

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

Aline Cristine Pan - aline.pan@ufrgs.br

Martina Rönnau

Juliana Klas

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Engenharia de Gestão de Energia

Ângela de Moura Ferreira Danilevicz

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Engenharia de Produção

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.

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, consequentemente, 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. 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). 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.

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).

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 Garlet (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.

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

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. 1 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 (2021) demonstra a competitividade da cadeia.

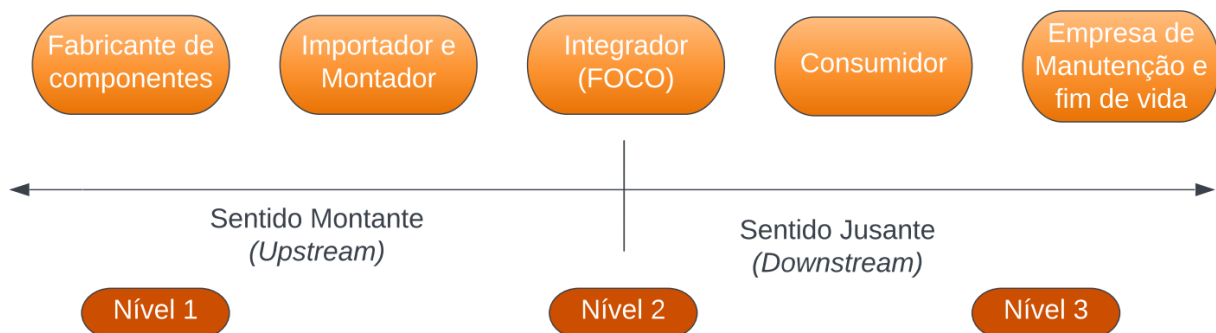


Figura 1 - Cadeia produtiva da Energia Solar Fotovoltaica.

Para uma explicação ampla e sucinta, foi apresentado na Fig. 2 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. 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.

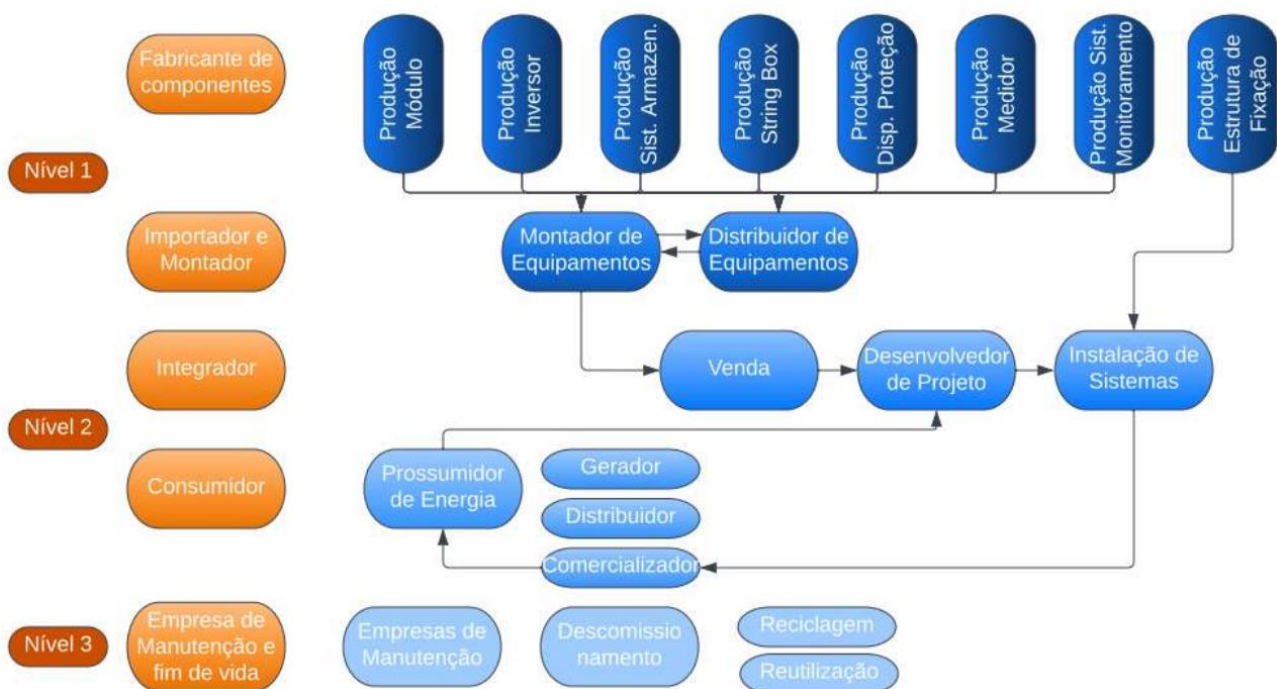


Figura 2 - Fluxograma da cadeia produtiva da Energia Solar Fotovoltaica (Adaptado de Garlet (2021), GIZ (2021) e SEBRAE (2018)).

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).

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).

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).

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. Consequentemente, 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 (Banrisul) 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 beneficentes 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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, 2013. NBR 10899 - Energia solar fotovoltaica — Terminologia.
- ABSOLAR, 2023a. Infográfico Absolar, 2023.
- ABSOLAR, 2023b. Certificado Absolar, 2023.
- Almarshoud, A.F., Adam, E., 2021. A transition toward localizing the value chain of photovoltaic energy in Saudi Arabia. *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 23, pp. 2049–2059.
- ANEEL, 2023. Geração Distribuída. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiY2VmMmUwN2QtYWFiOS00ZDE3LWl3NDMtZDk0NGI4MGU2NTkxIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOiJR9.> Acesso em: 25 nov. 2022.
- Begniss, H. S. M. *et al.*, 2007. Confiança, comportamento oportunista e quebra de contratos na cadeia produtiva do fumo no sul do Brasil. *Gestão & Produção*, vol. 14, p. 311-322.
- 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*, vol. 87, pp. 10212, 2022.
- Buzanello, J. C., 2020. A evolução da energia solar fotovoltaica no Brasil, Trabalho de Conclusão de Curso, UNIRIO, Rio de Janeiro.
- Cattelan, V. D. *et al.*, 2019. Desempenho do ecossistema de inovação do setor de energia solar fotovoltaica, Tese de Doutorado. UFSM, Santa Maria.
- Coutinho, R. *et al.*, 2022. Implementação de redes inteligentes, seus benefícios e barreiras no mercado brasileiro, Trabalho de Conclusão de Curso, UNA, Pouso Alegre.
- Curtis, T. *et al.*, 2021. Best practices at the end of the photovoltaic system performance period. Technical Report NREL/TP-5C00-78678. 2021.
- Da Silva, C. H. S. T. *et al.*, 2022. Tendências de novas tecnologias da energia solar. *Brazilian Journal of Development*, vol. 8, n. 8, pp. 55730-55750.
- De Mello, E. S., Brum, A. L., 2020. A cadeia produtiva da soja e alguns reflexos no desenvolvimento regional do Rio Grande Do Sul. *Brazilian Journal of Development*, vol. 6, n. 10, pp. 74734-74750.
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2021. A mão de obra na cadeia produtiva do setor solar brasileiro.
- Diniz, J., 2017. Metodologia para análise de investimento em sistemas fotovoltaicos considerando parâmetros de incerteza e métricas de risco, Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte.
- Faustino, M. E. B., 2022. Energia fotovoltaica e suas contribuições para redução do impacto ambiental, Trabalho de Conclusão de Curso, UFERSA, Mossoró.
- Franco, M. A.; Groesser, S. N., 2021. A systematic literature review of the solar photovoltaic value chain for a circular economy. *Sustainability*, vol. 13, n. 17, pp. 9615-9650.
- FRAUNHOFER ISE, 2021. Photovoltaics report.
- Garlet, T. B., 2021 Diagnóstico da competitividade da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica. 2021. Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre.
- GREENDEX, 2023. Mapeamento da GD.
- GREENER, 2022a. Estudo Estratégico Geração Distribuída.
- GREENER, 2023a. Tendências 2023 Mercado Fotovoltaico.
- GREENER, 2023b. Estudo Estratégico Geração Distribuída.
- Hansen, M. T. *et al.*, 2007. The innovation value chain. *Harvard business review*, vol. 85, n. 6, pp. 121.
- IEA, 2022. World Energy Outlook.
- IRENA, 2022. Renewable Energy and Jobs Annual Review.
- Klein, J., 2022. Selo + Energia Sustentável qualificará empresas do segmento solar fotovoltaico. *Jornal do Comércio* do dia 22 de setembro de 2022, Porto Alegre.

- Konzen, B. A. D. V., 2020. Avaliação do Ciclo de Vida de painel fotovoltaico: análise dos impactos ambientais e fim de vida em estudo de caso no sul do Brasil, Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte.
- Lee, K. *et al.*, 2017. Exploring Suitable Technology for Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs) Based on a Hidden Markov Model Using Patent Information and Value Chain Analysis. *Sustainability*, vol. 9, n. 7, pp. 1-19.
- Lucidchart, 2008. Software Incorporation.
- Mariano, J. D., Junior, J., 2022. Energia solar fotovoltaica: Princípios fundamentais, Ebook, Editora Atena.
- Morais, I. N., 2012. Cadeias produtivas globais e agregação de valor: a posição da China na indústria eletroeletrônica de consumo, IPEA, Brasília.
- Mostardeiro, P. H., 2019. Estudo do caso de falência da VARIG à luz da Cadeia de Valor de Porter, Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília.
- Nielsen, M. W. *et al.*, 2017. Gender diversity leads to better science. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 114, pp. 1740-1742.
- Núñez, T., 2018. O mercado musical e a cadeia produtiva da música no RS. *Indicadores Econômicos FEE*, vol. 45, n. 2, pp. 97-110.
- Oliveira, E. V., 2021. Processos de reciclagem de módulos fotovoltaicos de primeira geração, Trabalho de Conclusão de Curso, UFC, Fortaleza.
- Pinho, J. T. *et al.*, 2014. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos, CEPEL–CRESESB. Rio de Janeiro, 2014.
- PNRS, 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos, Brasília.
- Porter, M. E., 1989. Vantagem Competitiva: Criando e Sustentando um Desempenho Superior, 27ª Edição, Editora Elsevier.
- REN21, 2022. Renewables 2022 Global Status Report.
- Ricciotti, F., 2020. Da cadeia de valor à rede de valor: uma revisão sistemática da literatura. *Management Review Quarterly*, vol. 70, n. 2, pp. 191-212.
- Santos, V. V., 2023. O crescimento da geração de energia solar fotovoltaica pela perspectiva da geração de empregos (2017-2022), Trabalho de Conclusão de Curso, UFU, Uberlândia.
- SEBRAE, 2022. Cadeia de Valor da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil.
- Soares, T. C., Jacometti, M., 2015 Estratégias que agregam valor nos segmentos do agronegócio no Brasil: um estudo descritivo. *Revista eletrônica de estratégia & negócios*, vol. 8, n. 3, pp. 92-120
- Tatagiba, L. M., 2023. Energia fotovoltaica e o desafio da redução de impactos ambientais para o desenvolvimento sustentável no Brasil, Trabalho de Conclusão de Curso, UFOP, Ouro Preto.
- Vargas, K. F. S. *et al.*, 2013. A cadeia de valores e as cinco forças competitivas como metodologia de planejamento estratégico. *Revista Brasileira de Estratégia*, vol. 6, n. 1, pp. 11-22.
- Veikka, S. *et al.*, 2022. Considerações iniciais para um modelo de comércio P2P de eletricidade gerada a partir de energia solar fotovoltaica baseada na tecnologia blockchain. *Anais do XV Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, Madri, Espanha.

PRODUCTION CHAIN OF THE SOLAR PHOTOVOLTAIC SECTOR IN BRAZIL: INNOVATION TRENDS

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