir energia elétrica, utilizando grandes fontes geradoras que abastecem o consumidor através de linhas de transmissão e distribuição. Por outro lado, a geração distribuída (GD) se baseia na utilização de fontes geradoras próximas ao consumidor, permitindo que o excedente seja encaminhado para a rede de transmissão (GASPARIN, 2022).

A utilização de sistemas de geração distribuída contribui para aliviar a demanda no Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), o que resulta em economia de água nas hidrelétricas e redução do uso de termelétricas poluentes.

Isso leva a uma economia financeira, beneficiando inclusive aqueles cidadãos que não investiram previamente em energia solar (OTTONELLI *et al.*, 2021).

De acordo com o Relatório de Status Global Renovável - REN21 (*Renewable Global Status Report*) no ano de 2021, o Brasil experimentou um aumento significativo de 27% em seu investimento total em energias renováveis, alcançando um valor de US\$ 11,6 bilhões. Esse aumento superou o registrado durante o auge dos biocombustíveis em 2008. Enquanto isso, o investimento em todas as outras tecnologias diminuíram em 38%. Especificamente, o investimento em energia solar fotovoltaica foi impulsionado em parte pelas baixas taxas de juros decorrentes da pandemia de COVID-19 e pelos preços elevados da eletricidade devido à pior seca em quase um século. Além disso, os leilões, que foram interrompidos em 2020 devido à pandemia, foram retomados em 2021, o que contribuiu para o aumento do investimento em energia eólica e solar fotovoltaica.

Nos últimos anos, a crescente adoção de práticas de Sustentabilidade, Social e Governança (*Environmental, Social and Governance - ESG*) tem impulsionado a expansão do mercado de energia solar fotovoltaica. Essa tendência se deve em grande parte à busca por fontes renováveis de energia e à transição energética em curso (HIOKI, 2022). Devido à sua localização geográfica, o país recebe altos índices de incidência de radiação solar, que são relativamente uniformes em todo o território nacional. Isso torna possível desenvolver projetos solares viáveis em diversas regiões, tornando a fonte solar, por meio de sistemas fotovoltaicos, uma alternativa competitiva no fornecimento de energia. Além disso, essa fonte de energia pode contribuir com os compromissos nacionais de redução de gases de efeito estufa (EPE, 2020).

A partir de 17 de abril de 2012, com a implementação da Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL (ANEEL, 2012), os consumidores brasileiros têm a capacidade de gerar sua própria eletricidade a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada, bem como fornecer o excesso de energia produzido de volta à rede de distribuição local, de forma descentralizada, o que permite maior autonomia de suprimento de energia. Essas inovações são conhecidas como Micro e Minigeração Distribuídas de Energia Elétrica, e representam uma união entre economia financeira, consciência socioambiental e sustentabilidade (ANEEL, 2022). O sistema de compensação adotado é o *net metering*, ou seja, garantiu que consumidores de energia elétrica possam utilizar a energia ativa gerada para abater, no todo ou em parte, seu consumo de energia elétrica em residências, comércios ou indústrias. Esses créditos podem ser acumulados e aplicados em futuras contas de luz, permitindo ao consumidor economizar em sua fatura de energia. É uma das principais formas de impulsionar a produção de energia elétrica por meio de fontes renováveis, sendo um modelo amplamente adotado em muitos países.

Os sistemas de minigeração fotovoltaica são instalados em consumidores comerciais e industriais, enquanto os sistemas de microgeração são instalados em telhados de residências, empresas e shoppings centers, permitindo que os consumidores sejam autossuficientes em energia elétrica e atendem completamente às suas necessidades de consumo (VILLALVA, 2012). A microgeração distribuída é caracterizada por uma central geradora com capacidade de até 75 quilowatts (KW) instalados, enquanto a minigeração distribuída se refere a uma capacidade acima de 75 KW e menor ou igual a 5 MW. Ambas são conectadas à rede de distribuição através de unidades consumidoras instaladas (ANEEL, 2022). A potência da GD é ilustrada na Fig. 1, na qual o crescimento é impulsionado principalmente pela microgeração, representando 85% da capacidade instalada (GREENER, 2022a).

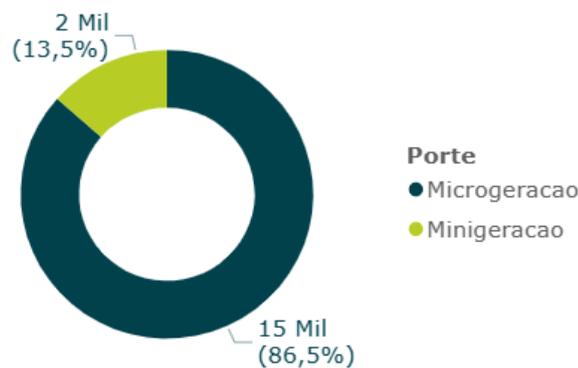


Figura 1 - Potência instalada em MW da micro e minigeração distribuída (GREENDEX, 2023).

No dia 07 de janeiro de 2022, a Lei 14.300/2022 da ANEEL foi aprovada, trazendo avanços significativos para a geração distribuída. Essa legislação, com vigência a partir de 06 de janeiro de 2023, teve um papel fundamental na evolução do mercado de energia do país, ao democratizar o uso da energia solar, estimular a geração de empregos e impulsionar o desenvolvimento do setor. (GREENER, 2022a).

A mudança na legislação foi responsável pelo rápido crescimento do setor fotovoltaico no Brasil em 2022, o que resultou em uma “corrida ao sol”, termo utilizado para se nomear o fenômeno. Dentre várias proposições, a nova lei alterou a maneira como a energia injetada na rede é creditada. Para projetos iniciados após 12 meses da aprovação da lei, a lei prevê um período de transição até 2029, o tempo de retorno do investimento é maior, os proprietários de mini e micro sistemas de geração elétrica pagam tarifas e encargos pelo uso dos sistemas de transmissão e distribuição, bem como pelos custos de operação, manutenção e depreciação dos equipamentos, refletindo na atratividade e rentabilidade de sistemas fotovoltaicos. No entanto, quem instalou até sistemas até 06 de janeiro de 2023 terá até 2045 o direito adquirido

conforme a Resolução Normativa nº 482/2012, ou seja, os micros e minigeradores existentes só pagarão os componentes da tarifa pela diferença positiva entre a energia consumida e a gerada e injetada na rede de distribuição.

Apesar de a regra de transição determinar um pagamento gradual da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) para compensar a utilização da rede elétrica, os sistemas de geração fotovoltaica ainda são atraentes para o consumidor final, visto que o impacto na rentabilidade do investimento é baixo, especialmente para sistemas de geração local, que representam 81% da capacidade instalada. O crescimento exponencial da geração solar fotovoltaica proporciona maior segurança, qualidade e confiabilidade ao sistema elétrico do país, ao mesmo tempo em que se torna um fator estratégico para o progresso econômico da nação (GASPARIN, 2022).

A introdução de fontes limpas de energia na GD não apenas melhora o bem-estar e a qualidade de vida, mas também descentraliza a produção de energia, possibilitando que a eletricidade seja gerada próximo ao local de consumo. Isso alivia a carga nas linhas de transmissão e nos sistemas de distribuição (VILLALVA, 2012). A partir dos dados fornecidos pela plataforma *Greendex* (2023), a Fig. 2 ilustra a progressão da GD da fonte solar fotovoltaica no Brasil entre 2012 e fevereiro de 2023. Em 2022 houve um aumento de 75% na capacidade acumulada em relação a 2021. Ainda, a quantidade de instalações de energia solar fotovoltaica cresceu em 84,9% em comparação com 2021, chegando a 1,6 milhão de instalações em todo o país (GREENER, 2023a).

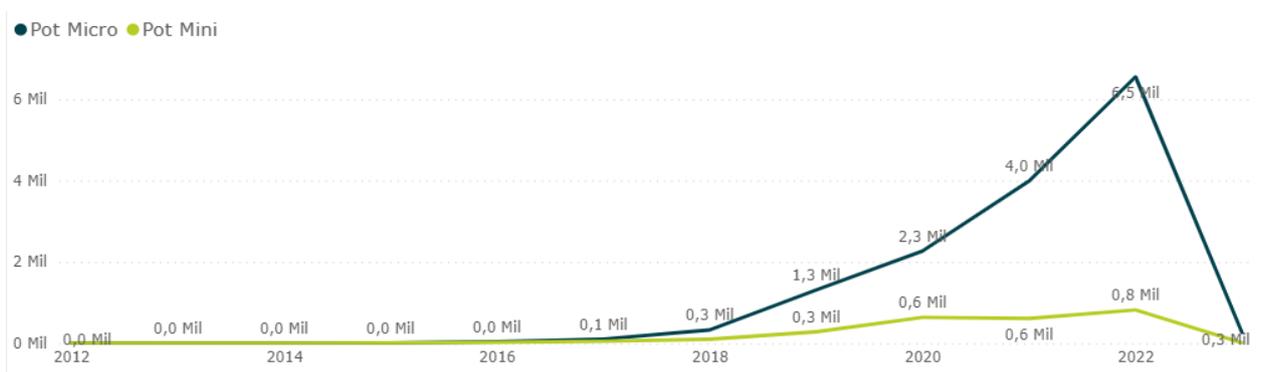


Figura 2 - Evolução da potência instalada da micro e minigeração distribuída (GREENDEX, 2023).

## 2.2 Agregação de valor na cadeia produtiva do Setor Solar Fotovoltaico

O conceito de cadeia produtiva refere-se a um conjunto de atividades econômicas inter-relacionadas, que ocorrem em etapas consecutivas. Durante esse processo, há a transformação de insumos em produtos, adicionando valor a cada etapa, até que o produto final chegue ao consumidor. A cadeia produtiva é utilizada como uma abordagem sistêmica, que considera a interconexão dos atores econômicos em um fluxo de materiais, capital e informação, permitindo uma análise conjunta do processo produtivo (NÚÑEZ, 2018).

As cadeias produtivas são compostas por conexões técnicas, econômicas, sociais e políticas, em que o nível de engajamento entre seus elementos é o que define sua organização e gestão. Portanto, uma cadeia produtiva é formada por um conjunto de conexões recíprocas baseadas em interesses compartilhados e complementares. Cada cadeia produtiva tem sua própria trajetória, resultante de interações que vão além das meras transações econômicas (BEGNIS, 2007).

Durante seus estudos sobre vantagem competitiva, Michael Porter desenvolveu o conceito de cadeia de valor como um sistema de atividades interdependentes que são executadas para projetar, produzir, comercializar, entregar e sustentar um produto. A cadeia de valor foca principalmente a vantagem competitiva gerada pelas atividades da empresa e sua evolução ocorre por meio da identificação dos ganhos gerados pelas inter-relações com participantes externos à indústria (PORTER, 1989, p. 46 apud MOSTARDEIRO *et al.*, 2019).

A cadeia de valor ilustra as atividades que agregam valor à empresa, refletindo o preço que os clientes estão dispostos a pagar pelos seus produtos ou serviços. Essencialmente, é um diagrama personalizado para cada negócio, delineando as suas operações e subdividindo-as em elementos interconectados que evidenciam a sequência de processos. Por conseguinte, representa um sistema de informação e valores organizacionais (VARGAS *et al.*, 2013). Essa ferramenta ajuda a compreender como as empresas podem criar e manter valor para seus clientes. Ao fazer isso, a cadeia de valor pode se tornar uma fonte de vantagem competitiva para a empresa (RICCIOTTI, 2020). De acordo com HANSEN (2007), se todos os elos da cadeia de valor estiverem alinhados e trabalhando juntos de forma eficiente, a empresa terá uma maior probabilidade de inovar e lançar produtos e serviços inovadores no mercado.

A cadeia de valor para um sistema fotovoltaico engloba as diversas etapas envolvidas na entrega do sistema aos consumidores, incluindo fabricação, distribuição, integração, aquisição e desativação do sistema ao final de sua vida útil. Cada etapa envolve a participação direta de diversos agentes, bem como o envolvimento indireto de outros atores no setor (GREENER, 2022a). A cadeia de valor focaliza principalmente a obtenção de vantagem competitiva por meio das atividades relacionadas ao setor de energia solar fotovoltaica, cuja progressão depende da identificação dos benefícios decorrentes das interações com atores externos, seja através da relação com fornecedores ou com consumidores (MOSTARDEIRO *et al.*, 2019). A Fig. 3 mostra detalhadamente a cadeia de valor descrita por GARLET (2021) que foi

utilizada como a principal base neste estudo, visto que traz de forma ampla a complexidade da geração distribuída de energia solar fotovoltaica, dividida em segmentos usualmente utilizados na literatura.

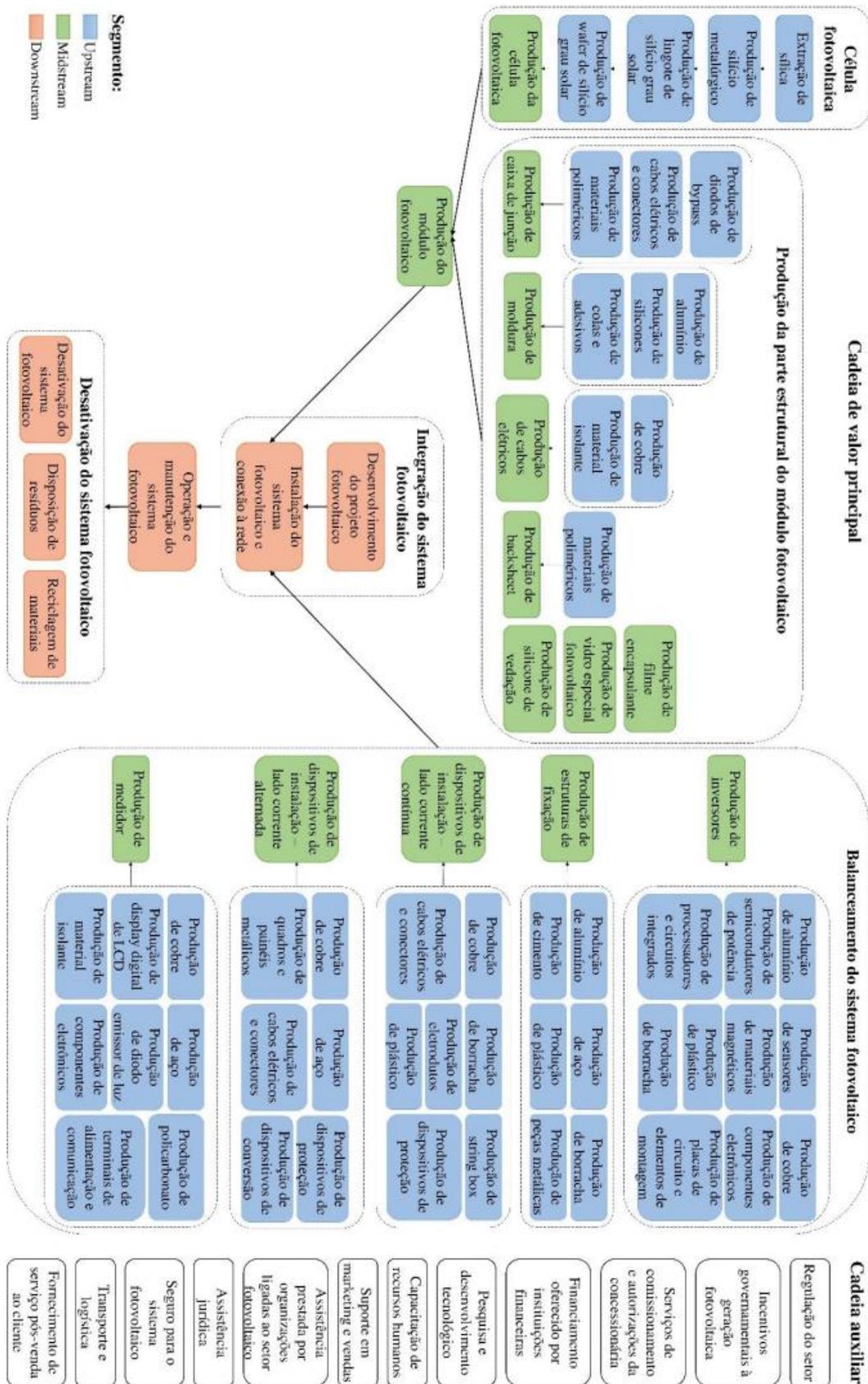


Figura 3 - Complexidade da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica no Brasil (GARLET, 2021).

De forma geral, a cadeia produtiva é definida através de atividades com quatro subníveis, sendo eles o nível 1 (chamado na literatura de *upstream*), nível 2 (chamado de *midstream*), nível 3 (chamado de *downstream*) e cadeia de valor auxiliar. De acordo com SEBRAE (2018), GARLET (2021), ALMARSHOUD (2021) esses termos são frequentemente usados em negócios e indústrias para descrever diferentes estágios do processo de produção, distribuição e entrega de bens e serviços. A descrição dos componentes para cada nível está apresentada no Apêndice 1.

O nível 1 refere-se ao estágio inicial do processo de produção, onde a matéria-prima é extraída, produzida e fornecida aos fabricantes. O segundo nível refere-se ao estágio intermediário do processo de produção, que inclui o processamento, transporte e armazenamento de matérias-primas, componentes e produtos semiacabados. Já o nível 3 refere-se ao estágio final do processo de produção, onde os produtos finais são produzidos e distribuídos. A cadeia de valor auxiliar, também conhecida como atividades de suporte, são as atividades que apoiam as atividades primárias em uma empresa na criação e entrega de produtos ou serviços aos clientes. Essas atividades de suporte não estão diretamente envolvidas na produção, mas são fundamentais para garantir que as atividades primárias possam ser executadas de maneira eficiente e eficaz (GARLET, 2021).

Para o setor solar fotovoltaico, o primeiro nível é composto por empresas com habilidades tecnológicas avançadas e especializadas, que requerem altos investimentos em instalações e equipamentos. Como resultado, a entrada nesse mercado é altamente restrita, pois somente empresas com uma receita operacional significativa podem competir nesse segmento da cadeia de valor (LEE *et al.*, 2017). Este nível na indústria solar fotovoltaica é responsável por todas as etapas que ocorrem antes da fabricação da célula solar fotovoltaica, incluindo a produção de matérias-primas e componentes necessários para a fabricação do módulo fotovoltaico. Isso inclui a extração de matérias-primas como a sílica, que é usada para produzir o silício cristalino usado nas células solares. Com isso, este segmento é fundamental para garantir a disponibilidade de matérias-primas e componentes necessários para a fabricação de células solares e módulos fotovoltaicos, e desempenha um papel crítico na cadeia de valor da indústria solar fotovoltaica (GARLET, 2021).

O nível 2 constitui a parte central da cadeia, engloba a produção da célula fotovoltaica, caixa de junção, moldura, cabos elétricos, filme encapsulante, vidro especial fotovoltaico, silicone de vedação e módulo fotovoltaico. 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 (GARLET, 2021).

O nível 3 é uma etapa crucial na indústria fotovoltaica, pois é responsável por garantir que os sistemas fotovoltaicos sejam instalados, operados e mantidos corretamente, garantindo a eficiência e a durabilidade do sistema. 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. Ainda, engloba a operação e manutenção do sistema fotovoltaico envolvendo atividades como limpeza dos módulos, inspeção dos cabos e conexões elétricas, monitoramento do desempenho do sistema e reparos necessários para garantir o máximo desempenho do sistema fotovoltaico. A desativação do sistema fotovoltaico e a disposição de resíduos são processos importantes para garantir a segurança e minimizar os impactos ambientais. Quando um sistema fotovoltaico atinge o fim de sua vida útil, é importante que ele seja desativado e os componentes sejam corretamente descartados (GARLET, 2021).

Ainda, para complementar, a cadeia de valor auxiliar fornece suporte para a execução das atividades da estrutura principal e garante a interação entre diferentes empresas e organizações visando o desenvolvimento do setor fotovoltaico (GARLET, 2021).

### 2.2.2 Custos e Impactos da Implementação do Sistema Solar Fotovoltaico Conectados à Rede

A faixa de variação dos custos de investimento em sistemas fotovoltaicos é ampla e depende de vários fatores, como a localização, configuração, tipos e tamanho do sistema (EPE, 2018). A redução dos custos totais instalados da energia solar fotovoltaica está relacionada a vários fatores, como a otimização dos processos de fabricação, redução dos custos de mão-de-obra e aumento da eficiência dos módulos. Conforme os desenvolvedores de projetos adquirem mais experiência e as cadeias produtivas se expandem em diversos mercados, os custos dos componentes do sistema diminuem. Como resultado, há um aumento no número de mercados em que os sistemas fotovoltaicos estão se tornando mais competitivos em termos de custo (IRENA, 2021).

De acordo com a Fig. 4, é possível perceber que em todos os países representados, a maior parte dos custos do sistema solar fotovoltaico são oriundos dos módulos fotovoltaicos e da instalação do sistema. As diferenças de custo por país persistem, não apenas para os módulos e inversores, mas também para os componentes de equilíbrio do sistema - (*balance of system* - BoS)<sup>1</sup>. As reduções globais de custo para módulos e inversores foram responsáveis por 61% da queda média ponderada global do custo total instalado entre 2010 e 2021, o que significa que os custos de componentes de equilíbrio do sistema também são um importante fator na queda dos custos totais globais instalados. Durante esse período, 14% da redução global veio de custos de instalação mais baixos, 7% de *racks*, 3% de outros componentes de *hardware* (como cabos e caixas de junção) e 16% de diversas categorias menores (IRENA, 2021). As razões para a redução de custos nos componentes de equilíbrio do sistema estão relacionadas à competição no mercado e à experiência crescente dos instaladores, o que levou a processos de instalação aprimorados e a custos de desenvolvimento mais baixos. Esses custos também diminuíram proporcionalmente com a área da planta (IRENA, 2021).

<sup>1</sup> O equilíbrio do sistema (BoS) engloba todos os componentes de um sistema fotovoltaico, exceto os módulos fotovoltaicos. Isso inclui fiação, interruptores, um sistema de montagem, um ou mais inversores solares, um banco de baterias e um carregador de bateria.

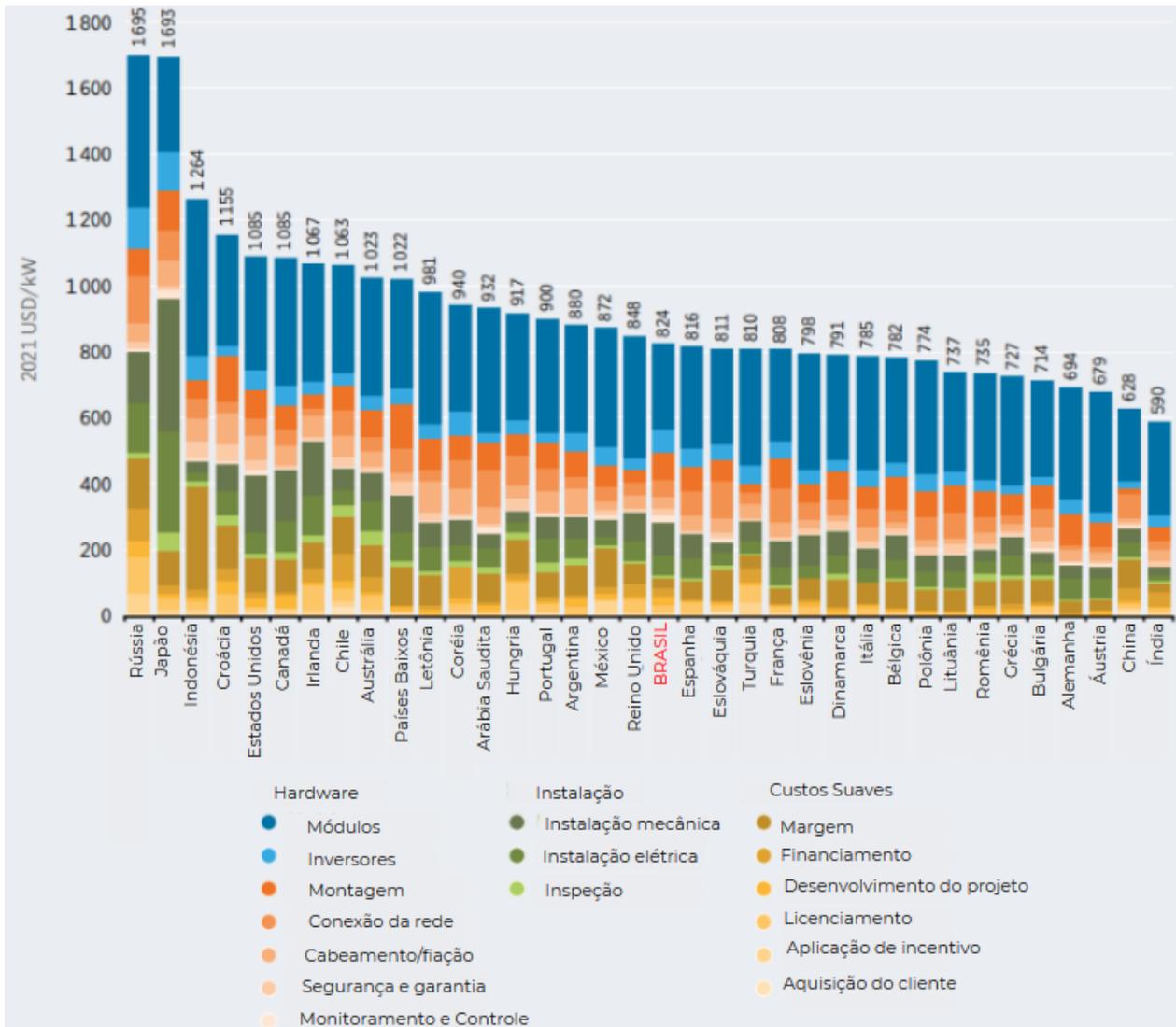


Figura 4 - Detalhamento dos custos totais instalados de energia solar fotovoltaica por país (Adaptado de IRENA, 2021).

O Brasil apresenta um custo intermediário em relação a outros países no que diz respeito ao sistema fotovoltaico. Cerca de 25% a 30% dos custos são provenientes do módulo e do inversor, o que não é considerado alto em comparação com outros países. Além disso, o custo do Brasil é aproximadamente a metade do custo da Rússia, que possui o sistema fotovoltaico mais caro. Entretanto, é importante ressaltar que o Brasil apresenta um custo cerca de 30% maior em relação aos países produtores de componentes fotovoltaicos, como China e Índia, que possuem sistemas fotovoltaicos com preços mais acessíveis. O Brasil está em uma boa posição, apesar de não ser um grande desenvolvedor de tecnologia fotovoltaica.

Em 2022, o aumento dos preços dos módulos no Brasil foi influenciado por vários fatores, incluindo os preços internacionais, além da pandemia de Covid-19 e a valorização do câmbio, que resultaram em aumentos nos impostos e no frete internacional (GREENER, 2023b). A Fig. 5 mostra a evolução do preço do módulo no Brasil, visto que apresentou queda ao longo de 2022, com redução do custo total de 20% de janeiro de 2023 comparado a janeiro de 2022. Em janeiro de 2023, houve uma diminuição média de 21% nos preços médios dos kits em comparação com o mesmo mês do ano anterior. Essa queda foi impulsionada pela baixa demanda por sistemas fotovoltaicos no início do ano, devido às alterações nas regras de crédito e à redução do financiamento nas vendas (GREENER, 2023b).

A rentabilidade do investimento em geração própria de energia é impulsionada pela alta qualidade dos recursos energéticos nacionais, bem como pelas elevadas tarifas finais de eletricidade e um modelo de compensação de créditos extremamente favorável (EPE, 2020). Considerando a revisão do mecanismo de compensação para micro e minigeradores distribuídos no início da década de 2020, que inclui fatores econômicos como o aumento da renda das famílias e a expectativa de redução nos custos das tecnologias, estima-se que a geração distribuída alcançará uma capacidade instalada de 28 GW a 50 GW em 2050 correspondendo a uma parcela de 4% a 6% da carga total (EPE, 2020).

De acordo com a Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA), o número de empregos em energias renováveis em todo o mundo deverá chegar a cerca de 30 milhões até 2030 e 42 milhões até 2050. A energia solar fotovoltaica é a tecnologia que mais emprega trabalhadores, com cerca de 4,3 milhões de pessoas empregadas em 2021 (IRENA, 2022). A Fig. 6 ilustra a evolução do emprego global em energia renovável por tecnologia, mostrando que a energia solar fotovoltaica apresentou um crescimento ainda maior em relação às outras tecnologias entre 2021 e 2022.

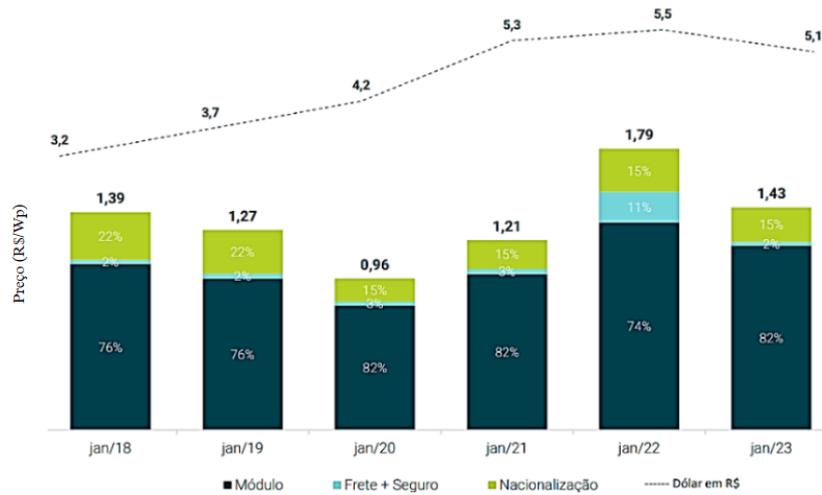


Figura 5- Custos dos módulos fotovoltaicos no Brasil (R\$/Wp) (GREENER, 2023b).



Figura 6- Evolução do emprego global em energia renovável por tecnologia, 2021-2022 (Adaptado de IRENA, 2022a).

O setor de energia demanda trabalhadores significativamente mais capacitados do que a média da economia como um todo. A Fig. 7 evidencia que os trabalhos gerados serão mais técnicos, como por exemplo: de instalação, digitalização, etc. A criação de novos projetos de energia, bem como a produção de seus componentes, é a principal força motriz para o emprego dentro do setor, respondendo por mais de 60% das vagas (IEA, 2022).

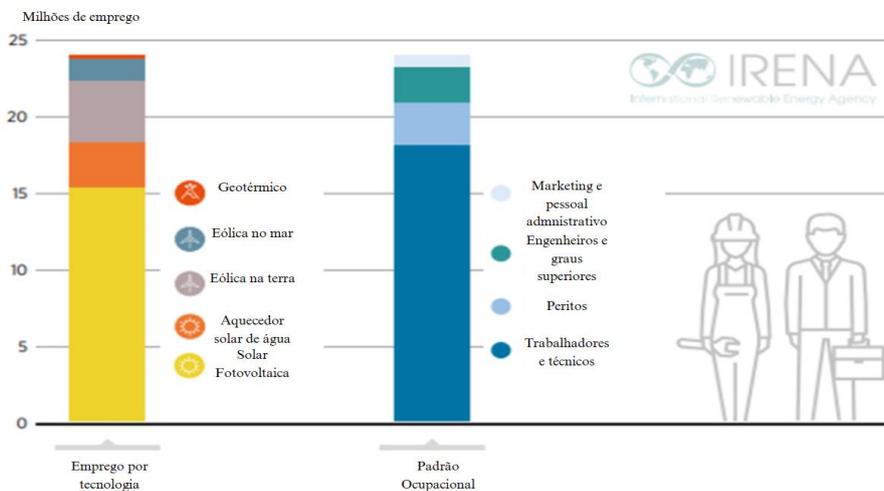


Figura 7- Empregos de energia renovável, 2050, por tecnologias selecionadas e categorias ocupacionais (Adaptado de IRENA, 2022a).

### 3. METODOLOGIA

Inicialmente realizou-se uma revisão bibliográfica sobre as principais teorias e conceitos a respeito dos temas abordados, onde as plataformas de pesquisa, como Google acadêmico, Scopus, Catálogo de Teses e Dissertações e Scielo, foram utilizadas. Buscaram-se palavras chaves como “energia solar fotovoltaica no Brasil”, “cadeia produtiva” e “tendências do setor fotovoltaico”, bem como seus correlatos em inglês. Além disso, foram empregados estudos específicos do setor como o da GREENER (empresa que realiza assessoria para impulsionar oportunidades e resultados na geração distribuída), através de plataformas com bancos de dados relevantes capazes de auxiliar a cadeia solar na elaboração de estratégias de negócios e tomada de decisões, como a Greendex, que disponibiliza o mapeamento da geração distribuída por meio do Microsoft Power BI e da ANEEL.

A análise crítica da agregação de valor na cadeia produtiva do setor solar fotovoltaico foi realizada por meio de artigos, dissertações e teses que continham cadeias produtivas já descritas. A principal base utilizada foi a tese de doutorado intitulada “Diagnóstico da competitividade da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica”, desenvolvida por Taís Bisognin Garlet em 2021 no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFRGS.

Após a revisão teórica, resumiu-se os principais conceitos estudados através da construção de um fluxograma, realizado com o *lucidchart* (2008), um aplicativo de diagramação online que facilita a criação e o compartilhamento de diagramas. Considerou-se os integradores como o ponto focal do trabalho, visto que é onde se concentram as empresas ativas no Brasil, e mais está gerando valor na cadeia produtiva do setor fotovoltaico. Para facilitar o entendimento do desenvolvimento da cadeia produtiva foi realizado um glossário com os principais conceitos abordados no fluxograma apresentado no Apêndice 1.

A identificação de tendências de inovação foi realizada através da descrição da cadeia auxiliar para agregar valor à geração fotovoltaica, com o intuito de apoiar a execução das atividades da cadeia produtiva principal, que permite a troca de conhecimentos técnicos e informações de mercado, além de ganhos de escala e competitividade. Assim, foram definidas suas principais atividades secundárias que garantem maior confiabilidade e segurança ao cliente através da oferta de serviços especializados e qualificados. Ao perceber as demandas atuais do setor fotovoltaico, com o objetivo de promover um desenvolvimento sustentável e eficiente, foram apresentadas propostas inovadoras para aprimoramentos a serem realizados.

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este item abordará os resultados da pesquisa e os seus desdobramentos, divididos em dois tópicos: Cadeia Produtiva para o Setor de Energia Solar Fotovoltaica para o Brasil e Tendências de Inovação para Setor de Energia Solar Fotovoltaica para o Brasil.

#### 4.1. Cadeia Produtiva para o Setor de Energia Solar Fotovoltaica para o Brasil

O foco do estudo são os agentes responsáveis por fazer a interface entre as distribuidoras de equipamentos, os agentes de financiamentos e os clientes interessados na tecnologia, ou seja, os integradores fotovoltaicos. As empresas integradoras de sistemas fotovoltaicos desempenham uma série de atividades, incluindo o diagnóstico e projeto de um sistema, que envolvem a orientação dos módulos, a disponibilidade de espaço, a estética, a disponibilidade de recursos solares, a demanda a ser atendida e vários outros fatores (PINHO *et al.*, 2014).

Através das atividades realizadas, este segmento está gerando o maior valor no Brasil. Com o objetivo de oferecer um serviço de alta qualidade aos clientes e agregar valor ao mercado, as empresas integradoras estão constantemente buscando aprimorar suas habilidades e especializações. Elas são fundamentais por terem em suas equipes profissionais altamente capacitados para lidar com as regulamentações e requisitos técnicos impostos pelas concessionárias de energia elétrica e pelos órgãos reguladores. Ao facilitar o acesso à tecnologia solar para consumidores residenciais, comerciais e industriais, as empresas integradoras são cruciais para agregar valor ao mercado (PINHO *et al.*, 2014).

O Brasil possui 31.510 integradores ativos, a maioria (cerca de 85%) têm até nove colaboradores. Essa proporção está crescendo e aumentou em 15% em relação a 2021. Menos de 2% das empresas têm mais de 50 colaboradores. Isso mostra a oportunidade que há espaço para novos participantes no setor, mesmo com a grande parte iniciando com uma estrutura pequena (GREENER, 2023b).

Ainda é insuficiente a presença de mulheres em empresas de integração no setor de energia solar fotovoltaica, pois representam apenas 20% dos empregos do setor e estão concentrados nas áreas administrativa, financeira e de recursos humanos (GREENER, 2023b). Por outro lado, conforme foi exposto na Fig. 5 a concentração futura de empregos se dará em cargos técnicos, justamente contrário a realidade atual das mulheres do setor. É essencial que o Brasil promova a equidade de gênero no contexto do crescente mercado de energia solar, visto que isso é fundamental para o desenvolvimento do setor e pode gerar a criação de centenas de milhares de empregos. Além disso, as empresas brasileiras estão na contramão do que se considera como soluções inteligentes, pois a diversidade permite que surjam um “dividendo de inovação”, o que converge em equipes mais inteligentes e criativas, abrindo a porta para novas descobertas e soluções ao ampliar os pontos de vista (NIELSEN *et al.*, 2017).

A cadeia produtiva do setor solar é consideravelmente representativa, composta por diversos elos interdependentes, como fabricantes de componentes, importadores, montadores, integradores, consumidores e empresas de manutenção e reciclagem. Essas etapas formam uma série de atividades econômicas interconectadas que ocorrem de

forma sequencial e foram concebidas com base no contexto brasileiro. Cada uma dessas fases possui atividades que contribuem para a agregação de valor ao setor de energia solar fotovoltaica.

A Fig. 8 mostra o foco da cadeia produtiva da energia solar fotovoltaica proposto neste trabalho. O sentido montante refere-se ao nível 1 (*upstream*), ou seja, as etapas da cadeia produtiva que ocorrem anteriormente a um determinado ponto (integrador), como os insumos utilizados na fabricação de bens ou serviços e a sua importação e montagem, enquanto que o sentido jusante refere-se ao nível 3 (*downstream*), ou seja, as atividades econômicas que ocorrem posteriormente do integrador, com a distribuição de bens ou serviços finais aos consumidores. Em outras palavras, o sentido montante se concentra no fornecimento de insumos e materiais, enquanto o sentido jusante está relacionado à venda e distribuição de produtos acabados. A diferenciação deste estudo se dá através da construção de uma avaliação crítica da cadeia produtiva do setor fotovoltaico no Brasil, enquanto GARLET demonstra a competitividade da cadeia.

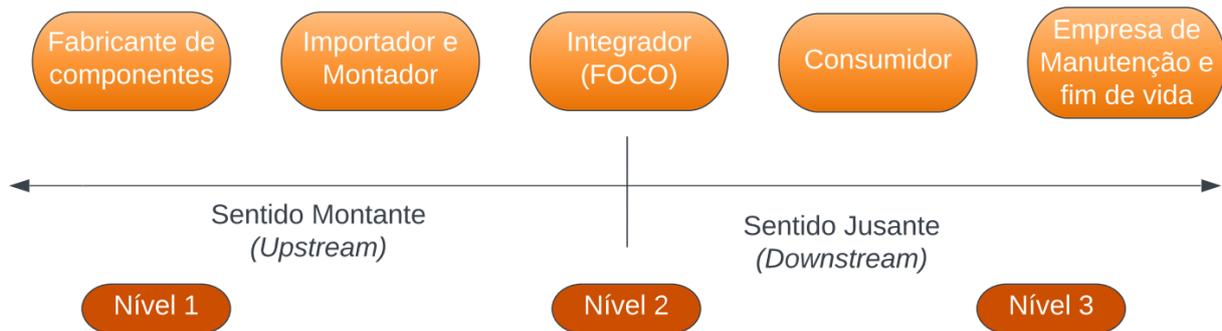


Figura 8 - Cadeia produtiva da Energia Solar Fotovoltaica (elaborado pela autora).

Para uma explicação ampla e sucinta, foi apresentado na Fig. 9 um fluxograma que descreve a cadeia produtiva do setor fotovoltaico, incluindo as atividades que agregam valor. Cada uma dessas atividades desempenha um papel crucial no crescimento do setor fotovoltaico no Brasil, contribuindo para o desenvolvimento do país. Ainda, mostra através das setas uma série de conexões mutuamente dependentes, que são baseadas em interesses compartilhados e complementares. Todos os conceitos dos componentes descritos na cadeia estão apresentados em formato de glossário no Apêndice 1.

O nível 1 engloba a fabricação de componentes com elos que envolvem desde a produção do módulo, inversor, sistema de armazenamento, *string box*, dispositivos de proteção, medidor, sistema de monitoramento até a estrutura de fixação. Além disso, este segmento constitui a parte de importador e montador do sistema fotovoltaico, responsável pela montagem e distribuição dos equipamentos. O nível 2 envolve a parte central da cadeia, engloba o integrador do sistema, composta pela venda, desenvolvimento de projeto e instalação de sistemas. Ainda, abrange atividades mais diretamente ligadas ao consumidor final, que é o prossumidor de energia, com elos que vão desde o gerador, distribuidor e comercializador. O nível 3, por sua vez, refere-se às empresas de manutenção e fim de vida, responsáveis pelo descomissionamento, reciclagem e reutilização do sistema fotovoltaico.

No entanto, no Brasil não há desenvolvimento no primeiro e terceiro nível, somente as atividades de aplicação (*midstream*) da cadeia produtiva são inteiramente realizadas por mão de obra nacional e representam a maior parte dos empregos gerados atualmente (GIZ, 2021). É necessário que o governo ofereça mais incentivos à cadeia produtiva do setor solar fotovoltaico, de modo que esta possa se consolidar. Uma política industrial competitiva e justa seria fundamental para a redução dos preços de componentes e equipamentos produzidos. Em março de 2023, havia 103 fabricantes cadastrados no FINAME do BNDES que produziam kits de sistemas solares fotovoltaicos, 11 fabricantes de inversores fotovoltaicos, 8 de rastreadores solares, 7 de módulos fotovoltaicos, 1 de bateria e 1 de *string box*.

A tecnologia e os recursos disponíveis no primeiro nível brasileiro ainda não alcançaram a maturidade necessária para competir com a indústria asiática. Embora o Brasil seja o segundo maior produtor de silício, com grandes reservas e conte com empresas que extraem sílica e produzem silício metálico, não há produtores de silício purificado com qualidade solar no país. Além disso, as empresas nacionais encontram limitações em termos de competitividade superior em relação às empresas estrangeiras devido aos riscos regulatórios e ambientais. Como resultado, o país perde a oportunidade de desempenhar um papel mais ativo e relevante no comércio internacional deste setor conforme indicado pelo Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE) em 2018.

As empresas brasileiras apresentam uma alta competência na exploração de sílica, destacando-se na oferta de areia industrial. Demonstram experiência em se adaptar rapidamente às variações do mercado, e em desenvolver soluções que satisfaçam as demandas de seus clientes. O Brasil pode aproveitar essa vantagem e se tornar um exportador para a China, já que a indústria fotovoltaica do país asiático é vulnerável economicamente devido à sua dependência de fornecedores estrangeiros de silício. Entretanto, deve-se considerar a questão ambiental relacionada à mineração de sílica no país, pois as partículas emitidas por essa atividade podem se acumular nas folhas das plantas, prejudicando a fotossíntese e a respiração e representando um grave problema para a natureza (GARLET, 2021).

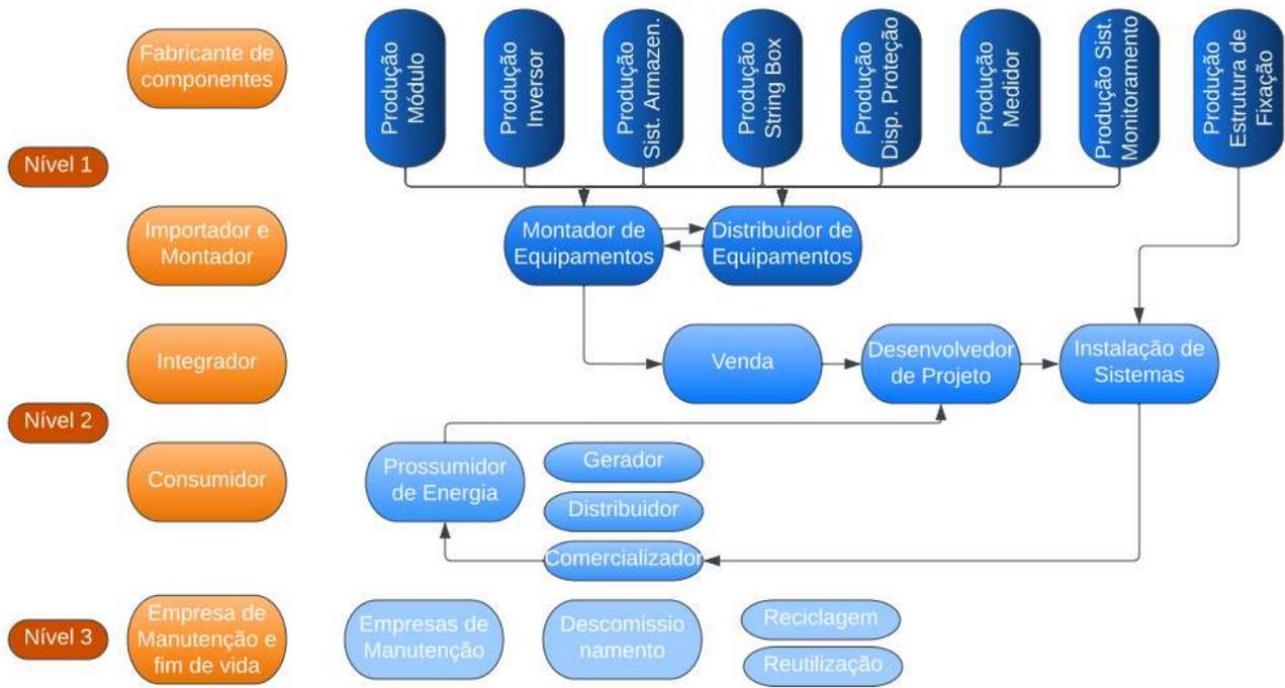


Figura 9 - Fluxograma da cadeia produtiva da Energia Solar Fotovoltaica (Adaptado de GARLET, 2021; GIZ, 2021; SEBRAE, 2018).

A intensidade das importações de equipamentos necessários para a geração fotovoltaica pode ser um fator determinante para explicar a taxa de crescimento mais elevada desta forma de energia. Isso ocorre porque, ao dar preferência às importações, há uma diminuição significativa na necessidade de mão de obra para a produção desses itens, já que esses dados incorporam empregos indiretos ao longo da cadeia produtiva. A maior parte desses equipamentos é importada devido à sua melhor qualidade, que é alcançada principalmente no exterior, especialmente na China, onde a cadeia de produção é completa. No Brasil, é considerado inviável desenvolver completamente a cadeia produtiva, o que pode levar a equipamentos mais caros e de qualidade inferior (SANTOS, 2023).

Devido aos altos custos de produção, carga tributária elevada, falta de incentivos para o desenvolvimento da cadeia produtiva e altos custos de energia elétrica, o Brasil enfrenta dificuldades em competir efetivamente no mercado internacional. A fim de impulsionar a indústria nacional de silício de grau solar e fomentar a geração de empregos, é crucial que o país implemente uma reforma tributária, que assegure maior igualdade tributária entre produtos nacionais e importados, e estabeleça incentivos para o desenvolvimento de pesquisas e tecnologias locais. Além disso, é essencial garantir preços competitivos de matérias-primas e consolidar um setor de Pesquisa e Desenvolvimento (GARLET, 2021).

No segundo nível é possível observar um elevado valor agregado, acompanhado de um aumento no número de empresas ativas, o que tem levado a um aumento na concorrência. Vale ressaltar que a maior parte das empresas neste segmento é especializada verticalmente, desenvolvendo projetos fotovoltaicos e sendo responsáveis pela instalação de sistemas (GARLET, 2021).

No terceiro nível da cadeia produtiva, que diz respeito às empresas de manutenção e fim de vida, é importante destacar-se, no Brasil, a Lei nº 12.305/2010 da Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS). Essa legislação introduziu a Logística Reversa, que é uma ferramenta de desenvolvimento econômico e social que abrange uma série de ações para facilitar a coleta e a devolução de resíduos sólidos ao setor empresarial. Além disso, a PNRS também estabeleceu o princípio da Responsabilidade Compartilhada pelo Ciclo de Vida dos Produtos, o que significa que os resíduos podem ser reaproveitados dentro do mesmo ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou ainda receber uma destinação final ambientalmente adequada. Seu objetivo é minimizar a quantidade de resíduos sólidos e rejeitos gerados, além de reduzir os impactos negativos na saúde humana e na qualidade ambiental decorrentes do ciclo de vida dos produtos, conforme estabelecido por esta lei. Estudos da IRENA (2016) indicam que as medidas fundamentais para solucionar a situação consistem na adoção da política de gestão de resíduos conhecida como os 3Rs (reduzir, reutilizar e reciclar), conforme mostra a Fig. 10.

Os princípios dos 3Rs podem ser aplicados aos módulos fotovoltaicos, seguindo a estrutura de uma economia circular. A opção preferencial é a redução de material nos módulos fotovoltaicos, aumentando assim sua eficiência. O forte crescimento do mercado, a escassez de matérias-primas e a pressão para reduzir os preços dos módulos fotovoltaicos estão impulsionando a produção em massa de forma mais eficiente, resultando na redução no uso de materiais, substituições de materiais e novas tecnologias mais eficientes. A opção de reutilização segue a opção de redução, englobando diferentes formas de reparo e reutilização. A reciclagem é a opção menos preferida (além do descarte) e é utilizada somente após o esgotamento das duas primeiras opções. Nesse caso, ocorre o processamento e tratamento dos

módulos fotovoltaicos, liberando matérias-primas que podem ser utilizadas na fabricação de novos módulos fotovoltaicos ou em outros produtos (IRENA, 2016).



Figura 10 - Diagrama de fluxo de processo das fases do ciclo de vida para painéis fotovoltaicos e oportunidades resultantes para redução, reutilização ou reciclagem (Adaptado de IRENA, 2016).

## 4.2. Tendências de Inovação para Setor de Energia Solar Fotovoltaica para o Brasil

O mercado de energia solar fotovoltaica no Brasil está em contínuo progresso e evolução, motivado pela crescente busca por fontes de energia limpa e renovável. Conseqüentemente, novas tendências de inovação surgem na cadeia de valor auxiliar, dado que grande parte da cadeia produtiva não é desenvolvida no país. A produção de energia fotovoltaica lidera um novo mercado de matriz energética, sendo rapidamente adotada por empresas, empreendedores e consumidores finais. Esse mercado inovador busca constantemente por novas tendências em energia solar (DA SILVA *et al.*, 2022).

Alguns elos da cadeia de valor auxiliar são fundamentais para o setor fotovoltaico, tais como a regulação governamental do setor, incentivos para a geração de energia fotovoltaica, serviços de comissionamento e autorizações de distribuidoras de energia, financiamento de instituições financeiras, pesquisa e desenvolvimento tecnológico, capacitação de recursos humanos e suporte em marketing e vendas. Ademais, a assistência de organizações relacionadas à energia fotovoltaica, apoio jurídico, fornecimento de seguros para o sistema fotovoltaico, transporte e logística, e serviços de pós-venda para clientes são cruciais para reforçar a estrutura do setor, contribuindo para seu desenvolvimento e evolução (GARLET, 2021).

Com o aumento da adoção da GD de energia fotovoltaica, muitas instituições e empresas estão expandindo sua gama de soluções e áreas de atuação para explorar o mercado de energia renovável. Isso representa uma grande oportunidade de negócio com um potencial significativo de crescimento. Como resultado, todos os segmentos da cadeia auxiliar estão sendo observados no Brasil, conforme apontado pelo SEBRAE em 2018.

O mercado de energia está se adaptando a novas formas mais diretas e com melhor controle da rede, desde a geração até o consumo final. A automação e o controle de dados são etapas importantes nessa era de comunicação, e as redes de energia serão impactadas por essa transformação. Após a implementação, o controle proporcionará informações detalhadas sobre o consumo e a produção de energia, permitindo a otimização de gastos desnecessários e a previsão de possíveis problemas na rede, bem como falhas no fornecimento de energia decorrentes de acidentes. Diante dos desafios que precisam ser superados para atingir o objetivo de implementar um sistema de redes inteligentes em larga escala, torna-se inviável sua realização (COUTINHO *et al.*, 2022).

Entre as tendências de inovação está o desafio de tornar os integradores mais qualificados a partir de indicadores. Existem iniciativas que já estão acontecendo com esse propósito, como por exemplo o selo da ABSOLAR, um programa de certificação voluntário (ABSOLAR, 2023b). Também há o Selo + Energia Sustentável, uma iniciativa da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) em parceria com o Banco do Estado do Rio Grande do Sul (Barrisul) que tem como propósito desenvolver um Sistema de Avaliação inovador, uma plataforma para gestão de desempenho, bem como um Sistema Analítico de Performance (SiAP), a partir de Indicadores de Desempenho para qualificar e promover a rede da cadeia produtiva de energia solar fotovoltaica do Rio Grande do Sul (KLEIN, 2022).

O descarte dos módulos fotovoltaicos que não estão sendo utilizados ou são obsoletos é outra tendência, pois representam um obstáculo no presente e podem se tornar um grande problema no futuro, dado o crescente mercado da energia solar. Caso não haja uma estratégia robusta para conter o aumento do volume de resíduos provenientes desses equipamentos, a situação pode se agravar ainda mais (BUZANELLO, 2020).

As empresas de manutenção e fim de vida que realizam a desativação e reciclagem do sistema fotovoltaico possuem pouca existência no mercado. Como resultado, há uma crescente preocupação com a quantidade de resíduos fotovoltaicos gerados, tornando-se cada vez mais necessário implementar a gestão adequada de resíduos no futuro próximo (KONZEN, 2020). Com isso, dezenas de bilhões de módulos fotovoltaicos descartados resultam em um impacto ambiental significativo. No século XXI, o mundo terá que enfrentar o desafio de lidar com o descarte e reciclagem de equipamentos fotovoltaicos e com a crescente utilização de fontes solares, que apresentam maior variabilidade e menor previsibilidade na geração de energia elétrica em curto prazo (EPE, 2020).

A reciclagem de módulos fotovoltaicos pode recuperar materiais valiosos, como silício, prata e cobre, para uso na fabricação nacional ou venda no mercado de commodities. A recuperação desses recursos nacionalmente pode reduzir

a dependência de importações estrangeiras, diminuir as restrições de recursos e aumentar a autonomia do país. Além disso, a recuperação desses materiais pode reduzir a quantidade de resíduos gerados, os impactos ambientais e a energia necessária para minerar, transportar e refinar materiais virgens e fabricar novos módulos fotovoltaicos (CURTIS *et al.*, 2021).

Nos últimos anos, houve uma diminuição nos custos de operação e manutenção (O&M) de usinas solares fotovoltaicas em grande escala. Essa tendência foi impulsionada por melhorias na eficiência dos módulos solares, o que reduziu a área de superfície necessária para cada MW de capacidade instalada. Ao mesmo tempo, pressões competitivas e avanços na confiabilidade da tecnologia levaram a projetos de sistemas otimizados para reduzir os custos de O&M. Além disso, estratégias aprimoradas que incorporam uma série de inovações também contribuíram para reduzir os custos e minimizar o tempo de inatividade (IRENA, 2021). Como por exemplo, pode-se utilizar inovações, como drones para realizar inspeções aéreas e máquinas autônomas para a limpeza dos módulos a seco, a fim de reduzir os custos durante a vida útil do parque (EPE, 2018).

A criação de empregos qualificados é uma das principais formas de impulsionar o desenvolvimento econômico e social de um país. Empresas podem adotar a iniciativa de capacitação de trabalhadores em tecnologias fotovoltaicas, visando melhorar sua competitividade e promover a disseminação da geração distribuída a partir desta fonte de energia renovável (BRUNET *et al.*, 2021).

Existem várias maneiras de fomentá-los com por exemplo, incentivar à criação de cursos educacionais de capacitação voltadas ao setor fotovoltaico, estimular a inovação ao investir em pesquisa e desenvolvimento e criar um ambiente propício à criação de empresas e startups através do empreendedorismo. Ainda, é preciso fomentar a indústria, através de políticas públicas que incentivem o investimento em setores estratégicos, como a tecnologia, energia e infraestrutura, além de investir em infraestrutura por meio de transporte, energia, comunicações para melhorar a competitividade do país e atrair investimentos e empregos qualificados. É importante que as políticas públicas e as iniciativas privadas trabalhem em conjunto para criar um ambiente propício ao desenvolvimento econômico e social (BRUNET *et al.*, 2021).

Essas tendências de inovação estão ajudando a moldar o futuro do setor de energia solar fotovoltaica no Brasil e prometem trazer muitos benefícios para a população.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a revisão bibliográfica da cadeia produtiva do setor solar fotovoltaico no Brasil foi identificado os principais participantes envolvidos, juntamente com as atividades desempenhadas por cada um desses participantes ao longo de todo o processo da cadeia. Ao observar o conjunto de atividades que ocorrem em cada nível da cadeia produtiva do setor solar fotovoltaico, pode-se concluir que o Brasil precisa de incentivos, investimentos e desenvolvimento nas etapas de fabricação de componentes (enfrenta dificuldades em competir efetivamente no mercado internacional) e gerenciamento de fim de vida.

Outro ponto importante é que as empresas integradoras são o segmento que mais gera valor atualmente para o Brasil. Elas são responsáveis por ampliar o acesso às oportunidades de energia solar, seja por meio da geração de empregos ou da oferta de sistemas fotovoltaicos aos consumidores. É por meio dessas empresas que a energia solar se torna mais acessível e disponível para um público mais amplo.

Diante disso, é urgente adotar novas medidas e propostas que promovam o crescimento e desenvolvimento dos processos da cadeia produtiva, por meio de tendências inovadoras do setor. Essas tendências são cruciais para complementar os serviços oferecidos, especialmente porque grande parte da cadeia produtiva ainda não é desenvolvida no país. É necessário investir em soluções inovadoras e tecnológicas para impulsionar o desenvolvimento da indústria solar no Brasil e torná-la mais competitiva no mercado global. A partir do estudo apresentado, sugere-se como trabalho futuro, o detalhamento de cada uma das tendências de inovação com políticas que direcionam e impulsionam a mesma a partir da cadeia produtiva. É necessário investir em soluções inovadoras e tecnológicas para impulsionar o desenvolvimento da indústria solar no Brasil e torná-la mais competitiva no mercado global.

É fundamental a implantação de infraestrutura de coleta de resíduos e políticas de incentivo eficazes para solucionar esses problemas. No país, há uma oportunidade para melhorar a logística reversa dos sistemas fotovoltaicos por meio de aprimoramentos e incentivos, o que pode trazer benefícios tanto para o mercado fotovoltaico quanto para o meio ambiente. Com essas melhorias, o país pode aproveitar ao máximo as possibilidades de crescimento e desenvolvimento do setor fotovoltaico.

Além disso, considerando as mudanças que estão ocorrendo no setor fotovoltaico, o Brasil pode adotar ações benéficas através da reutilização de módulos menos eficientes em locais públicos, tais como hospitais e creches. Com base nessas informações, tornou-se possível apontar possíveis tendências de inovação para a cadeia produtiva brasileira. Por fim, o estudo desenvolvido contribui com a cadeia de valor do setor fotovoltaico, auxiliando na gestão de mercado da energia solar fotovoltaica.

O estudo apresentado pode servir de base para pesquisas futuras na área, que poderão aprofundar-se na análise das soluções viáveis para os segmentos em desenvolvimento na cadeia produtiva do país. Por exemplo, considerando o nível 1, no qual uma grande parte dos componentes fotovoltaicos é importada, além de pensar formas sustentáveis de aproveitar o potencial brasileiro para extrair matéria-prima utilizada nos módulos fotovoltaicos. Ao propor melhorias nesses aspectos, é possível gerar mais empregos no setor e contribuir para o seu crescimento no Brasil.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a família pelo apoio durante o processo de formação para chegar até a etapa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Gestão de Energia.

À orientadora Dra. Aline Cristiane Pan e a co-orientadora Dra. Juliana Klas pela oportunidade e apoio na elaboração deste trabalho.

À Dra. Ângela de Moura Ferreira Danilevicz pelas sugestões e revisões do conteúdo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 10899 - Energia solar fotovoltaica — Terminologia, 2013. Disponível em: [\(PDF\) NBR-10899 Projeto - Energia Solar - DOKUMEN.TIPS](#). Acesso em: 15 mar. 2023.
- ABSOLAR - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA, 2023a. Infográfico Absolar, 2023. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 05 jan. 2023.
- ABSOLAR - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA, 2023b. Certificado Absolar, 2023. Disponível em: <https://www.certificacaoabsolar.org.br/>.
- ALMARSHOUD, A.F., Adam, E. A transition toward localizing the value chain of photovoltaic energy in Saudi Arabia. *Clean Techn Environ Policy* 23, 2049–2059 (2021). Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-021-02102-2>. Acesso em: 18 jan. 2023.
- ANEEL, 2022. Geração Distribuída. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida> Acesso em: 14 jan 2023.
- ANEEL, 2023. Geração Distribuída. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiY2VmMmUwN2QtYWFiOS00ZDE3LWI3NDMtZDk0NGI4MGU2NTkxIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBiMSIsImMiOiR9>. Acesso em: 25 nov. 2022.
- BEGNIS, Heron Sergio Moreira *et al.*, 2007. Confiança, comportamento oportunista e quebra de contratos na cadeia produtiva do fumo no sul do Brasil. *Gestão & Produção*, v. 14, p. 311-322, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/gp/a/4TC448TzP4ZBJXjh66LDZmg/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 16 fev. 2023.
- BRUNET, C. *et al.*, 2021. Does solar energy reduce poverty or increase energy security? A comparative analysis of sustainability impacts of on-grid power plants in Burkina Faso, Madagascar, Morocco, Rwanda, Senegal and South Africa. *Energy Research & Social Science*, v. 87, p. 10212, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620355657?via%3Dihub>. Acesso em: 06 mar. 2023.
- BUZANELLO, José Carlos, 2020.. A evolução da energia solar fotovoltaica no Brasil. Disponível em: <http://www.unirio.br/uniriosnct2010/unirio/ccjp/escola-de-administracao-publica/trabalhos-de-conclusao-de-curso-1/2020.1/TCCGloriaLeitedeAlmeidaMosqueira.pdf>. Acesso em: 08 mar. 2023.
- CATTELAN, Verônica Dalmolin *et al.* Desempenho do ecossistema de inovação do setor de energia solar fotovoltaica. 2019. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/20505>. Acesso em: 22 fev. 2023.
- COUTINHO, Rafael *et al.*, 2022. Implementação de redes inteligentes, seus benefícios e barreiras no mercado brasileiro. 2022. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/29033>. Acesso em: 05 mar. 2023.
- CURTIS, Taylor *et al.*, 2021. Best practices at the end of the photovoltaic system performance period. 2021. Technical Report NREL/TP-5C00-78678. 2021. Disponível em: <https://www.osti.gov/biblio/1765595/>. Acesso em: 23 fev. 2023.
- DA SILVA, Crisóstomo Hermes Soares Trajano *et al.*, 2022. Tendências de novas tecnologias da energia solar. *Brazilian Journal of Development*, p. 55730-55750, 2022. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/362550439\\_Tendencias\\_de\\_novas\\_tecnologias\\_da\\_energia\\_solar](https://www.researchgate.net/publication/362550439_Tendencias_de_novas_tecnologias_da_energia_solar). Acesso em: 06 mar. 2023.
- DE MELLO, Eliane Spacil; BRUM, Argemiro Luís. A cadeia produtiva da soja e alguns reflexos no desenvolvimento regional do Rio Grande Do Sul. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 10, p. 74734-74750, 2020. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/17723/14367>. Acesso em: 23 mar. 2023.
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2021. A mão de obra na cadeia produtiva do setor solar brasileiro. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/wp-content/uploads/2021/10/Estudo-Cadeia-Produtiva-Solar.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2022
- DINIZ, Jean. Metodologia para análise de investimento em sistemas fotovoltaicos considerando parâmetros de incerteza e métricas de risco. 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/RAOA-BBZN6N>. Acesso em: 27 fev. 2023.
- EPE, 2018. Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica no horizonte 2050. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/spe/publicacoes/estudos-do-pne-2050/02-relatorios-epe/04-premissas-e-custos-da-oferta-de-energia-eletrica-no-horizonte-2050-nt-pr-007-2018.pdf>. Acesso em: 03 fev 2023.
- EPE, 2020. Plano nacional de energia 2050. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>. Acesso em: 19 nov. 2022.
- FAUSTINO, Matheus Emanuel Batista. Energia fotovoltaica e suas contribuições para redução do impacto ambiental. 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/8732>. Acesso em: 06 mar. 2023.

- FRANCO, Maria A.; GROESSER, Stefan N. Uma revisão sistemática da literatura sobre a cadeia de valor solar fotovoltaica para uma economia circular. *Sustentabilidade*, v. 13, n. 17, p. 9615, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/17/9615>. Acesso em: 14 mar. 2023.
- FRAUNHOFER ISE, 2021. Photovoltaics report. Disponível em: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>. Acesso em: 01 dez. 2022.
- GARLET, Tais Bisognin. Diagnóstico da competitividade da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica. 2021. 184 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/235004>. Acesso em: 22 nov. 2022.
- GASPARIN, Fernanda Bach, 2022. A Influência de Políticas Públicas para o Progresso da Geração Solar Fotovoltaica e Diversificação da Matriz Energética Brasileira. *Revista Virtual de Química*, v. 14, n. 1, 2022. Disponível em: <https://rvq-sub.sbg.org.br/index.php/rvq/article/view/4250/918>. Acesso em: 05 mar. 2023.
- GREENDEX, 2023. Mapeamento GD. Disponível em: <https://www.greenindex.info/mapeamento-gd>. Acesso em: 13 fev. 2023.
- GREENER, 2022a. Estudo Estratégico Geração Distribuída. Disponível em: <https://www.greener.com.br/estudo/estudo-estrategico-geracao-distribuida-2022-mercado-fotovoltaico-1- semestre/>. Acesso em: 25 nov. 2022.
- GREENER, 2023a. Tendências 2023 Mercado Fotovoltaico. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=ZFnE3HRhG-s&t=2s>. Acesso em: 10 fev. 2023.
- GREENER, 2023b. Estudo Estratégico Geração Distribuída. Disponível em: [https://d335luupugsy2.cloudfront.net/cms%2Ffiles%2F12882%2F1677162509Estudo\\_Estratgico\\_Gerao\\_Distribuda\\_2023\\_-\\_Mercado\\_Fotovoltaico\\_-\\_Fevereiro.pdf?utm\\_campaign=estudo\\_gd\\_2s2022\\_fluxo\\_4&utm\\_medium=email&utm\\_source=RD+Station](https://d335luupugsy2.cloudfront.net/cms%2Ffiles%2F12882%2F1677162509Estudo_Estratgico_Gerao_Distribuda_2023_-_Mercado_Fotovoltaico_-_Fevereiro.pdf?utm_campaign=estudo_gd_2s2022_fluxo_4&utm_medium=email&utm_source=RD+Station). Acesso em: 23 fev. 2023.
- HANSEN, Morten T. *et al.*, 2007. The innovation value chain. *Harvard business review*, v. 85, n. 6, p. 121, 2007. Disponível em: [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/58832667/Aula04\\_-\\_Hansen.Birkinshaw.2007\\_-\\_The\\_innovation\\_value\\_chain.pdf?1554772048=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DThe\\_Innovation\\_Value\\_Chain.pdf&Expires=1678840485&Signature=MHYFiYg~8tEPB8arO](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/58832667/Aula04_-_Hansen.Birkinshaw.2007_-_The_innovation_value_chain.pdf?1554772048=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DThe_Innovation_Value_Chain.pdf&Expires=1678840485&Signature=MHYFiYg~8tEPB8arO). Acesso em: 14 mar. 2023.
- HIOKI, André Tsuyoshi; VON LINSINGEN, Celia Regina Dias; VILA, Clodomiro Unsihuay. Análise macroambiental do mercado de microgeração distribuída fotovoltaica no Brasil. *Revista da FAE*, v. 25, n. 1, 2022. Disponível em: <https://revistafae.fae.edu/revistafae/article/view/747/549>. Acesso em: 15 fev. 2023.
- [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA\\_Power\\_Generation\\_Costs\\_2021.pdf?rev=34c22a4b244d434da0accde7de7c73d8](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Power_Generation_Costs_2021.pdf?rev=34c22a4b244d434da0accde7de7c73d8). Acesso em: 03 fev. 2023.
- IEA, 2022. World Energy Outlook 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>. Acesso em: 04 dez. 2022.
- IRENA - International Renewable Energy Agency, 2021. Renewable power generation costs in 2021. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2022/Sep/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2022>. Acesso em: 13 nov. 2022.
- IRENA, International Renewable Energy Agency, 2016. End of Life Management: Solar Photovoltaic Panels. Disponível em: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA\\_IEAPVPS\\_End-of-Life\\_Solar\\_PV\\_Panels\\_2016.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf). Acesso em: 04 fev. 2023.
- KLEIN, Jefferson. 2022, set, 22. Selo + Energia Sustentável qualificará empresas do segmento solar fotovoltaico. *Jornal do Comércio*. Disponível em: <https://www.jornaldocomercio.com/economia/2022/09/865088-selo-energia-sustentavel-qualificara-empresas-do-segmento-solar-fotovoltaico.html>. Acesso em: 23 mar. 2023.
- KONZEN, Bárbara Anne Dalla Vecchia *et al.* Avaliação do Ciclo de Vida de painel fotovoltaico: análise dos impactos ambientais e fim de vida em estudo de caso no sul do Brasil. 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/39197>. Acesso em: 22 fev. 2023.
- LEE, K. et al. Exploring Suitable Technology for Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs) Based on a Hidden Markov Model Using Patent Information and Value Chain Analysis. *Sustainability*, v. 9, n. 7, p. 1-19, 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/9/7/1100>. Acesso em: 04 dez. 2022.
- LUCIDCHART, 2008. Software Incorporation. Disponível em: <https://www.lucidchart.com/pages/pt>. Acesso em: 25 fev. 2022.
- MARIANO, Juliana D'Angela; URBANETZ JUNIOR, Jair *et al.*, 2022. Energia solar fotovoltaica: Princípios fundamentais. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/359426299\\_Energia\\_solar\\_fotovoltaica\\_principios\\_fundamentais/citations](https://www.researchgate.net/publication/359426299_Energia_solar_fotovoltaica_principios_fundamentais/citations). Acesso em: 20 fev. 2023.
- MORAIS, Isabela Nogueira de. Cadeias produtivas globais e agregação de valor: a posição da China na indústria eletroeletrônica de consumo. 2012. Disponível em: [https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/6305/1/RTM\\_v4\\_n3\\_Cadeias.pdf](https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/6305/1/RTM_v4_n3_Cadeias.pdf). Acesso em: 21 mar. 2023.

- MOSTARDEIRO, Priscila Hoehr. Estudo do caso de falência da VARIG à luz da Cadeia de Valor de Porter. 2019. xviii, 175 f., il. Dissertação (Mestrado em Transportes) - Universidade de Brasília, Brasília, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/35303>. Acesso em: 09 fev. 2023.
- Nielsen, M. W. et al. Opinion: Gender Diversity Leads to Better Science. PNAS, v, 114, 1740, 2017.
- NÚÑEZ, Tarson. O mercado musical e a cadeia produtiva da música no RS. Indicadores Econômicos FEE, v. 45, n. 2, p. 97-110, 2018. Disponível em: <https://revistas.planejamento.rs.gov.br/index.php/indicadores/article/view/4041/3941>. Acesso em: 16 fev. 2023.
- OLIVEIRA, Elaine Vieira de. Processos de reciclagem de módulos fotovoltaicos de primeira geração. 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/65187>. Acesso em: 22 fev. 2023.
- OTTONELLI, Janaina *et al.*, 2021. Oportunidades e desafios do setor de energia solar fotovoltaica no Brasil. Revista Econômica do Nordeste, v. 52, n. 4, p. 8-26, 2021. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/revista/index.php/ren/article/view/1199/905>. Acesso em: 13 fev. 2023.
- PINHO, João Tavares *et al.*, 2014. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro, v. 1, p. 47-499, 2014. Disponível em: <http://cresesb.cepel.br/index.php?section=publicacoes&task=livro&cid=481>. Acesso em: 23 fev. 2023.
- PNRS, 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/112305.htm). Acesso em: 09 mar. 2023.
- PORTER, M. E. (1989). Vantagem Competitiva: Criando e Sustentando um Desempenho Superior, 27ª Edição, 512 p, Ed. Elsevier.
- REN21, 2022. Renewables 2022 global status report. Disponível em: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>. Acesso em: 01 dez. 2022.
- RICCIOTTI, Francesco. Da cadeia de valor à rede de valor: uma revisão sistemática da literatura. Management Review Quarterly, v. 70, n. 2, p. 191-212, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652613005118#preview-section-introduction>. Acesso em: 14 mar. 2023.
- SANTOS, Vitória Vieira dos, 2023. O crescimento da geração de energia solar fotovoltaica pela perspectiva da geração de empregos (2017-2022). 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/37141/1/CrescimentoGera%C3%A7%C3%A3oEnergia.pdf>. Acesso em: 28 fev. 2023.
- SEBRAE, 2022. Cadeia de Valor da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil. Disponível em: <https://www.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/Anexos/estudo%20energia%20fotovoltaica%20-%20baixa.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2022.
- SOARES, Tamires Camargo; JACOMETTI, Márcio. Estratégias que agregam valor nos segmentos do agronegócio no Brasil: um estudo descritivo. Revista eletrônica de estratégia & negócios, v. 8, n. 3, p. 92-120, 2015. Disponível em: <https://portaldeperiodicos.animaeducacao.com.br/index.php/EeN/article/view/2557/2588>. Acesso em: 22 mar. 2023.
- TATAGIBA, Lucas Magalhães. Energia fotovoltaica e o desafio da redução de impactos ambientais para o desenvolvimento sustentável no Brasil. 2023. Disponível em: <https://monografias.ufop.br/handle/35400000/5107>. Acesso em: 28 fev. 2023.
- VARGAS, Katiuscia de Fátima Schiemer et al. A cadeia de valores e as cinco forças competitivas como metodologia de planejamento estratégico. Revista Brasileira de Estratégia, v. 6, n. 1, p. 11, 2013. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Gilnei-Moura/publication/314431481\\_A\\_cadeia\\_de\\_valores\\_e\\_as\\_cinco\\_forcas\\_competitivas\\_como\\_Metodologia\\_de\\_planejamento\\_estrategico/links/59d103d74585150177f3cb99/A-cadeia-de-valores-e-as-cinco-forcas-competitivas-como-Metodologia-de-planejamento-estrategico.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Gilnei-Moura/publication/314431481_A_cadeia_de_valores_e_as_cinco_forcas_competitivas_como_Metodologia_de_planejamento_estrategico/links/59d103d74585150177f3cb99/A-cadeia-de-valores-e-as-cinco-forcas-competitivas-como-Metodologia-de-planejamento-estrategico.pdf). Acesso em: 09 fev. 2023.
- VEIKKA, Sarkkinen *et al.*, 2022. Considerações iniciais para um modelo de comércio p2p de eletricidade gerada a partir de energia solar fotovoltaica baseado na tecnologia blockchain, 2022. Disponível em: [http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:congresoCIBIM-2022UPMEspana-Sveikka/Abs\\_336\\_185965.pdf](http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:congresoCIBIM-2022UPMEspana-Sveikka/Abs_336_185965.pdf). Acesso em: 05 mar. 2023.
- VILLALVA, Marcelo Gradella. São Paulo: Érica, 2012. 1. ed.-224 p.il. Language: Portuguese, Base de dados: SABi - Catálogo da UFRGS. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. Acesso em: 28 fev. 2023.

## APÊNDICE 1 - GLOSSÁRIO DOS TERMOS DO FLUXOGRAMA UTILIZADO PARA CADEIA DE VALOR DE UM SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

**Sistema fotovoltaico** → Conjunto de elementos que geram e fornecem eletricidade pela conversão da energia solar (NBR 10899, 2013).

**Célula Fotovoltaica** → Dispositivo fotovoltaico elementar especificamente desenvolvido para realizar a conversão direta de energia solar em energia elétrica (NBR 10899, 2013).

**Módulo fotovoltaico** → Formado por células fotovoltaicas interconectadas em arranjos capazes de gerar tensão e corrente elétrica em quantidade suficiente para uso prático de energia. Além disso, o módulo também desempenha um papel importante na proteção das células (PINHO *et al.*, 2014).

**Painel fotovoltaico** → Um ou mais módulos fotovoltaicos interligados eletricamente, montados de modo a formar uma única estrutura (MARIANO *et al.*, 2022).

**Inversor** → conversor estático de potência que converte a corrente contínua do gerador fotovoltaico em corrente alternada (NBR 10899, 2013). É necessário nos sistemas fotovoltaicos para alimentar consumidores em corrente alternada a partir de energia elétrica de corrente contínua produzida pelo painel fotovoltaico ou armazenada na bateria (VILLALVA, 2012).

**Sistema de armazenamento/Bateria** → É um conjunto de células ou vasos eletroquímicos, conectados em série e/ou em paralelo, capazes de armazenar energia elétrica na forma de energia química por meio de um processo eletroquímico de oxidação e redução (redox) que ocorre em seu interior (PINHO *et al.*, 2014). O sistema de armazenamento, ou seja, as baterias são o elemento chave dos sistemas isolados, com o intuito de armazenar a energia para permitir o consumo nos momentos de baixa ou nenhuma radiação solar (MARIANO *et al.*, 2022).

**String box** → Componente responsável por proteger a parte de corrente contínua (CC) do sistema fotovoltaico, que conecta os cabos provenientes dos módulos fotovoltaicos ao inversor, além de fornecer proteção contra sobretensão e sobrecorrente e permitir o seccionamento do circuito.

**Dispositivos de proteção** → É fundamental para minimizar ou eliminar possíveis falhas. Além dos dispositivos de proteção que já vêm integrados aos equipamentos, é importante prever a instalação de outros dispositivos, tais como disjuntores, sistemas de proteção contra surtos (DPS), sistemas de aterramento e sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) (MARIANO *et al.*, 2022). Os dispositivos de proteção contra surtos têm a função de proteger as instalações elétricas, os equipamentos e as pessoas (VILLALVA, 2012).

**Medidor** → É um instrumento ou dispositivo utilizado para medir quantidades físicas, como corrente elétrica, tensão, entre outras grandezas. A medição dos dados solares consiste em obter experimentalmente o valor instantâneo da energia solar incidente (irradiância) ou integrada ao longo do tempo (irradiação), em intervalos que podem variar de minutos a anos ((PINHO *et al.*, 2014).

**Sistema de monitoramento** → Sistemas de comunicação entre os sistemas fotovoltaicos e centrais de controle permitem que os dados de desempenho sejam analisados, em alguns casos inclusive em tempo real, e ações sejam tomadas. Permitem a análise das informações provenientes da planta monitorada e a execução de eventuais ações preventivas, corretivas ou de otimização da operação (PINHO *et al.*, 2014).

**Estrutura de fixação** → A função é garantir a estabilidade dos módulos fotovoltaicos, ao mesmo tempo que permite uma ventilação adequada para dissipar o calor gerado pela exposição aos raios solares e as perdas na conversão de energia. Esse processo é crucial, uma vez que o aumento da temperatura pode diminuir a eficiência dos módulos, podendo afetar negativamente seu desempenho normal (PINHO *et al.*, 2014).

**Montador de equipamentos** → é o profissional que realiza a correta instalação do sistema solar fotovoltaico (incluindo inspeções e testes) no local definitivo, de maneira ágil, eficaz e segura (PINHO *et al.*, 2014).

**Distribuidores** → São os que compram grandes volumes dos fabricantes a preços menores e revendem a preços atrativos, os quais dificilmente seriam praticados caso as compras fossem de menor volume diretamente entre fabricantes e integradores (DINIZ, 2017).

**Integradores** → São as empresas responsáveis por realizar o projeto e a instalação dos sistemas fotovoltaicos. Destaca-se que sua função também é importante no sentido de divulgação do mercado fotovoltaico, uma vez que eles realizam a venda e a promoção do conceito de Geração Distribuída e do Sistema Solar Fotovoltaico (DINIZ, 2017).

**Venda** → É o ato de oferecer um produto ou serviço em troca de um pagamento. É uma transação comercial em que o vendedor oferece algo que o comprador precisa ou deseja, e o comprador paga um valor acordado pelo produto ou serviço adquirido (PINHO *et al.*, 2014).

**Desenvolvedor de projeto** → É o profissional que atua na elaboração e execução de projetos fotovoltaicos por meio de softwares, é responsável por desenvolver estratégias, administrar recursos, monitorar prazos e solucionar eventuais problemas. Tem a responsabilidade de assegurar que os projetos sejam finalizados dentro das limitações de custo e tempo, bem como atendam às exigências do cliente (DINIZ, 2017).

**Instalação de sistemas fotovoltaicos** → É o processo de colocar em prática um sistema que converte a energia solar em energia elétrica utilizável. Esses sistemas são compostos por componentes elétricos e mecânicos que trabalham juntos para gerar eletricidade a partir da luz do sol (DINIZ, 2017).

**Consumidor** → É o cliente final que concorda em celebrar um contrato de longo prazo, confiando no modelo do sistema solar fotovoltaico com a expectativa de que a tarifa de energia seja mais vantajosa do que a oferecida pela concessionária de energia elétrica (DINIZ, 2017).

**Prossumidor** → É a relação entre fornecimento e consumo. Após a instalação de equipamentos de geração que normalmente utilizam fontes renováveis, o consumidor pode enviar à rede da concessionária de energia o excedente de eletricidade gerado. Assim, o consumidor se torna um produtor e consumidor de energia fotovoltaica (CATTELAN, 2019).

**Gerador** → É um dispositivo que converte a energia da luz solar diretamente em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico. Ele é composto por células solares que capturam a luz solar e geram uma corrente elétrica contínua. São amplamente utilizados em aplicações de energia solar, como sistemas de energia solar residencial, comercial e industrial (DINIZ, 2017).

**Comercializador** → É uma empresa que atua como intermediário entre os produtores de energia solar e os consumidores finais. É responsável por garantir que a energia elétrica produzida pelos sistemas de energia solar seja transmitida de forma eficiente e segura para os consumidores finais, além de cuidar das questões burocráticas e regulatórias envolvidas na venda de energia (DINIZ, 2017).

**Empresa de manutenção e fim de vida** → São responsáveis pelo processo de operação e manutenção (O&M), incluindo-se a limpeza dos módulos, o monitoramento dos serviços e a substituição parcial de componentes quando necessário com o intuito de garantir o funcionamento ideal do sistema durante o tempo de vida útil estimado (OLIVEIRA, 2021).

**Descomissionamento** → Refere-se ao processo de desativação e remoção de um sistema de energia solar fotovoltaica de um local. Envolve a desconexão dos módulos solares, inversores, cabos e outros componentes elétricos, seguido da desmontagem e transporte desses materiais para reciclagem ou descarte adequado. É importante para garantir a segurança do local e minimizar o impacto ambiental causado pela presença de equipamentos solares desativados (OLIVEIRA, 2021).

**Reciclagem** → É o procedimento de transformar resíduos sólidos através de alterações em suas características físicas, físico-químicas ou biológicas, com o objetivo de convertê-los em novos produtos ou materiais (PNRS, 2010).

**Reutilização** → É o procedimento de aproveitar os resíduos sólidos sem a necessidade de sua transformação biológica, física ou físico-química (PNRS, 2010).