

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS

Camylla Ramos de Amorim

**FATORES CRÍTICOS DE SUCESSO PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA ECONOMIA  
CIRCULAR NO SETOR DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL:  
UMA ANÁLISE MULTICRITÉRIO**

Florianópolis

2022

Camylla Ramos de Amorim

**FATORES CRÍTICOS DE SUCESSO PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA ECONOMIA  
CIRCULAR NO SETOR DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL:  
UMA ANÁLISE MULTICRITÉRIO**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em  
Engenharia de Produção Mecânica do Centro de  
Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina  
como requisito para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Mecânica com habilitação em Produção  
Orientadora: Dra. Marina Bouzon  
Coorientador: Me. Adriano Matos de Oliveira

Florianópolis

2022

## Ficha de identificação da obra

Amorim, Camylla  
FATORES CRÍTICOS DE SUCESSO PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA  
ECONOMIA CIRCULAR NO SETOR DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA  
NO BRASIL: UMA ANÁLISE MULTICRITÉRIO / Camylla Amorim ;  
orientadora, Marina Bouzon, coorientador, Adriano Matos de  
Oliveira, 2022.  
95 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,  
Graduação em Engenharia de Produção Mecânica, Florianópolis,  
2022.

Inclui referências.

1. Engenharia de Produção Mecânica. 2. Economia Circular.  
3. Energia Solar Fotovoltaica. 4. Fatores Críticos de  
Sucesso. I. Bouzon, Marina. II. Matos de Oliveira,  
Adriano. III. Universidade Federal de Santa Catarina.  
Graduação em Engenharia de Produção Mecânica. IV. Título.

Camylla Ramos de Amorim

## **FATORES CRÍTICOS DE SUCESSO PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA ECONOMIA CIRCULAR NO SETOR DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL: UMA ANÁLISE MULTICRITÉRIO**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheira Mecânica com habilitação em Produção e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 30 de março de 2022.



Documento assinado digitalmente  
Monica Maria Mendes Luna  
Data: 20/04/2022 17:35:08-0300  
CPF: 314.104.993-91  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof.<sup>a</sup> Mônica Maria Mendes Luna  
Coordenadora do Curso

### **Banca Examinadora:**



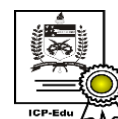
Documento assinado digitalmente  
Marina Bouzon  
Data: 20/04/2022 15:19:54-0300  
CPF: 043.725.139-09  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof.<sup>a</sup> Marina Bouzon, Dra.  
Orientadora  
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente  
Adriano Matos de Oliveira  
Data: 20/04/2022 15:48:23-0300  
CPF: 036.111.973-94  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Adriano Matos de Oliveira, Me.  
Coorientador  
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente  
Antonio Cezar Bornia  
Data: 20/04/2022 15:40:40-0300  
CPF: 516.904.209-44  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Antonio Cezar Bornia, Dr.  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus pais, que sempre me incentivaram a lutar pelos meus sonhos e acreditaram no meu potencial.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço inicialmente aos meus pais, Wagner e Siliene, pelo suporte ininterrupto durante toda a minha caminhada estudantil, pelo estímulo ao estudo desde criança, por sempre acreditarem no meu potencial e por nunca medirem esforços para que essa graduação e todos os meus sonhos se tornassem realidade. Tenho muito orgulho de vocês e da nossa relação de união. Minha gratidão a vocês será eterna. Agradeço a minha família como um todo, meus primos e primas, tios e tias, e minha avó, por vibrarem pelas minhas conquistas e almejarem sempre o meu bem.

Agradeço também ao meu namorado Gabriel por me fornecer apoio e incentivo nesse momento, além de tornar meus dias mais felizes. Às minhas amigas de Imbituba, onde morei durante a adolescência e construí amizades para toda a vida, meus amigos do intercâmbio com quem vivi o ano mais especial da minha graduação, aos amigos que fiz na UFSC, e todos os amigos com quem tenho vínculo: agradeço por torcerem sempre pelo meu sucesso e por poder contar com vocês.

Agradeço a todos com quem trabalhei durante os três estágios realizados, meus supervisores e colegas, os quais foram de extrema importância na minha formação como profissional. Agradeço ao PET Engenharia de Produção por todo o crescimento pessoal e prático como primeira oportunidade profissional, já no início da graduação. Agradeço muito a todos os meus professores, da Engenharia de Produção e da Engenharia Mecânica, por todo o conhecimento repassado. Tenho muito respeito e admiração pelo trabalho de vocês. Agradeço também a todos os servidores da UFSC.

Por fim, agradeço em especial a minha orientadora Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Marina Bouzon e meu Coorientador Doutorando Adriano Matos, por todo o auxílio durante a realização dessa pesquisa, pelas sugestões, ensinamentos, flexibilidade e compreensão, que tornaram a conclusão desse trabalho possível.



## RESUMO

O crescente desenvolvimento econômico e industrial atual se baseia em um modelo de consumo linear, em que os itens produzidos e utilizados se tornam apenas rejeitos no fim de seu ciclo de vida. Esse modelo gera prejuízos no âmbito da sustentabilidade e preservação do meio ambiente, gerando a escassez de recursos. Nesse viés, a Economia Circular ganha espaço ao propor um sistema regenerativo no qual a entrada e o desperdício de recursos, a emissão de resíduos e a utilização de energia são minimizados pela desaceleração, fechamento e estreitamento dos circuitos de materiais. Neste contexto, essa pesquisa tem como objetivo analisar os fatores críticos de sucesso (FCS) para implementação da Economia Circular (EC) no setor de energia solar fotovoltaica no Brasil. Para a análise desses fatores, foi realizada uma revisão da literatura existente sobre o contexto de estudo, e foram coletadas respostas de especialistas atuantes da área de energia solar para, a partir da opinião dos mesmos, serem definidas as relações em pares entre os fatores mencionados na literatura. Foi utilizado o método de análise multicritério DEMATEL para a busca pela interrelação entre os fatores. O presente trabalho contribui com um quadro de fatores críticos de sucesso referentes à implementação proposta, divididos em cinco categorias definidas com base na literatura, além da análise e identificação dos FCS mais importantes e as relações de causa e efeito entre os mesmos. Foram realizadas comparações com base no porte das empresas e trabalhos anteriores, demonstrando convergência entre fatores levantados como importantes e significativos em outros estudos e os fatores encontrados.

**Palavras-chave:** Economia Circular. Energia Solar Fotovoltaica. Fatores Críticos de Sucesso.



## **ABSTRACT**

The recently economic and industrial development is based on a linear consumption model, a model of take, make, and disposal of products without utility in the end of their life cycle. This model is harmful for sustainability and preservation of the natural environment, causing scarcity of resources. The Circular Economy (CE) proposes a regenerative system that minimizes the input and waste of resources, as the emission and the use of energy, by deceleration, closure, and restriction of the cycle of materials. The objective of this research is to analyze the critical success factors (CSF) for the implementation of Circular Economy in the photovoltaic solar energy sector in Brazil. To analyze these critical success factors, a review of the literature was carried out, and responses from specialists in the context of solar energy were collected. From their opinion, the interrelationship among the pairs of factors was extracted. The DEMATEL multicriteria method was used for this purpose. The present research contributes with a framework of 15 critical success factors for the defined implementation, divided into five categories based on the previous literature. Furthermore, this work provides the analysis and identification of the key CSFs for this cycle, as well as the priority and the relationships among these factors. Results were analyzed based on the size of the company and compared to previous studies, demonstrating similarities.

**Keywords:** Circular Economy. Critical success factors. Photovoltaic Solar Energy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Capítulos do trabalho .....	20
Figura 2 - Componentes do sistema logístico .....	23
Figura 3 - Evolução da logística para a cadeia de suprimentos.....	25
Figura 4 – Diagrama representando o sistema da Economia Circular. ....	31
Figura 5 - Capacidade instalada acumulada em painéis fotovoltaicos no mundo .....	37
Figura 6 - Estrutura de uma célula fotovoltaica de silício.....	38
Figura 7 - Potencial de geração de energia fotovoltaica no Mundo .....	40
Figura 8 - Localização das usinas fotovoltaicas no Brasil .....	41
Figura 9 - Matriz energética do Brasil por fase de construção das usinas .....	42
Figura 10 - Ciclo de vida de um módulo fotovoltaico .....	43
Figura 11 - Classificação da Pesquisa .....	48
Figura 12 - Macro etapas do procedimento metodológico.....	49
Figura 13 - Passos para a aplicação do método DEMATEL.....	52
Figura 14 - Áreas específicas de atuação das empresas relacionadas à energia solar FV participantes da pesquisa .....	58
Figura 15 - Diagrama causal .....	61
Figura 16 - Dígrafo de relações .....	63
Figura 17 - Dígrafo de relações para empresas de grande porte .....	63
Figura 18 - Dígrafo de relações para atuantes em empresas de pequeno porte, médio porte e acadêmicos.....	64
Figura 19 - Interesse dos especialistas nos resultados da pesquisa .....	68

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Fatores críticos para o sucesso da EC na remanufatura .....	32
Quadro 2 - FCS para implementação de projetos no contexto da EC .....	34
Quadro 3 - Fatores críticos de sucesso para implementação da CSC .....	35
Quadro 4 - Fatores críticos de sucesso para implementação da EC .....	36
Quadro 5 - Reaproveitamento dos materiais no fim de ciclo de vida dos painéis FV	44
Quadro 6 - FCS para implementação da EC de painéis FV com base em um modelo <i>blockchain</i> .....	45
Quadro 7 - Escala tradicional de comparação DEMATEL .....	52
Quadro 8 - FCS para implementação da EC no setor de painéis FV com base na literatura.....	55
Quadro 9 - Perfil dos respondentes da pesquisa.....	57
Quadro 10 - Resumo da importância relativa dos fatores, fatores causas e fatores de efeito .....	66
Quadro 11 - Resumo da importância relativa dos fatores, fatores causas e fatores de efeito para os dois grupos de aplicação .....	67
Quadro 12 - Atingimento dos objetivos de Pesquisa .....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Componentes de um painel fotovoltaico .....	39
Tabela 2 - Matriz de relação direta geral (A) .....	59
Tabela 3 - Matriz de relação direta geral normalizada (X) .....	60
Tabela 4 - Matriz de relações totais (R) .....	60
Tabela 5 - Proeminência e Relação entre os fatores .....	61
Tabela 6 - Threshold de (T).....	62
Tabela 7 - Relações de influência destacadas na matriz (T) .....	62

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMC – Análise multicritério

CS – Cadeia de Suprimentos

CSC – Cadeia de Suprimentos Circular

CLSC – *Closed Loop Supply Chain*

DEMATEL – *Decision Making Trial and Evaluation Laboratory*

EC – Economia Circular

FCS – Fatores Críticos de Sucesso

FA – Fatores Ambientais

FG – Fatores Governamentais

FM – Fatores de Mercado

FO – Fatores Organizacionais

FT – Fatores Técnicos

FV – Fotovoltaica

ME – Modernização Ecológica

MCDM – *Multi criteria decision making*

SC – *Supply Chain*

UFV – Usinas fotovoltaicas

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	15
1.2	OBJETIVO GERAL .....	16
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
1.4	JUSTIFICATIVA .....	17
1.5	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	19
1.6	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	20
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>22</b>
2.1	CADEIA DE SUPRIMENTOS .....	22
<b>2.1.1</b>	<b>Logística.....</b>	<b>22</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Conceito de cadeia de suprimentos .....</b>	<b>25</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Cadeia de suprimentos sustentável .....</b>	<b>27</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Cadeia de suprimentos circular.....</b>	<b>28</b>
2.2	ECONOMIA CIRCULAR .....	29
<b>2.2.1</b>	<b>Fundamentos da economia circular .....</b>	<b>30</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Fatores críticos de sucesso para implementação da economia circular.....</b>	<b>32</b>
2.3	DESENVOLVIMENTO DO SETOR DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA 36	
<b>2.3.1</b>	<b>Fundamentos da geração de energia solar .....</b>	<b>38</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Energia solar fotovoltaica no brasil .....</b>	<b>39</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Painéis fotovoltaicos e impactos ambientais.....</b>	<b>42</b>
<b>3</b>	<b>MÉTODOS.....</b>	<b>47</b>
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA .....	47
3.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	48
3.3	DEMATEL .....	50
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>54</b>

4.1	FATORES CRÍTICOS .....	54
4.2	APLICAÇÃO DO DEMATEL.....	55
<b>4.2.1</b>	<b>Viabilização da aplicação .....</b>	<b>56</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Aplicação das etapas do método DEMATEL.....</b>	<b>59</b>
4.3	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E COMPARAÇÃO COM OUTROS TRABALHOS .....	64
4.4	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS POR PORTE DAS EMPRESAS .....	66
4.5	IMPLICAÇÕES PRÁTICAS E GERENCIAIS .....	67
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>69</b>
5.1	ATINGIMENTO DOS OBJETIVOS DA PESQUISA .....	70
5.2	LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	70
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>73</b>
	<b>APÊNDICE A – FORMULÁRIO DE PESQUISA.....</b>	<b>83</b>
	<b>APÊNDICE B – MATRIZES RESULTANTES DAS RESPOSTAS DE CADA ESPECIALISTA.....</b>	<b>88</b>
	<b>APÊNDICE C – RESPOSTAS À PERGUNTA ABERTA REFERENTE A SUGESTÃO DE OUTROS FCS E CONTRIBUIÇÕES GERAIS .....</b>	<b>93</b>





# 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a contextualização da presente pesquisa, seguida pelos seus objetivos geral e específicos, além da justificativa de escolha desses objetivos. Por fim, detalha a estrutura do trabalho por capítulo.

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Com a revolução industrial, a maior eficiência dos métodos de fabricação proporcionou a produção de bens de consumo em larga escala (XU; DAVID; KIM, 2018), e o crescente desenvolvimento econômico e industrial aliado à globalização resultou no uso e descarte frequentes dos bens, seguindo um modelo linear de oferta e consumo (BAKER et al., 2020). Porém, o fluxo de produção linear causa diversos problemas, em especial no âmbito da sustentabilidade e meio ambiente (DE SOUZA et al., 2022). Esse modelo praticado em países em desenvolvimento, como o Brasil, não consegue mais absorver a quantidade de resíduos gerados pelas atividades econômicas, causando prejuízos ambientais que tornam necessária a transição para um modelo circular de economia (SILVA; MORAIS, 2021). Desse modo, a cadeia de suprimentos circular se torna uma alternativa às perdas geradas pelo modelo linear tradicional (*take, make, and dispose of*) (FAROOQUE et al., 2019; SINGHAL; TRIPATHY; JENA, 2020).

Diante disso, o Desenvolvimento Sustentável indica que uma nação precisa equilibrar a necessidade de progresso social e crescimento econômico com a preservação e o aprimoramento do ambiente natural (MERCIER et al., 2015). Desse modo, a economia circular (EC) se integra à gestão sustentável da cadeia de suprimentos, dado que ambas se desenvolveram significativamente em razão da escassez de recursos ambientais, levando o olhar das organizações às práticas sustentáveis em seus processos, produtos e modelos de negócios (REBS; BRANDENBURG; SEURING, 2019). No ambiente atual, a economia circular é tida como estratégica e relevante para os resultados das empresas e geração de maiores valores ao reutilizar insumos que não estão agregando valor ao sistema e reciclar dejetos que seriam descartados (FONSECA et al., 2018). Desse modo, a EC busca a otimização dos materiais, ampliando a vida útil dos produtos e ativos durante e após o seu uso, e tem sido uma das tendências mais impactantes dos últimos anos (LUZ, 2017) afetando desde governos,

organizações globais como a ONU, todo o setor privado, ciência, até consumidores finais e indivíduos (NOBRE; TAVARES, 2021).

No setor de energia solar fotovoltaica, os impactos do fluxo produtivo linear tradicional também são observados. Estima-se que até 2050 entre 60 e 78 milhões de toneladas de resíduos fotovoltaicos estarão em circulação (FARRELL et al., 2020; PANG et al., 2021). O aumento exponencial em nível global das instalações fotovoltaicas (FV) anuais gera uma preocupação crescente com relação aos níveis de resíduos fotovoltaicos gerados (FARRELL et al., 2020; JÄGER-WALDAU, 2020; MAHMOUDI et al., 2019). No sentido econômico, a possibilidade de reutilizar alguns dos constituintes dos módulos, seja na forma física ou energética, pode compensar o *déficit* potencial vigente de metais raros e preciosos imprescindíveis na constituição das células, trazendo benefício financeiro e em termos de sustentabilidade da cadeia (FARRELL et al., 2020)

Existem caminhos para a circularização do ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos, mas as barreiras que prejudicam essas atividades devem ser removidas de modo a possibilitar o progresso a uma EC orientada ao ciclo de vida desta tecnologia que considere suas particularidades, para que os resíduos finais se aproximem cada vez mais do zero, através do *ecodesign* eficiente que propicie a desconstrução e remanufatura dos painéis (FARRELL et al., 2020). Em seu estudo, Mahmoudi et al., (2019) mencionam que apesar da vasta pesquisa em tecnologia fotovoltaica, pouco se sabe sobre a perspectiva de como os painéis fotovoltaicos em fim de vida serão tratados. Nesse viés, o gerenciamento de painéis fotovoltaicos em fim de vida útil se torna um campo emergente que precisa de mais pesquisa e desenvolvimento (DOMÍNGUEZ; GEYER, 2017; XU et al., 2018).

Tendo em vista a importância crescente da recuperação dos rejeitos advindos do crescimento do setor de energia solar fotovoltaica e a necessidade de circularidade da cadeia produtiva de painéis, bem como a importância de identificar os Fatores Críticos de Sucesso (FCS) dos projetos para otimizar e priorizar ações na busca por um objetivo definido (ARNAIZ et al., 2021), o trabalho em questão traz como questão principal de pesquisa a seguinte: *(i) Quais são os fatores críticos para o sucesso na implementação da economia circular no setor de energia solar fotovoltaica, no contexto brasileiro?*

## 1.2 OBJETIVO GERAL

- ✓ Analisar os fatores críticos de sucesso para implementação da economia circular no setor de energia solar fotovoltaica no Brasil.

### 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

No intuito de alcançar o objetivo geral mencionado, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- ✓ Identificar os Fatores Críticos de Sucesso para implementação da Economia Circular no setor de energia solar fotovoltaica;
- ✓ Identificar o nível de importância de cada um dos Fatores Críticos de Sucesso, com base na opinião de especialistas;
- ✓ Identificar a interrelação entre esses Fatores Críticos de Sucesso.

### 1.4 JUSTIFICATIVA

As mudanças climáticas e novas políticas adotadas por muitos países para reduzir as emissões de carbono advindas dos Acordos Climáticos de Paris em 2015 influenciaram a busca mundial por novas fontes de energia (MOREAU; DOS REIS; VUILLE, 2019). Somado a isso, na última década, foram realizados esforços no sentido de promover a produção e uso de energia renovável (MASTROCINQUE et al., 2020). Por conseguinte, à medida que a sociedade trabalha para reduzir sua dependência de combustíveis fósseis, a demanda por fontes de energias renováveis como a energia solar fotovoltaica (FV) observa um crescimento significativo nas últimas décadas (MATHUR; SINGH; SUTHERLAND, 2020; FERREIRA et al., 2018; MOREAU; DOS REIS; VUILLE, 2019).

Vale ressaltar que a capacidade instalada solar global atingirá 8,5 TW em 2050 (LIU; ZHANG; WANG, 2020). Portanto, essa forma de energia é considerada uma das muitas soluções-chave para atender ao crescente consumo mundial por energia diminuindo os prejuízos ao meio ambiente (KABIR et al., 2018). Em nível continental, a América do Sul é vista como uma região com grandes oportunidades para o mercado de energia solar fotovoltaica (VARGAS GIL et al., 2020), onde o Brasil se destaca em relação a outros países latino-americanos porque conseguiu integrar a energia solar fotovoltaica aos leilões de energia, aumentando o número de usinas solares fotovoltaicas conectadas à rede (VAZQUEZ; HALLACK, 2018).

No Brasil, a demanda energética crescente e a limitação de investimento financeiro para fornecê-la tornam emergente a busca por novas alternativas de geração de energia elétrica (GARLET et al., 2019, 2020; SILVEIRA; TUNA; LAMAS, 2013). Ainda, existem expectativas exponenciais sobre o potencial de demanda por energia solar no Brasil (REDISKE et al., 2020). O país se encontra em uma região privilegiada da superfície terrestre para a geração de energia solar, considerando os altos níveis de irradiação devido à proximidade ao equador (GLOBAL SOLAR ATLAS, 2022) e se destaca em relação a outros países latino-americanos pois conseguiu integrar a energia solar fotovoltaica aos leilões de energia, proporcionando o aumento do número de usinas solares fotovoltaicas conectadas à rede nacional (VAZQUEZ; HALLACK, 2018).

Portanto, o Brasil possui uma geração de energia a partir da fonte solar fotovoltaica ainda incipiente comparado ao seu potencial (FERREIRA et al., 2018), contudo, o setor encontra-se em expansão (ANEEL, 2022). Nas previsões para 2050, haverá três vezes mais demanda de energia no Brasil e uma vez mais por pessoa (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021). O aumento da demanda energética per capita ocorre devido a aspectos como o crescimento populacional, crescimento do PIB (Produto Interno Bruto) e envelhecimento populacional (ZANARDO et al., 2018).

A energia solar fotovoltaica é uma tecnologia eficaz, sendo uma fonte de energia solar segura, eficiente, não poluente e, desse modo, uma forma interessante de atender às necessidades de energia mundiais (ARMAROLI; BALZANI, 2016; CHOWDHURY et al., 2020; MOHAMED; EL-MOHSNAWY; FUKUZUMI, 2017), principalmente do ponto de vista ambiental (DOMÍNGUEZ; GEYER, 2017; SHAHSAVARI; AKBARI, 2018). Entretanto, métodos eficazes de gestão de fim de vida precisam ser desenvolvidos e implementados para evitar que grandes volumes de resíduos perigosos provenientes de painéis fotovoltaicos sejam descartados em aterros sanitários (MATHUR; SINGH; SUTHERLAND, 2020).

Portanto, a adoção de princípios de economia circular à produção de painéis fotovoltaicos complementa o benefício da utilização de energia solar em termos de fatores ambientais, mitigando emissões associadas às etapas de fabricação ao aumentar as taxas de reciclagem e recuperação (FARRELL et al., 2020). Os resíduos fotovoltaicos também podem ser vistos como uma fonte potencial de materiais valiosos (MATHUR; SINGH; SUTHERLAND, 2020) visto que os painéis são compostos por vidro, metal, semicondutores (FARRELL et al., 2020) entre outros elementos de alto valor agregado, o que justifica a circularização dessa economia também do ponto de vista econômico.

O Brasil obtém destaque na América do Sul por seu compromisso político com a Modernização Ecológica (ME) (JABBOUR; JABBOUR, 2014). Porém, ainda fica atrás de países como Índia, China e Coreia do Sul em termos de consumo sustentável (JABBOUR et al., 2017). Desse modo, o Brasil se torna um interessante objeto de pesquisa com relação à Economia Circular no contexto industrial. No âmbito acadêmico, existem poucos trabalhos em nível mundial que elencam os FCS para implementação da EC no setor de painéis solares fotovoltaicos, e os trabalhos existentes realizados em países em desenvolvimento se direcionam à China (ZHAO; ZHANG; ZUO, 2011) e Turquia (EROL et al., 2021). Também em nível global, alguns trabalhos elencam os FCS para implementação da EC no contexto de projetos de energia renovável no Paquistão (ZAMAN et al., 2022) ou sem especificar a indústria de aplicação, com enfoque em Bangladesh (MOKTADIR et al., 2020). Alguns trabalhos elencam os FCS no contexto de Cadeia de Suprimentos Sustentável no Brasil, para outros setores como sistemas produto-serviço (SOUSA-ZOMER; CAUCHICK, 2016), tabaco (MORAES et al., 2019) ou logística reversa na indústria farmacêutica (CAMPOS et al., 2021). Os trabalhos que relacionam EC, indústria de painéis FV e o foco no Brasil abordam tópicos relevantes como a visão dos *stakeholders* em projetos fotovoltaicos no país (ECHEGARAY, 2014), as rotas de reciclagem e processamento de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (DIAS et al., 2018), a política brasileira de geração de energia fotovoltaica distribuída e comparação dos resultados com a experiência de outros países (AMARAL et al., 2016), discussão da viabilidade de projetos fotovoltaicos também em termos sustentáveis (MARTINS et al., 2008), entre outros. Entretanto, nenhuma das pesquisas publicadas atualmente elenca os FCS para implementação da EC no contexto brasileiro, o que demonstra a singularidade do trabalho de conclusão de curso realizado. As obras mencionadas são consideradas, portanto, pontos de partida para condução deste estudo.

## 1.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A delimitação da pesquisa define o enfoque a ser considerado na busca por informações e no desenvolvimento da aplicação proposta. O setor de pesquisa, energia solar fotovoltaica, recebe a primeira delimitação importante: foi considerado como objeto de estudo principal a indústria de painéis solares fotovoltaicos de silício, visto que essa tecnologia representou cerca de 95% da fonte de produção total de tecnologia fotovoltaica até 2019 (ISE, 2021; MUKISA et al., 2021). A região de enfoque da pesquisa também é selecionada, sendo o

trabalho e suas análises direcionadas à geração solar no Brasil. Este enfoque no país ocorre tanto por barreiras de comunicação e contato como pelo intuito de abordar as particularidades do setor em um local que possui grande potencial de geração inexplorado (GARLET et al., 2019, 2020).

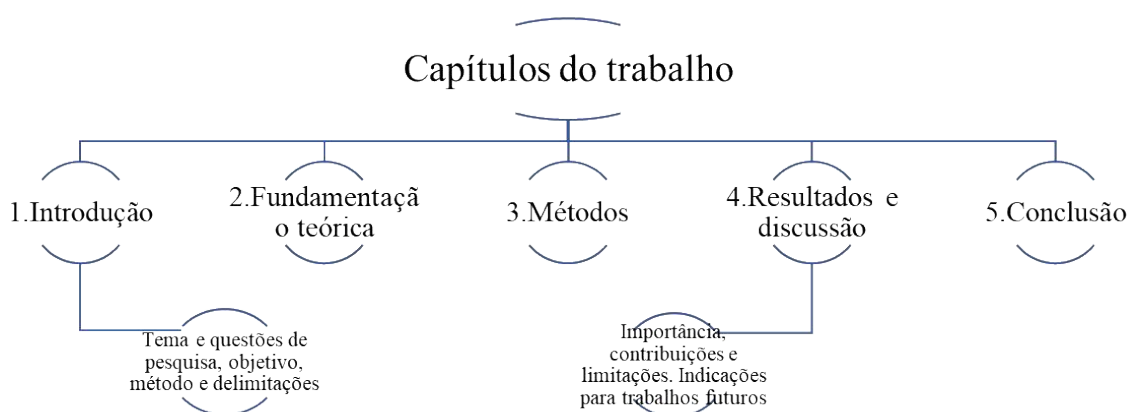
Para a aplicação da ferramenta, são considerados participantes residentes e atuantes na indústria fotovoltaica do Brasil, nas diversas regiões (Norte, Nordeste, Centro Oeste, Sul e Sudeste). Foi considerada a atuação em parques e usinas de diferentes portes, mas não unidades residenciais, visando a observação dos fatores em maior escala.

A análise dos resultados apenas considera a comparação com trabalhos de outros países no intuito de identificar as diferenças entre eles no âmbito de circularidade dos painéis fotovoltaicos. A aplicação se direciona diretamente à viabilidade de aplicação da economia circular no setor, e não à aplicação de painéis fotovoltaicos em si.

## 1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho de conclusão de curso está dividido em cinco capítulos com o objetivo de facilitar a organização do conteúdo apresentado, sendo eles: introdução, fundamentação teórica, métodos, resultados e discussão, e por fim conclusão, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1. Capítulos do trabalho



Fonte: A autora (2022)

O primeiro capítulo tem como objetivo contextualizar a pesquisa desenvolvida, apresentando os objetivos a serem alcançados e a justificativa para tal. Em seguida, a

fundamentação teórica fornece a base para o entendimento da aplicação, abordando os temas chave a serem discutidos e fornecendo, portanto, o elemento de entrada para a aplicação do método. O capítulo subsequente apresenta os procedimentos metodológicos a serem utilizados, bem como a ferramenta principal que será objeto de aplicação.

No quarto capítulo é apresentada a aplicação do método exposto, os resultados encontrados e a discussão destes resultados. Por fim, o quinto capítulo aborda a conclusão da pesquisa, retratando sua contribuição para o cenário acadêmico, e compara os resultados encontrados com obras de outros autores. Limitações e sugestões para projetos futuros também são abordadas

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

A base teórica considerada para a pesquisa em questão se encontra neste capítulo, que aborda os principais conceitos e definições necessários para a obtenção dos resultados propostos.

### **2.1 CADEIA DE SUPRIMENTOS**

A logística é considerada hoje parte integrante da cadeia de suprimentos e ambas compartilham a missão principal de alocação dos recursos conforme as condições esperadas pelo cliente (BALLOU, 2006). Através da adesão do conceito de economia circular à cadeia de suprimentos, surgem novas oportunidades para aprimorar os objetivos de sustentabilidade nas operações da cadeia de suprimentos. (LAHANE; KANT, 2021)

#### **2.1.1 Logística**

A logística é uma das mais antigas atividades econômicas, e sua origem coincide com o início das atividades produtivas organizadas. Com a produção especializada e troca dos excedentes entre produtores, surgiram três das mais importantes funções logísticas, sendo elas: estoque, armazenagem e transporte. A produção em excesso vira estoque, e o estoque necessita de armazenagem para garantir sua integridade. Para que a troca possa ser efetivada, o transporte entre o local de produção e o local de consumo se faz necessário (FLEURY; WANKE; FIGUEIREDO, 2000). Sendo assim, a logística pode ser definida como a gestão de todas as atividades que contribuem para a circulação dos produtos e o equilíbrio entre oferta e demanda, através do fornecimento de mercadorias necessárias em um dado lugar e momento (HESKETT; GLASKOWSKY; IVIE, 1973).

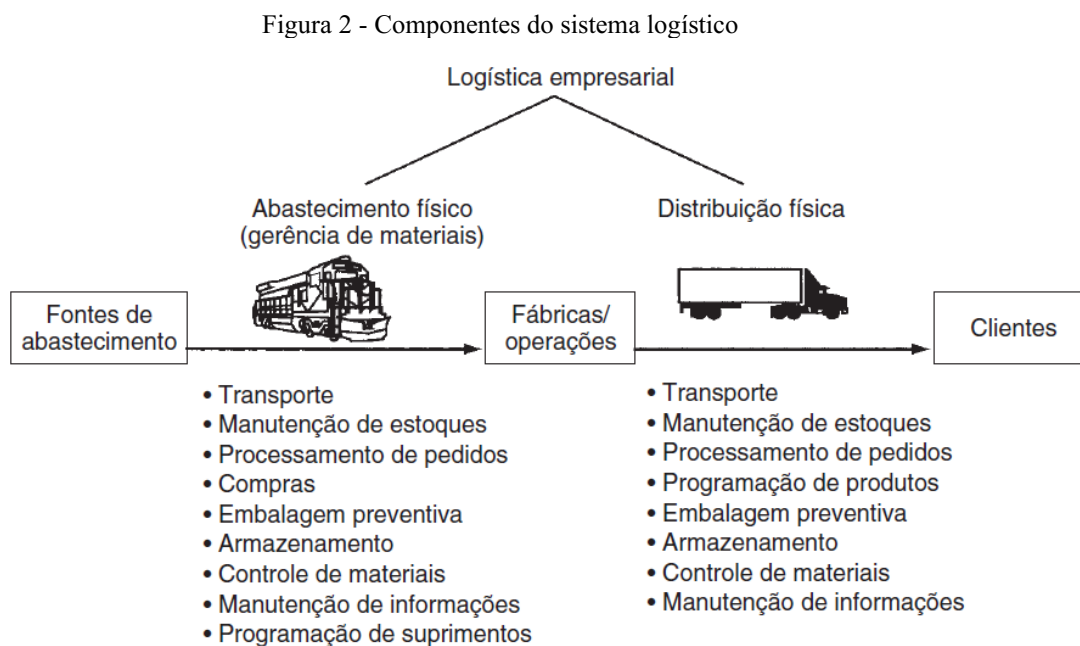
Tixier, Mathe e Colin (1998) complementam a definição ao afirmarem que a função da logística em uma empresa é assegurar ao menor custo possível o equilíbrio entre oferta e demanda, aos níveis estratégico e tático, além de manter a longo prazo a boa relação fornecedor-cliente. Segundo Ballou (1992), a logística tem como objetivo principal aprovisionar o cliente mantendo os níveis de serviço desejados pelo mesmo. O custo das atividades logísticas desempenhadas para obtenção desse objetivo é também de suma importância, pois absorve cerca de 22% do valor das vendas e pode determinar se a empresa será ou não competitiva.



Ballou (1992) cita as seguintes atividades como primárias para o alcance dos objetivos logísticos de uma organização, em termos de nível de serviço e custo:

- Transporte: Essencial, pois nenhuma empresa opera sem movimentar sua matéria-prima ou produto acabado. Considerada a atividade logística mais importante pois absorve, em média, de um a dois terços dos custos logísticos.
- Estoque: O estoque se torna necessário para que seja atingido um grau de disponibilidade de produtos razoável. Por outro lado, seu uso extensivo resulta em elevados custos, o que enfatiza a importância da manutenção dos níveis de estoque.
- Processamento de pedidos: Os custos de processamento de pedidos não se equiparam aos custos de transporte e estoque, mas essa atividade é um elemento crítico na definição do tempo necessário para que os bens ou serviços cheguem aos clientes. É onde inicializa a movimentação de produtos e entrega de serviços, e por isso considerada uma atividade primária.

Complementando as atividades primárias, (BALLOU, 2006) afirma que as outras atividades que compõem a logística empresarial variam de acordo com a empresa. A Figura 2 relaciona um exemplo do que seriam as atividades componentes do sistema logístico de uma organização.



Fonte: Ballou (2006)

De acordo com a definição mais recente disponibilizada pelo Council of Supply Chain Management Professionals (2013),

Logística é o processo de planejar, implementar e controlar os procedimentos para o eficiente e eficaz transporte e estocagem de mercadorias, serviços, e as informações correlacionadas entre ponto de origem e o ponto de consumo, de forma a atender aos requisitos do cliente. Esta definição inclui entrada, saída, fluxo interno e externo de produtos e informações.

Já a definição de Gestão Logística, também segundo o Council of Supply Chain Management Professionals (2013),

A Gestão Logística é a parcela do processo da cadeia de suprimentos que planeja, implementa e controla o fluxo direto e reverso de armazenamento de bens [...] A gestão logística é uma função integradora que coordena e otimiza todas as atividades logísticas, bem como integra as atividades logísticas com outras funções, incluindo marketing, vendas, manufatura, finanças e tecnologia da informação.

A logística empresarial divide-se em quatro áreas operacionais, sendo elas: logística de suprimentos, logística de apoio à manufatura, logística de distribuição e logística reversa. A logística reversa tem como responsabilidade retornar e redirecionar os produtos pós-venda e pós-consumo (LEITE, 2017). No caso, a logística reversa é responsabilidade conjunta de produtores e consumidores para minimizar a geração de resíduos por meio da reutilização, remanufatura, reciclagem e descarte seguro de itens indesejados (BOUZON et al., 2016).

O termo “logística reversa” se aplica ao fluxo de materiais no sentido contrário ao fluxo principal. No fluxo inverso de materiais, os produtos são transportados de muitos pontos distintos em que se encontram os consumidores finais para um ou mais locais centralizados, geralmente em quantidades menores, além de sistemas de rastreamento manual, levando a maiores custos de transporte e armazenamento quando comparado ao fluxo direto, que conta com maior previsibilidade das etapas e automatização de rastreamento. Além disso, a qualidade do produto pós-uso e da embalagem de transporte é altamente variável, resultando na necessidade de inspeção e classificação manual (WILSON; GOFFNETT, 2021). Nesse contexto, a adoção e implementação das práticas de logística reversa se torna relativamente difícil do ponto de vista industrial. Entretanto, muitas indústrias estão menos familiarizadas sobre como pôr em prática a logística reversa e quais os benefícios da sua implementação (CHAN; CHAN, 2008).

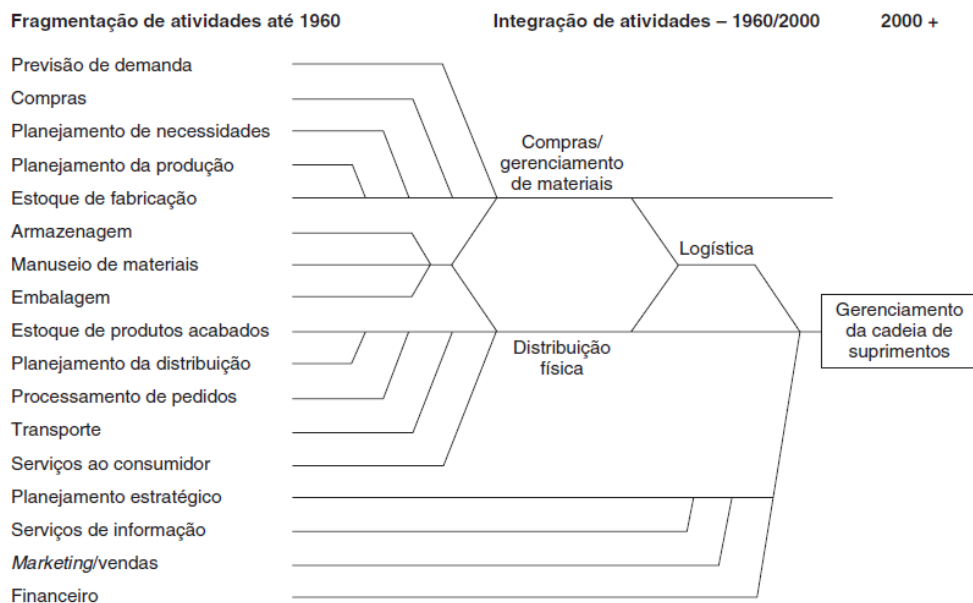
No nível estratégico, muitas questões gerenciais devem ser consideradas antes de se implementar um programa de logística reversa, incluindo análises de custo/benefício, retorno sobre investimento, previsão de mercado secundário, regulação ambiental, indicadores de

performance e expectativas dos *stakeholders* (WILSON; GOFFNETT, 2021). Os clientes da atualidade possuem maior consciência com relação à necessidade de preservar o meio ambiente, o que instiga as indústrias a tornarem a produção mais limpa, verde e adotarem processos *eco-friendly* também como estratégia competitiva (EL; MILLET, 2011).

### 2.1.2 Conceito de cadeia de suprimentos

Para Ballou (2006) a Gestão Logística e o Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos possuem a mesma missão: posicionar produtos ou serviços no lugar certo, momento certo, condições desejadas e contribuindo, ao mesmo tempo, da melhor forma possível para a empresa. A logística pode ser considerada então um ramo secundário do gerenciamento da cadeia de suprimentos, e esta considera questões adicionais que sobrepõem o fluxo da produção, como precificação de produtos e qualidade da produção, sendo hoje parte integrante da cadeia de suprimentos que tem como responsabilidade a gestão e posicionamento dos estoques, bem como gerir o transporte, depósito e manuseio de materiais (BOWERSOX et al., 2013). A Figura 3 demonstra a evolução da logística em gerenciamento da cadeia de suprimentos, bem como a fragmentação das atividades por área e responsabilidade:

Figura 3 - Evolução da logística para a cadeia de suprimentos



Fonte: Ballou (2006)

Já Lambert e Cooper (2000) elencam como atividades ou processos chave para a cadeia de suprimentos a gestão de relacionamento com o cliente, a gestão de serviço ao cliente, o gerenciamento de demandas, o atendimento à demanda, a gestão do fluxo produtivo, o processo de compras, o desenvolvimento e a comercialização de produtos, além do retorno de produtos.

Segundo Lambert e Cooper (2000), a interligação desses processos propicia o fluxo de informações que viabiliza a satisfação dos clientes, o grande foco da cadeia de suprimentos. A satisfação dos clientes depende do processamento de informações em tempo hábil para proporcionar respostas rápidas às suas expectativas flutuantes. A operação de uma cadeia de suprimentos depende, então, do fluxo de informações que propicia melhores fluxos de produtos.

Muitos autores definiram o conceito de cadeia de suprimentos de forma diferente e ainda há uma busca pela definição unificada (SCHALLMO, 2014; ZOTT; AMIT; MASSA, 2011). Para Ivanov (2008) e Simchi-levi et al. (2000) a cadeia de suprimentos é um elemento imprescindível de uma indústria, e abrange a rede de fornecedores, fabricantes, produção, centros de distribuição e estoque, propiciando que a matéria-prima seja adquirida e transformada em produtos acabados, que são distribuídos aos clientes e entregues. A cadeia de suprimentos é um elemento vital de uma indústria que abrange a rede de fornecedores, fabricantes, centros de produção, centros de distribuição e armazéns (JOSHI, 2022).

Uma cadeia de suprimentos é uma rede global de organizações que cooperam para melhorar os fluxos de materiais e informações entre fornecedores e clientes, buscando o menor custo e a maior velocidade. O objetivo da cadeia de suprimentos é a satisfação do cliente. O uso do termo "rede" sugere que as empresas envolvidas em uma cadeia de suprimentos não são apenas empresas que realizam atividades complementares, mas também empresas que competem para realizar as mesmas atividades (GOVIL; PROTH, 2002). Nesse viés, a cadeia de suprimentos não é uma cadeia de negócios com relacionamentos apenas de fornecedor para cliente, mas uma rede que abrange vários negócios e relacionamentos (LAMBERT; COOPER, 2000).

Com a revolução industrial, métodos de fabricação mais eficientes permitiram que as empresas produzissem bens de consumo em larga escala (XU; DAVID; KIM, 2018). Com o crescente desenvolvimento econômico e industrial aliado à globalização, houve a diminuição do custo de fabricação diminuiu e aumento do poder de compra da população, resultando na compra, uso e descarte frequentes dos bens, seguindo um modelo linear de oferta e consumo

(BAKER et al., 2020). No contexto da cadeia de suprimentos tradicional linear, recursos naturais são convertidos em produtos e entregues aos consumidores para uso. No fim da fase de uso, os produtos são descartados em aterros sanitários, gerando enormes quantidades de lixo e problemas ecológicos em sua deterioração. A cadeia de suprimentos sustentável seria, portanto, uma alternativa ao modelo linear (*take, make, and dispose of*). (FAROOQUE et al., 2019; SINGHAL; TRIPATHY; JENA, 2020)

### **2.1.3 Cadeia de suprimentos sustentável**

A definição de sustentabilidade está em evolução, com numerosos experimentos para definir e operacionalizar a sustentabilidade em diferentes disciplinas e escalas, buscando a otimização dos trade-off entre os recursos planetários e as necessidades humanas (PATTERSON; MCDONALD; HARDY, 2017; SALA; CIUFFO; NIJKAMP, 2015; TURCU, 2013). O Desenvolvimento sustentável se objetiva a abordar que uma nação precisa equilibrar a necessidade de progresso social e crescimento econômico com a preservação e o aprimoramento do ambiente natural (MERCIER et al., 2015).

No século 21, as cadeias de suprimentos sustentáveis começam a ser amplamente mencionadas na literatura como uma interação entre várias empresas que fornece vantagens drásticas em relação aos três pilares da sustentabilidade, ou seja, aspectos econômicos, ambientais e sociais (JABBARZADEH; HAUGHTON; KHOSROJERDI, 2018). Segundo Chiou et al. (2011), a gestão sustentável da cadeia de suprimentos é a nova forma de obter melhor desempenho organizacional. Espera-se que a gestão ambiental e a inovação sustentável sejam os indicadores de desempenho mais importantes no futuro.

De acordo com Ahi e Searcy (2015) a gestão sustentável da cadeia de suprimentos é um projeto de sistemas coordenados, incluindo integração espontânea da tríade de sustentabilidade para gerenciar de forma eficaz e eficiente a obtenção, produção e distribuição de produtos ou serviços objetivando satisfazer aos requisitos das partes interessadas e melhorar os ganhos, resiliência e competitividade da organização a curto e longo prazo. Esse novo sistema contribui por relacionar o desenvolvimento e as questões ambientais e estimula mudanças políticas e econômicas localmente, nacionalmente e globalmente (BUI et al., 2021; MANGLA; GOVINDAN; LUTHRA, 2017), concentrando as ações sustentáveis no desenvolvimento social, local e nas questões ambientais interconectadas, além das

consequências econômicas globais (BENDUL; ROSCA; PIVOVAROVA, 2017; TAN et al., 2016).

Assim, através da Gestão sustentável da cadeia de suprimentos pode-se oferecer maiores oportunidades para a obtenção de melhor desempenho e poder de competitividade no mercado, atingindo metas de negócio (MCMURRAY et al., 2014; VAN HOOFF; THIELL, 2015). Os estudos da gestão sustentável da cadeia de suprimentos, ainda, reiteram que o fluxo de informações, cooperação, coordenação e conexão em toda a rede da cadeia são essenciais para o alcance de um nível mais alto de desempenho de sustentabilidade organizacional e da cadeia de abastecimento (LIEBETRUTH, 2017; RAJEEV et al., 2017). E como parte da rede estendida, as cadeias de suprimentos se mostram como um fluxo de interações interdependentes arquitetadas e fomentadas por vários atores para atingir objetivos específicos (“Developing relationship management strategies in a network context”, 2019).

No entanto, Franco (2017) mostrou os desafios enfrentados por cada integrante da cadeia de suprimentos, desde o design do produto até a recuperação e reprocessamento deles na produção circular. Pois, embora o conceito de gestão sustentável da cadeia de suprimentos tenha ganhado notoriedade nas últimas décadas, dar ênfase na progressão e nas competências na cadeia de abastecimento pode não ser satisfatório para uma organização conseguir uma posição benéfica no mercado (ANSARI; KANT, 2017) e as empresas estão passando por ameaças reais à sustentabilidade de suas cadeias de abastecimento existentes, muito por conta da globalização, demanda incerta, mercados desafiadores e eficácia pecuniária (ROY; SCHOENHERR; CHARAN, 2018). Por isso, diversas organizações criaram e puseram em prática métodos de desempenho para observar os benefícios da sustentabilidade da cadeia de suprimentos através do gerenciamento de práticas sustentáveis e circulares e suas consequentes estratégias relacionadas (BAI et al., 2020; KAZANCOGLU; KAZANCOGLU; SAGNAK, 2018), tudo isso buscando, além do desenvolvimento sustentável, obter melhor competitividade.

#### **2.1.4 Cadeia de suprimentos circular**

Nos últimos anos, o conceito de cadeia de suprimentos circular ganhou grande popularidade como um meio adequado para a eficiente utilização de recursos no final da cadeia de suprimentos, tornando-a sustentável (JULIET; U-DOMINIC; KALU, 2022). A incorporação do termo “Economia Circular” na gestão da cadeia de suprimentos é conhecida como gestão da

cadeia de suprimentos circular e apresenta novas oportunidades para aprimorar os objetivos de sustentabilidade nas operações da cadeia de suprimentos (LAHANE; KANT, 2021; LAHANE; KANT; SHANKAR, 2020). Com isso, a reutilização de resíduos ou itens descartados pode se tornar uma vantagem competitiva para as empresas, ao melhorar a eficiência dos recursos, minimizar custos e melhorar a imagem da marca, além de reduzir drasticamente os impactos ambientais negativos (ATABAKI; MOHAMMADI; NADERI, 2020; KUMAR et al., 2021; WALKER et al., 2021)

Farooque et al. (2019, p.884), definem a cadeia de suprimentos circular como:

A integração do pensamento circular na gestão da cadeia de suprimentos e seus ecossistemas industriais e naturais circundantes. Restaura sistematicamente materiais técnicos e regenera materiais biológicos em direção a uma visão de desperdício zero por meio de inovação em todo o sistema em modelos de negócios e funções da cadeia de suprimentos, desde o design do produto/serviço até o fim da vida útil e gerenciamento de resíduos, envolvendo todas as partes interessadas em um produto/serviço. O ciclo de vida inclui fabricantes de peças/produtos, prestadores de serviços, consumidores e usuários.

Segundo Weetman (2017) a cadeia de suprimentos circular não restringe o escopo da recuperação de valor dos produtos em fim de vida para dentro da cadeia de suprimentos do próprio produtor. Em uma CSC, as empresas colaboram com outras empresas dentro e/ou fora dos setores originais da indústria, o que oferece uma perspectiva de sustentabilidade mais ampla em comparação com as cadeias de suprimentos de circuito fechado (CSCFs). Ainda, vale destacar que toda organização deseja que sua cadeia de suprimentos seja mais sustentável do ponto de vista econômico, ambiental e social (NOSRATABADI et al., 2019).

## 2.2 ECONOMIA CIRCULAR

A economia circular se tornou um conceito central de produção e consumo sustentáveis desde a sua introdução aos olhos do público (WALKER et al., 2021), e tem sido uma das tendências mais impactantes dos últimos anos. O que pareceu ser mais uma moda organizacional, agora se mostra como uma tendência global, afetando macro, meso e microambientes, que vão desde governos, organizações globais como a ONU, todo o setor privado, ciência, até consumidores finais e indivíduos (NOBRE; TAVARES, 2021).

### 2.2.1 Fundamentos da economia circular

De acordo com Geissdoerfer et al. (2018), a economia circular pode ser apresentada como um “sistema regenerativo no qual a entrada e o desperdício de recursos, a emissão de resíduos e o utilização de energia são minimizados pela desaceleração, fechamento e estreitamento dos circuitos de materiais”. Isso pode ser alcançado por meio de projeto, manutenção, reparo, reutilização, remanufatura, recondicionamento e reciclagem de longa duração. Pois, no ambiente atual, a economia circular é tida como estratégica e relevante para os resultados das empresas e geração de maiores valores (FONSECA et al., 2018), por reduzir os impactos ao meio ambiente e conflitos sociais, ao reutilizar insumos que não estão agregando valor ao sistema e reciclar dejetos que poderiam ser eventualmente descartados.

De acordo com *Ellen MacArthur Foundation (2015)* uma economia circular é restaurativa e regenerativa por princípio. Isto significa que a EC busca a otimização dos materiais, ampliando a vida útil dos produtos e ativos durante e após o seu uso, reduzindo o uso de insumos e recursos não renováveis e optando pela utilização de recursos renováveis e insumos de base biológica. Propõe também a maior circulação de resíduos e subprodutos através da reutilização, seja na mesma cadeia produtiva ou para o reaproveitamento em outras indústrias (LUZ, 2017). Pode-se definir a economia circular como o processo de transformação das operações da cadeia de suprimentos do modelo linear a um modelo de produção e negócios circular, onde materiais já utilizados e rejeitos ou componentes são reintroduzidos na CS, em um ciclo fechado de reuso, reciclagem, remanufatura, reparo e reforma, capturando valor e minimizando os impactos negativos (CHEN et al., 2020; FREI; JACK; KRZYZANIAK, 2020). A economia circular (EC) enfatiza a máxima utilização dos recursos de entrada deste sistema regenerativo, o que leva à redução de emissões de poluentes, do consumo de energia e desperdício. (ATABAKI; MOHAMMADI; NADERI, 2020; GEISSDOERFER et al., 2017)

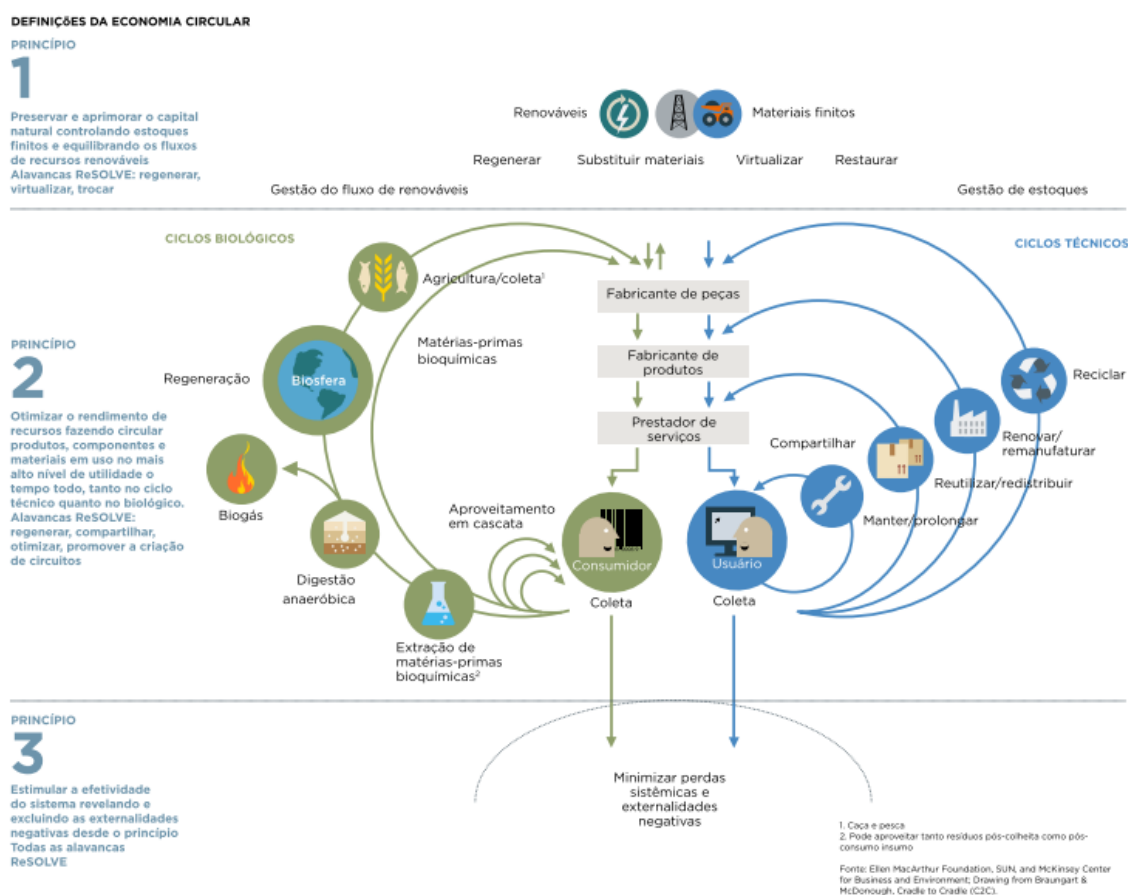
A economia circular se constitui em três princípios básicos. O primeiro aborda a preservação e o aumento do capital natural e, dada a necessidade de recursos naturais no sistema produtivo, esses são obtidos através de tecnologias e processos que apresentam o melhor desempenho e utilizam de recursos renováveis. O segundo princípio se refere à otimização da funcionalidade e utilidade dos produtos, componentes e materiais, no ciclo biológico e técnico, para que possam ser reinseridos em um novo ciclo. O terceiro princípio tem como base a



eficiência do sistema, por meio da identificação e exclusão das externalidades negativas (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2017). A introdução dos princípios da economia circular na cadeia de suprimentos fornece às empresas novas concepções relacionadas ao design dos produtos, processo de fabricação, logística, vendas, uso dos produtos e gestão das informações (CAPELLEVEEN et al., 2021).

A Figura 4, elaborada por *Ellen MaCarthur Foundation* (2017) relaciona os agentes da economia circular e localiza cada um dos princípios no sistema:

Figura 4 – Diagrama representando o sistema da Economia Circular.



Fonte: *Ellen MaCarthur Foundation* (2017)

Kirchherr et al. (2017), após revisarem 114 definições de economia circular, contribuíram com o seguinte conceito:

“Uma economia circular descreve um sistema económico que se baseia em modelos de negócio que substituem o conceito de 'fim de vida' pela redução, alternativamente reutilização, reciclagem e recuperação de materiais nos processos de

produção/distribuição e consumo, operando assim ao nível micro (produtos, empresas, consumidores), nível meso (parques eco industriais) e nível macro (cidade, região, nação e além), com o objetivo de alcançar o desenvolvimento sustentável, o que implica criar qualidade ambiental, prosperidade econômica e equidade social, para o benefício das gerações atuais e futuras”

Para Schroeder; Anggraeni e Weber (2019) as práticas de economia circular podem apoiar o alcance de números expressivos de objetivos de desenvolvimento sustentável. Por isso, é uma das soluções mais reconhecidos em busca desses resultados (GEISSDOERFER et al., 2018). Em paralelo, conceitos e práticas devem ser mais bem estudados na relação entre Economia Circular e o desenvolvimento sustentável. Para uma sociedade mais sustentável, é importante que os efeitos positivos e negativos de uma economia mais circular em relação ao desenvolvimento sustentável sejam conhecidos (GEISSDOERFER et al., 2017).

### **2.2.2 Fatores críticos de sucesso para implementação da economia circular**

Identificar os Fatores Críticos de Sucesso (FCS) dos projetos e a forma como eles são percebidos pelas pessoas diretamente envolvidas em sua gestão é de vital importância para otimizar e priorizar ações (ARNAIZ et al., 2021). Assim, os FCS são utilizados como auxílio ao cumprimento dos objetivos e missão da organização ou projeto (GATES, 2010). Esses fatores críticos de sucesso são as porcas e parafusos que constroem um projeto bem-sucedido (ZAMAN et al., 2022).

Singhal, Tripathy e Jena (2020) identificaram, com base nas opiniões e sugestões de especialistas, 19 fatores críticos para o sucesso da economia circular que se encontram no Quadro 1. O estudo teve enfoque na área de remanufatura, mas apesar do viés direcionado a esse setor muitos dos fatores levantados podem ser aplicados à implementação da EC em outro contexto industrial. Esses fatores são classificados em fatores externos e internos, sendo os fatores externos os que levam uma organização a iniciar as práticas de remanufatura e a criar um nicho no mercado de remanufaturas, e os fatores internos influenciam o processo de remanufatura e a automotivação da gestão para a remanufatura.

Quadro 1 - Fatores críticos para o sucesso da EC na remanufatura

No	Categoria	Nome	Efeito
----	-----------	------	--------

1	Externo	Identidade da empresa de remanufatura	Os consumidores têm uma atitude diferente em relação aos produtos remanufaturados do fabricante original do equipamento em comparação com os produtos remanufaturados de terceiros.
2		Regulamentos governamentais	Desempenham um papel crucial na proliferação de atividades de remanufatura
3		Estratégia de cobrança	A disponibilidade contínua pode ser assegurada por meio de um canal reverso eficaz.
4		Reputação da marca	A maioria dos consumidores-alvo pode aceitar produtos remanufaturados de uma empresa com alto valor de marca.
5		Reputação do vendedor	Os consumidores preferem pagar mais pelos produtos remanufaturados vendidos por um vendedor com feedback positivo.
6		Consciência verde	Motiva os consumidores a comprar produtos remanufaturados.
7		Intenção de compra	Possuem uma influência significativa no sucesso dos produtos remanufaturados no mercado.
8		Intenção de Devolução	A remanufatura só pode ser iniciada se os consumidores devolverem os produtos usados.
9		Estratégia de preços	As chances de canibalização podem ser reduzidas significativamente se os preços dos produtos remanufaturados forem criteriosos.
10	Interno	Tecnologia	Necessário para lidar com a incerteza na qualidade, quantidade e tempo de devolução de produtos.
11		Controle de operações	A coordenação entre as operações de remanufatura, descarte e fabricação é necessária para satisfazer a demanda dos consumidores.
12		Mão de obra qualificada	Necessário para lidar com o processo desafiador de remanufatura, como desmontagem, inspeção etc.
13		Políticas de classificação	Auxilia na otimização do custo de remanufatura e custo de aquisição do produto usado.
14		Comprometimento dos gestores de gestão	O comprometimento da alta administração é necessário para estabelecer a prática de remanufatura.
15		Projeto para remanufatura	Inevitável para aumentar a eficiência e eficácia da remanufatura.
16		Inspeção	A qualidade dos produtos remanufaturados pode ser assegurada se cada parte dos produtos usados for inspecionada minuciosamente e com precisão.
17		Correspondência de materiais	A coordenação durante o processo de desmontagem, remanufatura e remontagem é necessária para garantir a mesma identidade das peças do produto remanufaturado e do produto devolvido.
18		Agendamento	Um método robusto de programação que incorpore roteamento condicional e incerteza é inevitável para uma remanufatura eficiente.
19	Medo de canibalização	As empresas podem preferir a reciclagem ou descarte do produto usado à remanufatura devido ao medo de canibalização.	

Fonte: Adaptado de Singhal, Tripathy e Jena (2020)

Já, para Zaman et al. (2022), os FCS para implementação de um projeto no contexto da economia circular, foram classificados em quatro tipos: fatores organizacionais, fatores de equipe, fatores de comunicação e fatores técnicos. Zaman et al. (2022) utilizaram a modelagem

de equações estruturais para correlacionar os fatores críticos de sucesso definidos ao apoio da liderança e sucesso sustentável do projeto. Com base em trabalhos anteriores, foram escolhidos itens para descrever cada um dos fatores e propiciar que a relevância dos mesmos fosse mensurada, resultando no panorama final de fatores apresentado no Quadro 2:

Quadro 2 - FCS para implementação de projetos no contexto da EC

Fatores organizacionais	A organização dá grande importância aos objetivos e valores de trabalho dos colaboradores, e é flexível no horário de expediente
	A organização apoia os colaboradores em momentos de dificuldade
Fatores de equipe	Os membros da equipe possuem conhecimento específico sobre a tecnologia do projeto de energia renovável
	Os membros da equipe do projeto possuem alta competência e experiência
Fatores de comunicação	A equipe de projeto tem um canal de comunicação eficaz
	As metas do projeto são claramente estabelecidas para que cada membro da equipe entenda seu papel
Fatores técnicos	Os participantes do projeto enfrentam eventuais problemas durante a implementação técnica
	O gerente do projeto distribui as tarefas técnicas dentre os membros da equipe do projeto

Fonte: Zaman et al. (2022)

Os resultados de Zaman et al. (2022) indicam que os fatores organizacionais e de comunicação desempenham um papel importante na obtenção do sucesso sustentável dos projetos. Foi identificada uma relação positiva e significativa entre fatores técnicos e o sucesso do projeto. Em relação aos fatores de equipe, foi observada uma baixa relação ao sucesso sustentável do projeto. Foi observado que apenas os fatores técnicos possuem uma relação negativa e insignificante com o apoio da liderança, e, segundo os autores, isso se deve ao fato de que em projetos de energia renovável, o conhecimento técnico básico é suficiente para os líderes do projeto, dada a necessidade de equipe específica qualificada, não sendo necessário que a liderança envolvida aos projetos seja totalmente técnica pois não é ela que os executa. Os resultados confirmam que existe uma conexão positiva e significativa entre a liderança de apoio e o sucesso sustentável do projeto.

Orji, U-Dominic e Okwara (2021) definiram e priorizaram vinte e dois fatores determinantes para implementação da cadeia de suprimentos circular na indústria nigeriana, obtendo o ranking de fatores do Quadro 3, ordenado do fator mais relevante ao menos relevante:

Quadro 3 - Fatores críticos de sucesso para implementação da CSC

Ranking	Fator
1	Presença de competidores verdes
2	Desenvolvimento da infraestrutura de logística reversa
3	Otimização de recursos
4	Poder financeiro
5	Mecanismos de suporte de preço
6	Alinhamento à economia circular na política geral da empresa
7	Visibilidade da cadeia de suprimentos
8	Introdução de rastreabilidade <i>blockchain</i>
9	Certificação ISO
10	Sistema de gerenciamento do ecossistema
11	Design verde
12	Integração da circularidade nos planos da empresa
13	Incorporação de tecnologias digitais como sensores remotos, entre outros
14	Regulação governamental estruturada
15	Conscientização do público sobre os benefícios da sustentabilidade
16	Desenvolvimento de habilidades e competências para economia circular
17	Parceria e colaboração efetiva
18	Comprometimento da alta direção
19	Treinamentos periódicos em economia circular
20	Atitude positiva dos consumidores
21	Auditorias ambientais periódicas
22	Desenvolvimento de relacionamento com fornecedores

Fonte: adaptado de Orji, U-Dominic e Okwara (2021)

Moktadir et al. (2020) identificaram e avaliaram os fatores críticos de sucesso (FCS) necessários ao desenvolvimento de uma estratégia de negócios com base nas práticas de EC, e para minimizar a poluição ambiental na cadeia de suprimentos. Os FCS foram identificados por meio de uma revisão abrangente da literatura e validados por opiniões de especialistas, obtendo como resultado o conjunto de fatores apresentado no Quadro 4.

Quadro 4 - Fatores críticos de sucesso para implementação da EC

<b>FCS</b>	<b>Descrição</b>
Ecodesign para gestão de resíduos	O design ecológico pode ajudar a minimizar a poluição ambiental. Também ajuda a obter eficiência de recursos, minimizando o desperdício nas cadeias de suprimento.
Apoio do governo para financiamento de P&D	P&D para implementação de CE precisa de financiamento. Exige que os tomadores de decisão tornem as cadeias de suprimento mais eficientes para a implementação do CE.
Comprometimento da liderança	A liderança e o comprometimento da alta administração podem fazer com que os tomadores de decisão implementem práticas de CE. A implementação do CE requer boa liderança e comprometimento da alta administração.
Escassez ecológica dos recursos	A escassez ecológica de recursos pode atuar como um fator de sucesso, forçando os tomadores de decisão a implementar práticas de CE para minimizar o uso de recursos no processo de produção. Pode atuar como fator motivacional de sucesso para a implementação da CE.
Legislação forte obrigando CE	Uma legislação forte pode forçar as indústrias a implementar práticas de CE para a redução da poluição ambiental. Pode estimular a coleta de produtos usados e resíduos para reciclagem e reutilização.
Conhecimento de CE	Em países em desenvolvimento como Bangladesh, as práticas de CE não são bem conhecidas. Instalações de treinamento para práticas de CE podem ser úteis para a implementação de CE.
Práticas de logística reversa	Os produtos usados criam uma poluição ambiental significativa. As práticas de logística reversa em todo a CS podem ajudar a atingir as metas de CE.
Pressão da concorrência para CE	A crescente globalização obriga a indústria do couro a se representar não apenas no mercado doméstico, mas também no mercado internacional. A pressão da concorrência para práticas de CE no mercado global pode obrigar a introdução de práticas de CE

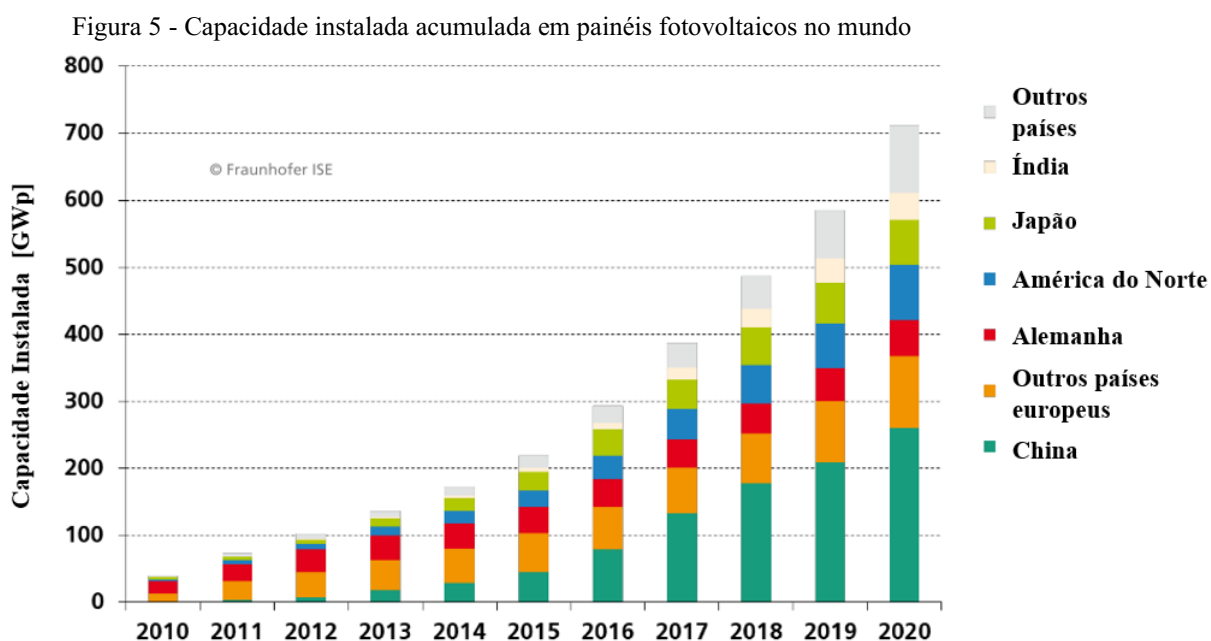
**Fonte: adaptado de Moktadir et al. (2020)**

Os fatores críticos de sucesso podem assegurar e melhorar o desempenho das organizações e de seus projetos (DEWI et al., 2018), e podem portanto contribuir para a implementação da economia circular nos setores da indústria. Após a apresentação do contexto do setor de energia solar fotovoltaica, sua tecnologia e desenvolvimento em termos de sustentabilidade, os fatores críticos de sucesso de implementação da EC na indústria FV foram selecionados com este enfoque, utilizando como base a literatura apresentada.

### 2.3 DESENVOLVIMENTO DO SETOR DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

O desenvolvimento de novas tecnologias de energia solar é considerado uma das muitas soluções-chave para atender à crescente demanda mundial por energia (KABIR et al., 2018) e a dependência por combustíveis fósseis (FERREIRA et al., 2018). As energias

renováveis e a tecnologia solar fotovoltaica, em especial, vêm crescendo exponencialmente, principalmente devido às mudanças climáticas e após as novas políticas adotadas por muitos países para reduzir as emissões de carbono advindas dos Acordos Climáticos de Paris em 2015. (MOREAU; DOS REIS; VUILLE, 2019). Esse crescimento pode ser observado na figura 5, que contém o gráfico representativo da curva de crescimento da capacidade instalada de painéis fotovoltaicos no mundo.



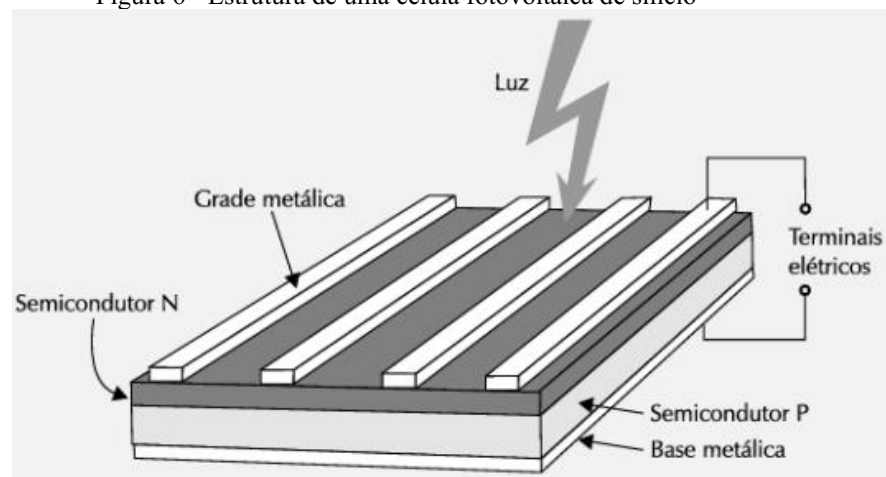
Fonte: ISE (2021)

A expansão da representatividade das tecnologias solares, no entanto, enfrenta diversas barreiras técnicas, como baixa eficiência das células solares, equilíbrio de sistemas de baixo desempenho, obstáculos econômicos, como altos custos iniciais e falta de mecanismos de financiamento, e obstáculos institucionais, como infraestrutura inadequada e falta de mão de obra qualificada (KABIR et al., 2018). Para que a competitividade e difusão dessa tecnologia seja potencializada, é necessária a integração de diversos atores como governo, investidores, empresas, concessionárias de energia elétrica e consumidores dispostos a contribuir para o desenvolvimento econômico, ambiental e social que a geração de energia solar fotovoltaica pode proporcionar.

### 2.3.1 Fundamentos da geração de energia solar

O conceito de energia solar se refere à captação e utilização da luz e da energia térmica geradas pelo Sol através das tecnologias envolvidas na consecução desse objetivo (BESARATI et al., 2013). As tecnologias atuais de energia solar podem ser classificadas em passivas e ativas, sendo que a tecnologia passiva envolve o acúmulo de energia solar sem transformação em qualquer outra forma de energia, a exemplo da distribuição de energia térmica solar para aquecimento de residências. Já a tecnologia ativa coleta a radiação solar e utiliza equipamentos mecânicos e elétricos para a conversão da energia solar em outras formas de energia, como calor e energia elétrica (SUN; WANG, 2016). No grupo de tecnologia solar ativa, enquadra-se a tecnologia fotovoltaica. O efeito fotovoltaico permite a conversão direta da luz em eletricidade quando a luz ou radiação eletromagnética do sol incide sobre uma célula composta de materiais semicondutores (VILLALVA, 2012). A figura 6 apresenta a estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício, que representou cerca de 95% da produção total de tecnologia fotovoltaica até 2019 (ISE, 2021):

Figura 6 - Estrutura de uma célula fotovoltaica de silício



Fonte: Villalva (2012)

A célula fotovoltaica, segundo Villalva (2012), é composta pelos seguintes elementos:

- ✓ Duas camadas de material semicondutor (em geral, silício) P e N, com diferentes concentrações de elétrons que proporcionam a fluência dos elétrons da camada N para a camada P originando um campo elétrico e criando uma barreira de potencial entre as duas camadas;



- ✓ Grade (fina grade metálica impressa na célula) e base metálica inferior (película de alumínio ou prata), que são os terminais elétricos responsáveis pela coleta da corrente elétrica produzida pela ação da luz;
- ✓ Parte superior da célula, que recebe a luz, e, portanto, precisa ser translúcida;
- ✓ Camada de material antirreflexivo, para evitar a reflexão e aumentar a absorção de luz pela célula. Normalmente feita de nitreto de silício ou de dióxido de titânio.

As proporções em peso dos componentes e materiais presentes em um painel fotovoltaico, se encontram na Tabela 1 elaborada por Latunussa et al. (2016):

Tabela 1 - Componentes de um painel fotovoltaico

Componente	Porcentagem em peso (%)
Vidro (contendo antimônio 0,1–1% de vidro)	70
Estrutura fotovoltaica (principalmente alumínio)	18
Camada de encapsulamento (polímero como EVA)	5,1
Célula solar (contém silício)	3,65
Camada de folha traseira (fluoreto de polivinila)	1,5
Cabos (contendo cobre e polímeros)	1
Condutor interno, Alumínio	0,53
Condutor interno, cobre	0,11
Prata	0,053
Outros metais (estanho, chumbo)	0,053

Fonte: Latunussa et al. (2016)

Além da estrutura e eficiência dos painéis, a geração de energia fotovoltaica depende diretamente da radiação solar nas regiões, variável principal de um projeto de usina de geração de energia solar fotovoltaica. (BESARATI et al., 2013)

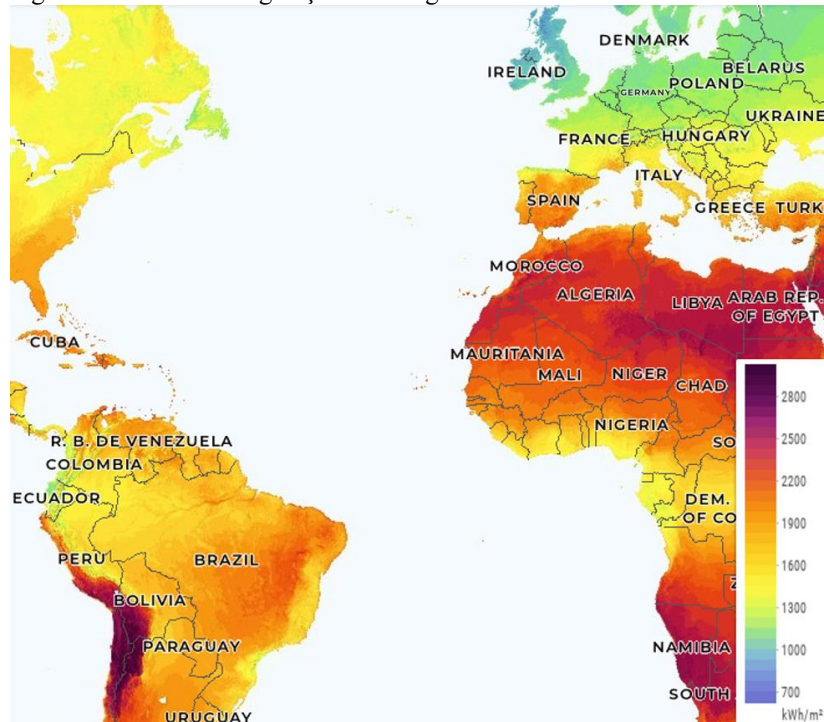
### 2.3.2 Energia solar fotovoltaica no Brasil

O Brasil apresenta grande potencial de aproveitamento da energia solar durante todo o ano devido a sua localização próxima aos trópicos. O uso da energia solar traz benefícios de longo prazo para o país, possibilitando o desenvolvimento de regiões remotas onde o custo da eletrificação por rede convencional é muito alto, regulando também o fornecimento de energia em períodos de estiagem. A gama de possibilidades no uso a médio e longo prazo desta forma

abundante de energia renovável vai desde pequenos sistemas fotovoltaicos independentes até grandes usinas que utilizam energia solar concentrada (ROSSA; DIAS; MACAGNAN, 2015).

A distribuição de irradiação solar é desigual sobre a superfície terrestre, sendo as regiões mais próximas do equador, como o Brasil, as mais privilegiadas. A Figura 7 mostra o potencial de geração de energia fotovoltaica no globo, em kWh/m<sup>2</sup>. (GLOBAL SOLAR ATLAS, 2022)

Figura 7 - Potencial de geração de energia fotovoltaica no Mundo



Fonte: GLOBAL SOLAR ATLAS (2022)

Observa-se nitidamente que o Brasil possui um potencial de geração maior que a maioria dos líderes mundiais em energia solar fotovoltaica, como Alemanha, França, entre outros (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021). Apesar do elevado potencial solar mencionado, o incentivo à tecnologia ainda é incipiente no Brasil (FERREIRA et al., 2018). Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (2021), o Brasil não esteve entre os dez maiores produtores mundiais de energia solar fotovoltaica em 2020, apesar de ser o oitavo maior consumidor mundial de energia elétrica e o segundo maior gerador de energia a partir de usinas hidrelétricas, atrás apenas da China. A Figura 8 demonstra a distribuição das usinas fotovoltaicas pelo Brasil em operação, de acordo com os dados oficiais da ANEEL (2022), e

observa a maior representatividade das UFV na região norte do país, bem como em todo o litoral.

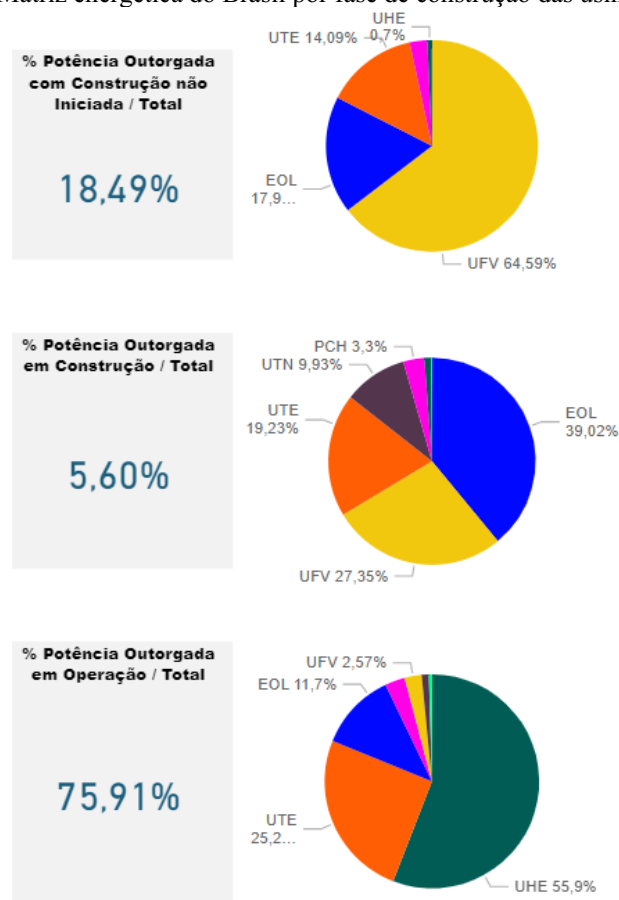
Figura 8 - Localização das usinas fotovoltaicas no Brasil



Fonte: ANEEL (2022)

A energia fotovoltaica é mais do que uma fonte alternativa para o Brasil, mas uma opção viável e promissora para ampliar a geração de eletricidade. Existe um enorme espaço para seu crescimento no país (VILLALVA, 2012), o que justifica o investimento em projetos direcionados ao setor. Segundo dados divulgados pela ANEEL (2022) 64,59% da potência outorgada para projetos ainda não iniciados de usinas de geração de energia é referente a Usinas Fotovoltaicas (UFV). Para os empreendimentos em construção, 27,35% da potência outorgada se refere a projetos de UFV. A figura 9 demonstra esse percentual, bem como a distribuição atual da matriz energética Brasileira.

Figura 9 - Matriz energética do Brasil por fase de construção das usinas



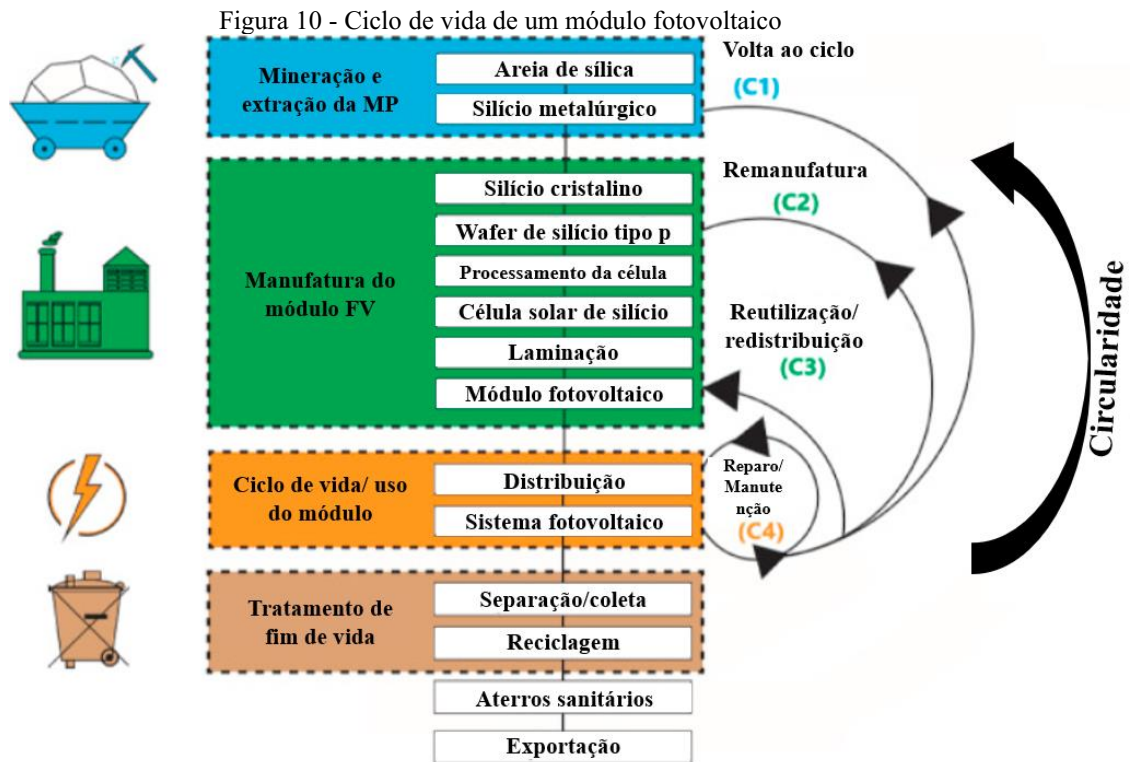
Fonte: ANEEL (2022)

Apesar da baixa representatividade na matriz energética Brasileira, Garlet et al. (2019) observam que a fonte de energia solar deverá se expandir no país, mas ainda há muitas barreiras técnicas, econômicas, sociais, gerenciais e políticas a serem enfrentadas para sua consolidação.

### 2.3.3 Painéis fotovoltaicos e impactos ambientais

O aumento exponencial global das instalações fotovoltaicas (PV) anuais gera uma preocupação crescente com relação aos níveis de resíduos fotovoltaicos gerados. Considerando que a vida útil média de um módulo fotovoltaico de silício cristalino (c-Si) é de 25 a 30 anos (MAHMOUDI et al., 2019). Estima-se que, até 2050, entre 60 e 78 milhões de toneladas de resíduos fotovoltaicos estarão em circulação (FARRELL et al., 2020). Desse modo, aumentar o desempenho da reciclagem de painéis fotovoltaicos é fundamental para a implementação bem-sucedida da economia circular na indústria fotovoltaica (MAHMOUDI et al., 2019).

Farrell et al. (2020) propõem um diagrama borboleta que reúne as oportunidades circulares que surgem na indústria fotovoltaica, desde a extração da matéria-prima até o tratamento de resíduos em fim de vida. A Figura 10 contém o diagrama adaptado:



Fonte: Adaptado de Farrell et al. (2020)

As cascatas são rotuladas de C1 a C4, variando do processo menos circular ao mais circular. Devido às particularidades técnicas do módulo fotovoltaico, as oportunidades de reparo e manutenção, reutilização e remanufatura de células fotovoltaicas e materiais secundários associados sem processamento agressivo são muito limitadas. Para extração do máximo valor de qualquer processo de reciclagem, é necessário produzir um reciclado de alta qualidade que seja ou possa se tornar um produto de alto valor. A reciclagem de ciclo fechado tenta recuperar produtos e materiais secundários que podem ser alimentados na cadeia de suprimentos do produto original. Neste caso, materiais e produtos como *wafer* de silício estão sendo recuperados e reutilizados na fabricação de novas células fotovoltaicas. A reciclagem de ciclo aberto acontece quando a qualidade dos materiais não é boa o suficiente para o produto original, mas ainda pode ter um valor menor e ser usado em outros setores. Atualmente, existem três famílias de processos que são utilizados sozinhos ou em conjunto para a reciclagem de células fotovoltaicas. São processos físicos, químicos e térmicos. A forma e ordem como esses

processos são aplicados afetará a qualidade e o valor dos materiais recuperados. (FARRELL et al., 2020).

No sentido econômico, a possibilidade de reutilizar alguns dos constituintes dos módulos, seja na forma física ou energética, pode compensar o déficit potencial vigente de metais raros e preciosos imprescindíveis na constituição das células. O benefício é financeiro e em termos de sustentabilidade da cadeia, visto que a disponibilidade destes metais está ameaçada (FARRELL et al., 2020).

Mathur, Singh e Sutherland (2020) propõem um modelo de circularização da indústria de painéis fotovoltaicos através da aplicação da noção de Simbiose do Ciclo de Vida (SCV). Para tal, classificam os componentes dos painéis fotovoltaicos no fim de ciclo de vida que em recursos com possibilidade de reutilização para outros fins, e rejeito. A classificação proposta encontra-se no Quadro 5:

Quadro 5 - Reaproveitamento dos materiais no fim de ciclo de vida dos painéis FV

<b>Material/Energia Recuperado</b>	<b>Recurso / Rejeito</b>
Sucata de alumínio	Recurso
Sucata de vidro	Recurso
Sucata de cobre	Recurso
Silício metálico	Recurso
Prata	Recurso
Cinzas volantes	Recurso
Resíduos líquidos (Água + Ca(OH) <sub>2</sub> + HNO <sub>3</sub> )	Recurso
Elettricidade (da incineração de polímeros)	Recurso
Energia Térmica (da incineração de polímeros)	Recurso
Lodo (resíduos perigosos contendo resíduos metálicos)	Rejeito
Vidro contaminado	Rejeito

Fonte: Mathur, Singh e Sutherland (2020)

Foram previstos e mensurados por Mathur, Singh e Sutherland (2020) impactos ambientais evitados pela implementação do modelo circular. Devido à indisponibilidade de dados precisos, os resultados obtidos resultam de uma estimativa conservadora. O fator de medida é o benefício ambiental líquido que se encontra na Tabela 2:

Tabela 2 - Impactos ambientais evitados por um modelo circular no ciclo produtivo de painéis FV

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Unidade</b>	<b>Benefícios ambientais líquidos, X A</b>
<b>Destruição do ozônio</b>	kg CFC-11	-1.06E-04
<b>Potencial de aquecimento global</b>	kg CO <sub>2</sub>	2.75E+03
<b>Acidificação</b>	kg SO <sub>2</sub>	1.07E+01
<b>Eutrofização</b>	kg N	1.28E+01
<b>Carcinogênicos</b>	CTUh	3.87E-04
<b>Não cancerígenos</b>	CTUh	1.27E-03
<b>Efeitos respiratórios</b>	kg PM <sub>2,5</sub>	5.24E+00
<b>Ecotoxicidade</b>	CTUe	3.20E+04

Fonte: Mathur, Singh e Sutherland (2020)

Contreras-Lisperguer et al. (2021) explicitam requisitos de projeto que facilitam a recuperação futura dos painéis fotovoltaicos, dentre eles, como a substituição de todos os materiais tóxicos por alternativas não tóxicas (ou isolamento efetivo desses materiais, situação não ideal) e a previsão da fase de desmontagem do produto, de maneira a tornar o processo o mais eficiente e eficaz possível.

Erol et al. (2021) elencam os fatores críticos de sucesso mencionados no Quadro 6 para a implementação de um ecossistema baseado em *blockchain*, com o objetivo apoiar a circularização da produção de painéis solares fotovoltaicos.

Quadro 6 - FCS para implementação da EC de painéis FV com base em um modelo *blockchain*

<b>Fator</b>	<b>Detalhamento</b>
FC1	A existência de regulação exigente
FC2	A existência de programas de incentivo governamentais eficazes
FC3	Compromisso da alta administração das empresas
FC4	Conhecimento técnico
FC5	Abertura a novos modelos de negócios
FC6	Colaboração e coordenação entre as equipes
FC7	Reciclagem eficaz e gestão de compras de componentes com enfoque verde
FC8	Interoperabilidade aprimorada
FC9	Agilidade e resiliência das equipes
FC10	Relação de confiança entre as partes interessadas
FC11	Visibilidade e importância dos consumidores
FC12	Desintermediação
FC13	Gestão eficiente de custos e recursos

Fonte: Adaptado de Erol et al. (2021)

As possibilidades para a circularização do ciclo de vida dos painéis de fotovoltaica são existentes, mas as barreiras que prejudicam essas atividades devem ser removidas e as metas sustentáveis revisadas, de modo a avançar para uma economia circular orientada para o ciclo de vida desta tecnologia, para que os resíduos finais se aproximem cada vez mais do zero, através do ecodesign eficiente direcionado a desconstrução e remanufatura (FARRELL et al., 2020).



### 3 MÉTODOS

Este capítulo traz a classificação da pesquisa por meio da estrutura clássica, os procedimentos metodológicos e a apresentação da justificativa de utilização do método, além das suas etapas de aplicação.

#### 3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa pode ser definida como um conjunto de ações sugeridas para solucionar um problema, com base em procedimentos racionais e sistemáticos. A forma clássica de classificação das pesquisas se estrutura em: natureza, abordagem, objetivos e procedimentos técnicos. (SILVA; MENEZES, 2005).

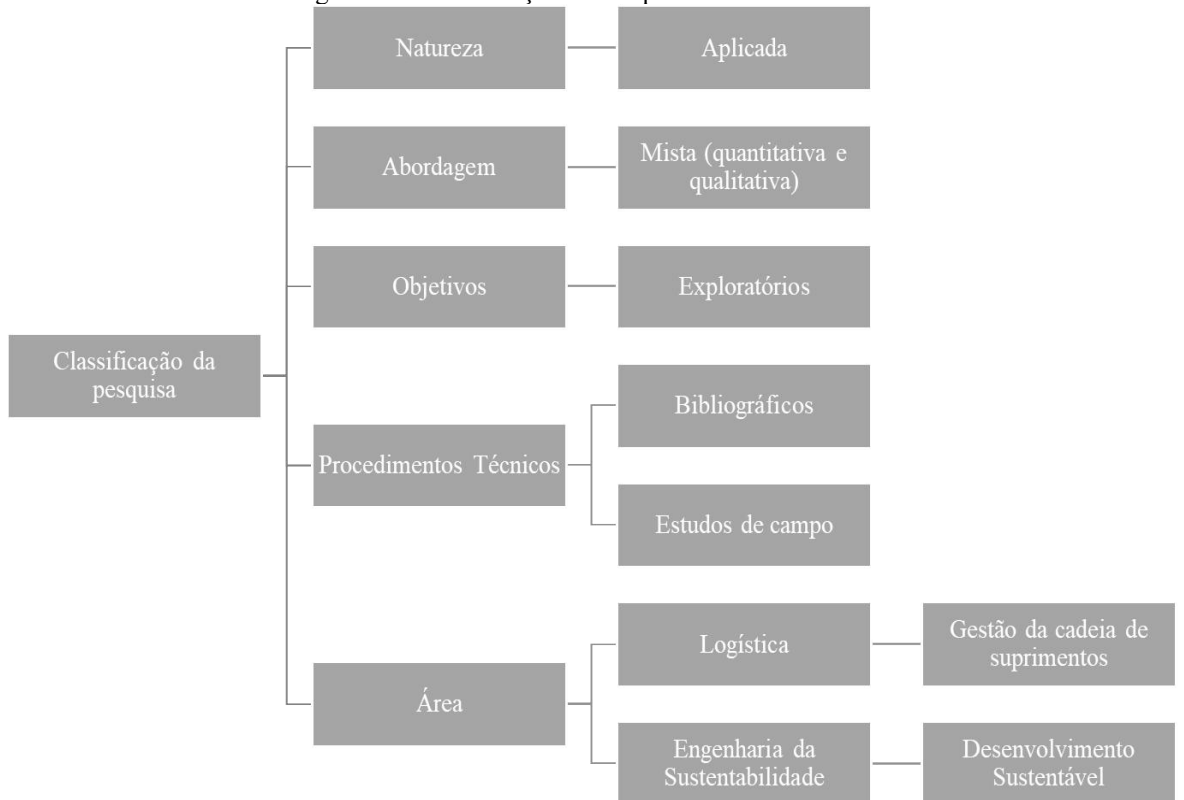
Com relação à sua natureza, o presente trabalho se caracteriza como uma pesquisa aplicada, pois tem como finalidade resolver um problema específico identificado pelo pesquisador (GIL, 2017). Quanto à abordagem do trabalho, pode ser classificada como mista, ao integrar a coleta e análise de dados qualitativos e quantitativos que se complementam na busca pelo resultado (VENKATESH; BROWN; SULLIVAN, 2016).

Os objetivos da pesquisa são do tipo exploratórios, visto que desenvolvem hipóteses, ampliam a familiaridade ao tema e clarificam conceitos (MARCONI; LAKATOS, 2017). Já os procedimentos técnicos são tanto bibliográficos quanto estudos de campo, devido à realização da utilização de material já publicado sobre o tema mas também coleta de dados (GIL, 2017), realizada com especialistas para priorização dos fatores críticos de sucesso utilizando o DEMATEL.

Dentre as áreas da Engenharia de Produção definidas pela ABEPRO (2008), o trabalho com enfoque em Economia Circular se enquadra na área de Logística, na subárea de Gestão da Cadeia de Suprimentos, e também na área de Engenharia de Sustentabilidade, subárea de Desenvolvimento Sustentável. A Engenharia de Sustentabilidade trata da utilização eficiente dos recursos naturais nos sistemas produtivos diversos, da destinação e tratamento dos resíduos e efluentes destes sistemas.

A Figura 11 resume a classificação completa da presente pesquisa.

Figura 11 - Classificação da Pesquisa

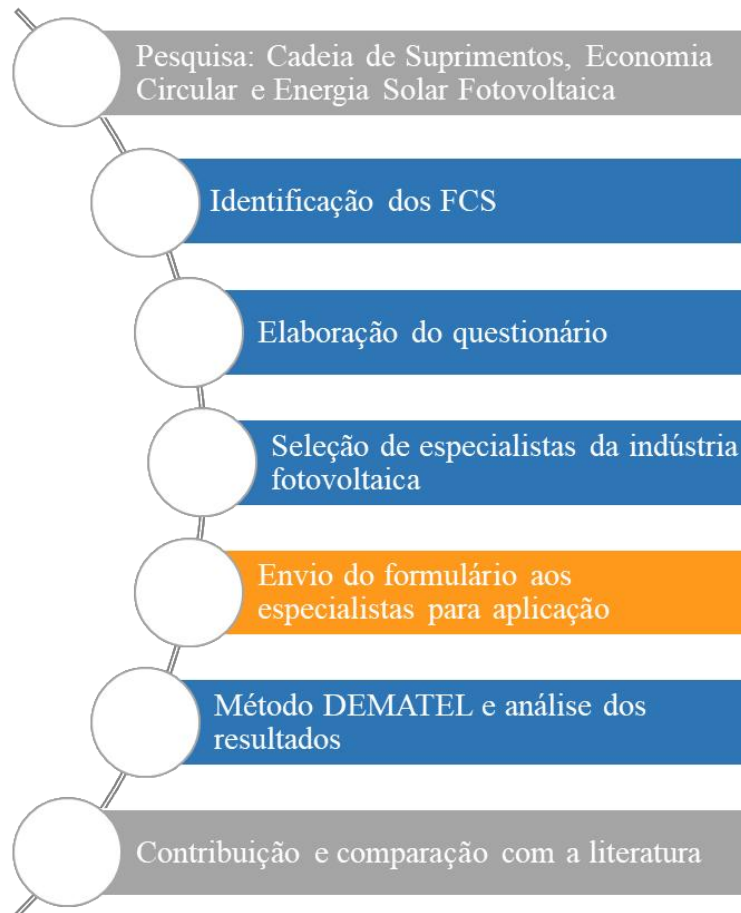


Fonte: A autora (2022)

### 3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo são apresentadas as ferramentas e procedimentos utilizados na realização do trabalho. O procedimento metodológico foi dividido em três macro etapas: revisão bibliográfica, desenvolvimento do estudo e pesquisa de campo. A sequência das atividades em cada uma das macro etapas se encontra na Figura 12.

Figura 12 - Macro etapas do procedimento metodológico



Fonte: A autora (2022)

O tópico 1, de revisão bibliográfica, foi de suma importância para a compreensão dos conceitos de Cadeia de Suprimentos, Cadeia de Suprimentos Sustentável, Economia Circular e Energia Solar Fotovoltaica, bem como os fatores críticos de sucesso para a aplicação proposta com base na literatura. Essa etapa foi realizada por meio de consulta às principais bases bibliográficas eletrônicas, sendo elas: *Science Direct*, *Scopus*, *Google Scholar*, entre outras. Livros disponíveis na Biblioteca da UFSC e periódicos da CAPES também foram utilizados. As principais palavras-chave utilizadas foram “*Circular Economy*”, “*Circular Supply Chain*”, “*Photovoltaic Panels*” e “*Solar Energy*”. Este tópico serviu como elemento de entrada para a etapa 2 de identificação dos fatores críticos na implementação da economia circular no setor de energia solar fotovoltaica, através da análise crítica da bibliografia e aplicabilidade dos fatores ao setor e ao contexto brasileiro. Os fatores foram clusterizados para facilitar a dinâmica dos especialistas no momento de priorizá-los e relacioná-los. Na etapa 3, o questionário foi elaborado utilizando a ferramenta *google forms* por sua facilidade de elaboração e compartilhamento, e o texto do formulário foi produzido visando

o fácil entendimento dos envolvidos. Os especialistas foram selecionados na etapa 4 considerando o critério de experiência e atuação no setor de energia solar fotovoltaica em escala não residencial no Brasil. O perfil dos entrevistados se encontra no Quadro 10.

A etapa 5 foi realizada em uma semana, e orientações de preenchimento foram realizadas durante esse processo conforme surgisse a necessidade maiores informações por parte dos respondentes. Após a aplicação do formulário, na etapa 6, houve a coleta das respostas de todos os participantes e aplicação do método de análise multicritério DEMATEL com base nos dados recebidos. O detalhamento do método encontra-se no tópico subsequente, e as etapas obtidas na aplicação se encontram no capítulo de Resultados e Discussão. Por fim, na etapa 7, foi realizada a análise da contribuição para a bibliografia e a comparação com resultados de outros trabalhos.

### 3.3 MCDM E O MÉTODO DEMATEL

A “tomada de decisão multicritério”, ou *multi criteria decision making* (MCDM), diz respeito à utilização de vários critérios, muitas vezes divergentes, para decisões de alto impacto (MARHAVILAS et al., 2022; SARASWAT et al., 2021). Os métodos MCDM são, portanto, utilizados na seleção da melhor alternativa dentre um conjunto de opções, avaliando-as entre critérios variados (ÇOLAK; KAYA, 2017; KILIÇ; KAYA, 2015) contribuindo para a tomada de decisão (MARHAVILAS et al., 2022).

Assim, a análise multicritério (AMC) é uma ferramenta prática de apoio aos processos de tomada de decisão considerando vários critérios de avaliação, que pode ser amplamente aplicada no contexto de projetos de sustentabilidade. Suas etapas analíticas convencionais incluem: seleção de fatores, normalização, ponderação e agregação (OPON; HENRY, 2022). Castro et al. (2021) propõem a classificação dos métodos multicritério em métodos multiatributos (indicados para problemas discretos) e multiobjetivos (indicados para problemas contínuos), e segmenta os métodos multiatributos em métodos de normalização, peso, e por fim avaliação, em que se encaixa o DEMATEL.

#### 3.3.1 Justificativa da escolha do método DEMATEL

Dentre as várias técnicas de MCDM existentes, o DEMATEL possui destaque, sendo utilizado como uma importante abordagem para a tomada de decisão multicritério (APAYDIN; ALADAĞ, 2022). A abordagem DEMATEL foi desenvolvida pelo *Battele Memorial Institute*

de Genebra entre 1972 e 1976, para auxílio na resolução de problemas complexos de base gerencial, determinando os critérios que requerem maior foco (BOUZON; GOVINDAN; RODRIGUEZ, 2016). Essa técnica possui como vantagem em relação a outras técnicas a abordagem das influências mútuas entre fatores de tomadas de decisão, bem como das suas relações causais complexas, ou seja, tem a capacidade de apontar as interdependências entre os fatores e as relações causais para tomada de decisão (ASADI et al., 2022; MANOHARAN et al., 2022).

O DEMATEL (*Decision Making Trial and Evaluation Laboratory*) é utilizado para encontrar e analisar a associação de causa e efeito entre as variáveis de impacto de um sistema através do conhecimento de especialistas, além de identificar os componentes críticos (DALVI-ESFAHANI et al., 2019). Em suma, o método DEMATEL pode converter a relação entre as causas e os efeitos dos fatores em um modelo inteligível que auxilia o processo de tomada de decisão (SHAIK; ABDUL-KADER, 2013). Desse modo, o método DEMATEL esclarece o tipo de influência e analisa a hierarquia entre fatores, por isso se adequa à resolução de problemas de identificação de fatores críticos de sistemas complexos (DU; LI, 2022) e foi selecionado como método propício para aplicação no contexto do presente trabalho.

### **3.3.2 Etapas do Método DEMATEL**

Os passos a serem adotados para a aplicação do método DEMATEL (após a identificação dos fatores de influência com base na literatura e a seleção dos *experts* a serem contatados para fornecimento de opinião especializada) foram resumidos na Figura 13 adaptada dos trabalhos de Bouzon (2015); Xia, Govindan e Zhu (2015); Zhu, Sarkis e Geng (2011):

Figura 13 - Passos para a aplicação do método DEMATEL



Fonte: A autora (2022)

Quadro 7 - Escala tradicional de comparação DEMATEL

Nº	Definição
0	Sem influência
1	Influência baixa
2	Média influência
3	Influência alta
4	Influência muito alta

Fonte: Adaptado de Zhu, Sarkis e Geng (2011)

O uso do DEMATEL tem como pontos positivos o resultado gráfico que apresenta numericamente a relação entre os fatores de todos os níveis do sistema, e a apresentação da comparação da importância destes fatores (SHAIK; ABDUL-KADER, 2013). Além disso, é considerado um método eficaz para a identificação de componentes da cadeia causa-efeito de um sistema complexo, e por essas vantagens foi utilizado por diversos pesquisadores em diferentes áreas na última década (APAYDIN; ALADAĞ, 2022; SI et al., 2018).

Porém, limitações do método também podem ser destacadas, como o esforço massivo exigido dos especialistas na comparação de um número muito elevado de fatores. Nesse caso, sugere-se, a clusterização dos fatores na análise para mitigar o problema (BOUZON, 2015).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo aborda a seleção dos fatores críticos de sucesso a serem analisados, o perfil dos *experts* consultados, além da aplicação do método DEMATEL proposto. Os resultados da aplicação são discutidos e comparados com a literatura.

### 4.1 FATORES CRÍTICOS DE SUCESSO

Com base na literatura abordada no capítulo de fundamentação teórica, foram definidos os FCS a serem analisados por *experts*, através da aplicação do método DEMATEL.

Os fatores elencados foram divididos em categorias, com o intuito de facilitar a aplicação do método proposto (BOUZON, 2015). A divisão foi adaptada dos estudos de Zaman et al. (2022) e Bouzon, Govindan e Rodriguez (2016), resultando nas categorias de: Fatores Organizacionais (FO), Fatores Técnicos (FT), Fatores Governamentais (FG) e Fatores Ambientais (FA). O panorama geral de fatores se encontra no Quadro 8.



Quadro 8 - FCS para implementação da EC no setor de painéis FV com base na literatura

<b>Categorias</b>	<b>FCS</b>	<b>Descrição</b>	<b>Referências</b>
Fatores organizacionais	Comprometimento da alta direção	A liderança e o comprometimento da alta administração podem fazer com que os tomadores de decisão implementem práticas de EC A implementação da EC requer boa liderança e comprometimento da alta administração.	(BOUZON et al., 2016), (EROL et al., 2021), (MOKTADIR et al., 2020), (SINGHAL; TRIPATHY; JENA, 2020), (ZAMAN et al., 2022), (ORJI; U-DOMINIC; OKWARA, 2021)
	Alinhamento à EC na política geral da empresa e/ou em suas metas e objetivos	Influência significativa em termos de motivação	(BOUZON et al., 2016), (ORJI; U-DOMINIC; OKWARA, 2021)
	Capital para investimento	Viabiliza a implementação	(BOUZON et al., 2016), (ORJI; U-DOMINIC; OKWARA, 2021)
	Colaboração e coordenação entre as equipes	Permitindo desenvolvimento do projeto de implementação	(EROL et al., 2021), (ORJI; U-DOMINIC; OKWARA, 2021)
	Boa performance na gestão dos recursos	Permitindo desenvolvimento do projeto de implementação	(BOUZON et al., 2016), (EROL et al., 2021), (ORJI; U-DOMINIC; OKWARA, 2021), (SINGHAL; TRIPATHY; JENA, 2020), (ZAMAN et al., 2022)
Fatores técnicos	Conhecimento técnico das equipes para desenvolvimento de tecnologia	Habilidades técnicas que proporcionam o avanço em projetos tecnológicos	(BOUZON et al., 2016), (EROL et al., 2021), (SINGHAL; TRIPATHY; JENA, 2020), (ZAMAN et al., 2022)
	Conhecimento das práticas de EC	Alinhamento aos objetivos da EC para implementação coerente no processo produtivo	(MOKTADIR et al., 2020), (ORJI; U-DOMINIC; OKWARA, 2021)
	Enfoque em ecodesign visando desmontagem e gestão dos resíduos	Que possibilita melhor gestão dos componentes dos painéis em fim de vida	(CONTRERAS-LISPERGUER et al., 2021), (MOKTADIR et al., 2020), (ORJI; U-DOMINIC; OKWARA, 2021)
Fatores de mercado	Consciência sustentável dos consumidores	Motiva as empresas a investirem em EC visando atender o interesse dos seus clientes	(EROL et al., 2021), (SINGHAL; TRIPATHY; JENA, 2020)
	Relacionamento de parceria e confiança com fornecedores	Maior facilidade na implementação das práticas de EC em etapas da cadeia sob responsabilidade dos <i>stakeholders</i>	(EROL et al., 2021), (ORJI; U-DOMINIC; OKWARA, 2021)
	Presença de concorrentes implementando EC	A pressão da concorrência para práticas de EC instiga a introdução dessas práticas	(MOKTADIR et al., 2020), (ORJI; U-DOMINIC; OKWARA, 2021)
Fatores governamentais	Regulação governamental estruturada e exigente	Uma legislação forte obriga as indústrias a implementarem práticas de EC para a redução dos prejuízos ao meio ambiente	(BOUZON et al., 2016), (EROL et al., 2021), (MOKTADIR et al., 2020), (ORJI; U-DOMINIC; OKWARA, 2021), (SINGHAL; TRIPATHY; JENA, 2020)
	Existência de programas de incentivos governamentais eficazes	Incentivos fiscais ou apoio em verba de P&D motivam a implementação	(BOUZON et al., 2016), (EROL et al., 2021), (MOKTADIR et al., 2020)
Fatores ambientais	Escassez de recursos utilizados como matéria-prima	A escassez ecológica de recursos necessários para induz os tomadores de decisão a implementarem práticas de EC para minimizar o uso desses recursos, ou reincorporar recursos de produtos em fim de vida	(MOKTADIR et al., 2020)
	Contexto de prejuízos ambientais	Um cenário de prejuízos ambientais significativos pode incentivar a movimentação das indústrias no sentido da circularização da economia	(MOKTADIR et al., 2020)

Fonte: A autora (2022)

## 4.2 APLICAÇÃO DO DEMATEL

Esse capítulo aborda a operacionalização do método DEMATEL, apresentando também o perfil dos especialistas consultados e as etapas de aplicação.

#### **4.2.1 Viabilização da aplicação**

O método DEMATEL utilizado para análise das relações de causa e efeito entre variáveis de um sistema, se baseia no conhecimento dos especialistas para entendimento das interrelações e interdependências entre essas variáveis (DALVI-ESFAHANI et al., 2019). No contexto da presente pesquisa, foram considerados especialistas atuantes em parques fotovoltaicos, empresas de produção e montagem de painéis, reciclagem ou serviços em energia solar. Essas empresas e parques se localizam em diferentes cidades do Brasil e o porte das mesmas varia em pequeno, médio ou grande. Acadêmicos da área de economia circular e desenvolvimento sustentável, autores de pesquisas direcionadas ao contexto de energia solar, também compuseram o grupo de especialistas.

A identidade e o gênero dos especialistas foram preservados, mas os demais detalhes como formação, cargo, cidade, porte da empresa e atuação da empresa no setor solar fotovoltaico se encontram no Quadro 9.

Quadro 9 - Perfil dos respondentes da pesquisa

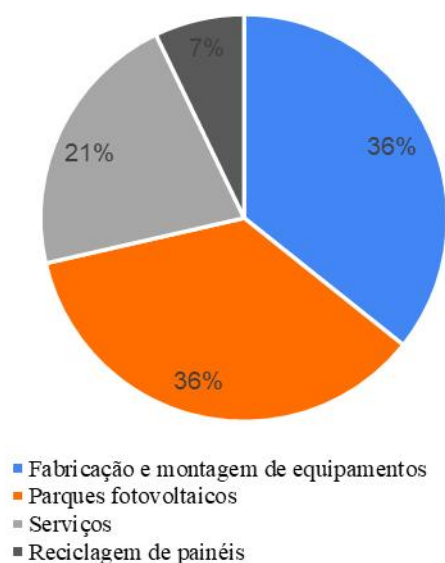
<b>Respondente</b>	<b>Formação</b>	<b>Cargo</b>	<b>Cidade</b>	<b>Porte da empresa - se aplicável</b>	<b>Atuação da empresa em energia solar FV</b>
Respondente 1	Engenheiro(a) eletricista	CEO	Vinhedo - SP	Pequeno	Reciclagem de painéis fotovoltaicos
Respondente 2	Engenheiro(a) de produção	Engenheiro(a) de Planejamento	Juazeiro - BA	Grande	Serviços em geração de energia fotovoltaica
Respondente 3	Engenheiro(a) eletricista, mestrando(a) em Engenharia de Produção	Engenheiro(a) de Suporte Técnico (pós-venda)	Florianópolis - SC.	Grande	Fabricante de inversores solares
Respondente 4	Doutor(a) em Engenharia de Produção	Professor(a) Universitário(a) Assistente	Porto Alegre - RS		
Respondente 5	Engenheiro(a) de produção	Analista de Negócios	São José - SC	Grande	Fabricante de produtos e soluções em energia fotovoltaica
Respondente 6	Engenheiro(a) eletricista	Encarregado(a) de O&M	Trairi - CE	Grande	Energia - Parque fotovoltaico
Respondente 7	Técnico em Eletrônica	Coordenador(a) de Usina	Trairi - CE, Areia Branca - RN e Assú - RN	Grande	Energia - Parques fotovoltaicos
Respondente 8	Engenheiro(a) de produção	Site manager da Engenharia do Proprietário	Juazeiro - BA	Grande	Serviços em geração de energia fotovoltaica
Respondente 9	Engenheiro(a) mecânico(a)	Analista de processos	Blumenau - SC	Grande	Atuação em empresas do setor de energia por mais 6 anos
Respondente 10	Engenheiro(a) Ambiental	Analista Ambiental	Assú - RN	Grande	Energia - Parque fotovoltaico
Respondente 11	Economista	Técnico(a) de manutenção	Assú - RN	Grande	Energia - Parque fotovoltaico
Respondente 12	Engenheiro(a) de produção	Almoxarife	São José do Belmonte - PE	Grande	Montagem industrial
Respondente 13	Ensino fundamental	Diretor(a) administrativo(a)	Russas - CE	Pequeno	Equipamentos, serviços e atendimento em energia solar
Respondente 14	Engenheiro(a) eletricista	CEO	Florianópolis - SC	Pequeno	Distribuidora de sistemas fotovoltaicos
Respondente 15	Graduado(a) em Gestão de RH e Técnico(a) de Segurança do Trabalho	Líder de HSE	Quixeré - Ceará	Médio	Energia - Parque fotovoltaico

Fonte: A autora (2022)

A maioria dos respondentes são engenheiras e engenheiros, dada a relação entre a área de energia solar fotovoltaica e a engenharia. Os cargos variam de atribuições logísticas e administrativas a funções de engenharia e manutenção até funções gerenciais, como diretores ou CEO's. A maioria dos profissionais contatados para participarem do estudo atuam em cidades localizadas na região nordeste, e a segunda maior parte atua na região sul. Os respondentes operam em 11 cidades diferentes, em um panorama de 15 contribuintes, e a busca por participantes que atuam em municípios variados no Brasil denota o objetivo de não caracterizar a pesquisa com base em apenas uma localização específica, minimizando o viés regional/geográfico. Quanto ao porte das empresas em que os respondentes atuam, 53% são empresas de grande porte, 20% empresas de pequeno porte e apenas uma empresa é considerada de médio porte (representando 6,7% da pesquisa). Um(a) respondente está inserido(a) no cenário acadêmico, tendo suas pesquisas relacionadas à EC publicadas em *journals* de alto impacto.

Com relação às áreas específicas de atuação das empresas consideradas no contexto de energia solar fotovoltaica, as empresas foram divididas em macro grupos com base em suas atividades chave direcionadas à energia solar fotovoltaica, sendo eles: fabricação e montagem de equipamentos, parques fotovoltaicos, serviços, reciclagem de painéis. A distribuição percentual das empresas da pesquisa por área específica é demonstrada na Figura 14.

Figura 14 - Áreas específicas de atuação das empresas relacionadas à energia solar FV participantes da pesquisa



Fonte: A autora (2022)

#### 4.2.2 Aplicação das etapas do método DEMATEL

A aplicação do método DEMATEL foi realizada conforme os passos descritos na Figura 13 do capítulo 3.3.2, adaptados dos trabalhos de Bouzon (2015); Xia, Govindan e Zhu (2015); Zhu, Sarkis e Geng (2011).

##### **Passo 1:** Geração da matriz de relação direta

Com base nas categorias de fatores elencadas no Quadro 9, cada especialista indicou, de acordo com sua opinião pautada na experiência, o grau de influência entre a categoria de fatores da linha  $i$  e a categoria de fatores da coluna  $j$ , sendo esse grau indicado pelo elemento  $a_{ij}$  da matriz. Os respondentes foram instruídos a utilizar a escala de comparação clássica que varia de 0 a 4, em que a pontuação 0 significa que não há “nenhuma influência”, e a pontuação 4 significa “influência muito alta” (DALVI-ESFAHANI et al., 2019). A escala completa é mencionada no Quadro 7. O resultado desta etapa é uma matriz 5x5 para cada respondente, e tais matrizes encontram no Apêndice B.

##### **Passo 1a:** Geração da matriz de relação direta geral (A)

A média aritmética de cada componente das matrizes de relação direta de todos os respondentes gerou a matriz de relação direta geral. A Tabela 3 mostra a matriz de relação direta geral, que contém a média aritmética das respostas obtidas por cada *expert*.

Tabela 3 - Matriz de relação direta geral (A)

FATORES	FO	FT	FM	FG	FA
<b>Fatores Organizacionais</b>	0	3,27	2,93	2,33	2,40
<b>Fatores Técnicos</b>	3,07	0	2,47	2,00	2,47
<b>Fatores de Mercado</b>	3,47	2,73	0	2,40	2,20
<b>Fatores Governamentais</b>	2,93	2,20	3,00	0	2,73
<b>Fatores Ambientais</b>	2,93	2,67	3,00	3,07	0

Fonte: A autora (2022)

**Passo 2:** Normalização da matriz de relação direta geral, obtendo-se a matriz (X)

A normalização da matriz A é realizada pela divisão de cada item da matriz (A) pelo valor máximo entre as somas dos valores de cada uma das linhas.

Tabela 4 - Matriz de relação direta geral normalizada (X)

FATORES	FO	FT	FM	FG	FA
<b>Fatores Organizacionais</b>	0	0,28	0,25	0,20	0,21
<b>Fatores Técnicos</b>	0,26	0	0,21	0,17	0,21
<b>Fatores de Mercado</b>	0,30	0,23	0	0,21	0,19
<b>Fatores Governamentais</b>	0,25	0,19	0,26	0	0,23
<b>Fatores Ambientais</b>	0,25	0,23	0,26	0,26	0

Fonte: A autora (2022)

**Passo 3:** Obtenção da matriz de relações totais (T)

A matriz de relações totais (T) foi obtida a partir da multiplicação da matriz (X) pela matriz inversa da subtração da matriz (X) da matriz identidade (I). A partir da matriz (T) encontra-se a coluna D, que representa a soma das linhas, e a coluna R, que representa a soma das colunas para cada categoria de fatores.

Tabela 5 - Matriz de relações totais (T)

FATORES	FO	FT	FM	FG	FA	D	R
<b>Fatores Organizacionais</b>	2,77	2,73	2,78	2,44	2,45	<b>13,16</b>	<b>14,65</b>
<b>Fatores Técnicos</b>	2,79	2,34	2,58	2,27	2,30	<b>12,28</b>	<b>13,25</b>
<b>Fatores de Mercado</b>	2,98	2,68	2,56	2,42	2,42	<b>13,05</b>	<b>13,65</b>
<b>Fatores Governamentais</b>	2,97	2,67	2,79	2,28	2,47	<b>13,18</b>	<b>12,01</b>
<b>Fatores Ambientais</b>	3,13	2,84	2,94	2,61	2,41	<b>13,94</b>	<b>12,04</b>

Fonte: A autora (2022)

**Passo 4:** Criação do diagrama causal

A soma (D+R), denominada “Proeminência”, reflete a importância dos fatores. Já a subtração (D-R), denominada “Relação”, apresenta quais são os fatores de causa e quais são os fatores de efeito. Em geral, quando (D-R) possui valor negativo para determinado fator, esse

fator pode ser considerado um fator de efeito. Quando (D-R) é positivo, tem-se um fator de causa.

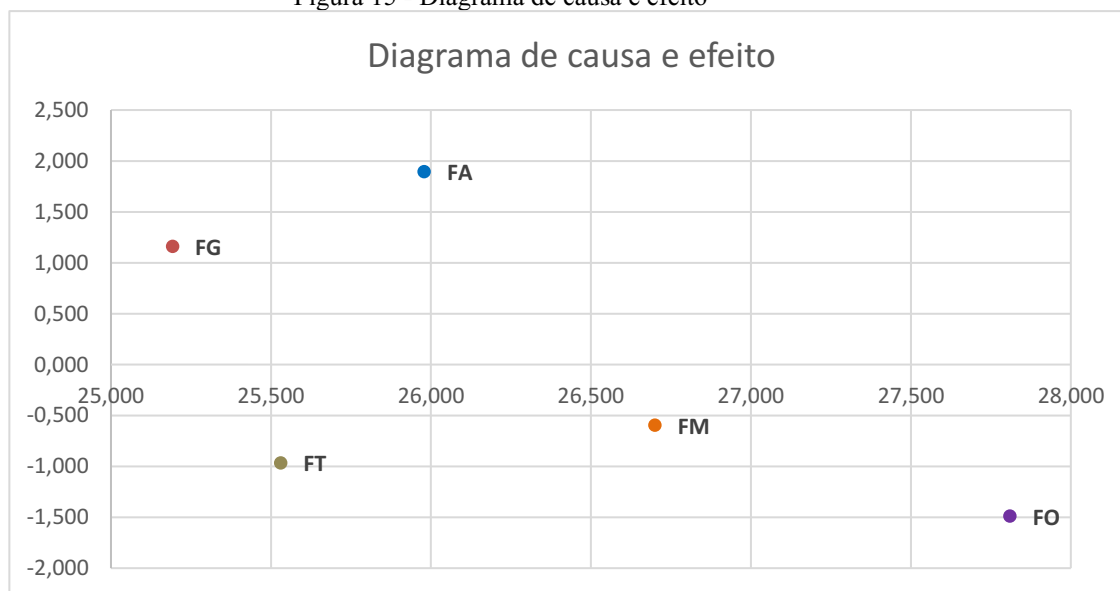
Tabela 6 - Proeminência e Relação entre os fatores

FATORES	D	R	D+R	D-R
Fatores Organizacionais	13,16	14,65	<b>27,810</b>	<b>-1,490</b>
Fatores Técnicos	12,28	13,25	<b>25,531</b>	<b>-0,968</b>
Fatores de Mercado	13,05	13,65	<b>26,701</b>	<b>-0,596</b>
Fatores Governamentais	13,18	12,01	<b>25,192</b>	<b>1,163</b>
Fatores Ambientais	13,94	12,04	<b>25,980</b>	<b>1,892</b>

Fonte: A autora (2022)

Os valores de proeminência e relação encontrados para cada fator foram plotados graficamente, gerando o Diagrama Causal. O eixo x se refere à proeminência e o eixo y é o eixo de relação.

Figura 15 - Diagrama de causa e efeito



Fonte: A autora (2022)

### Passo 5: Criação do dígrafo de relações

O dígrafo de relações é criado a partir de um limiar, também denominado *threshold*  $\theta$ , encontrado a partir dos valores da matriz de relações totais (T). Em geral, esse *threshold* é

representado pela soma da média aritmética e do desvio padrão dos valores de (T). A partir da determinação do limiar, os valores acima dele são destacados, e esses valores destacados são relacionados por um dígrafo que utiliza setas para demonstração das relações de causa e efeito encontradas, mantendo os eixos de proeminência e relação do Diagrama Causal. O dígrafo de relações também pode ser denominado diagrama de relações de proeminência-causal.

Tabela 7 - Threshold de (T)

<b>Medida</b>	<b>Valor</b>
Média	2,62
Desvio padrão	0,2441
<i>Threshold</i> $\theta$	2,87

Fonte: A autora (2022)

Tabela 8 - Relações de influência destacadas na matriz (T)

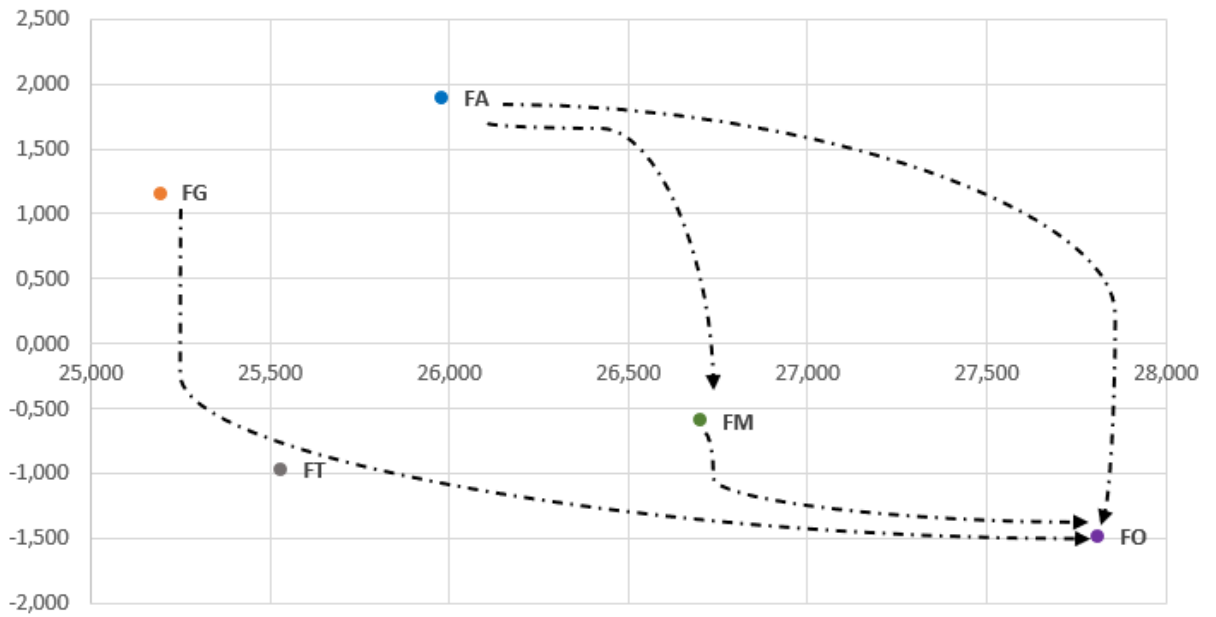
<b>FATORES</b>	<b>FO</b>	<b>FT</b>	<b>FM</b>	<b>FG</b>	<b>FA</b>
Fatores Organizacionais	2,77	2,73	2,78	2,44	2,45
Fatores Técnicos	2,79	2,34	2,58	2,27	2,30
Fatores de Mercado	<b>2,98</b>	2,68	2,56	2,42	2,42
Fatores Governamentais	<b>2,97</b>	2,67	2,79	2,28	2,47
Fatores Ambientais	<b>3,13</b>	2,84	<b>2,94</b>	2,61	2,41

Fonte: A autora (2022)

O dígrafo de relações apresenta quais fatores têm mais influência sobre os outros através de setas pontilhadas e cheias. As setas pontilhadas representam as influências unidirecionais, enquanto setas cheias representariam dupla influência, mas não foram encontradas no contexto geral da presente pesquisa.



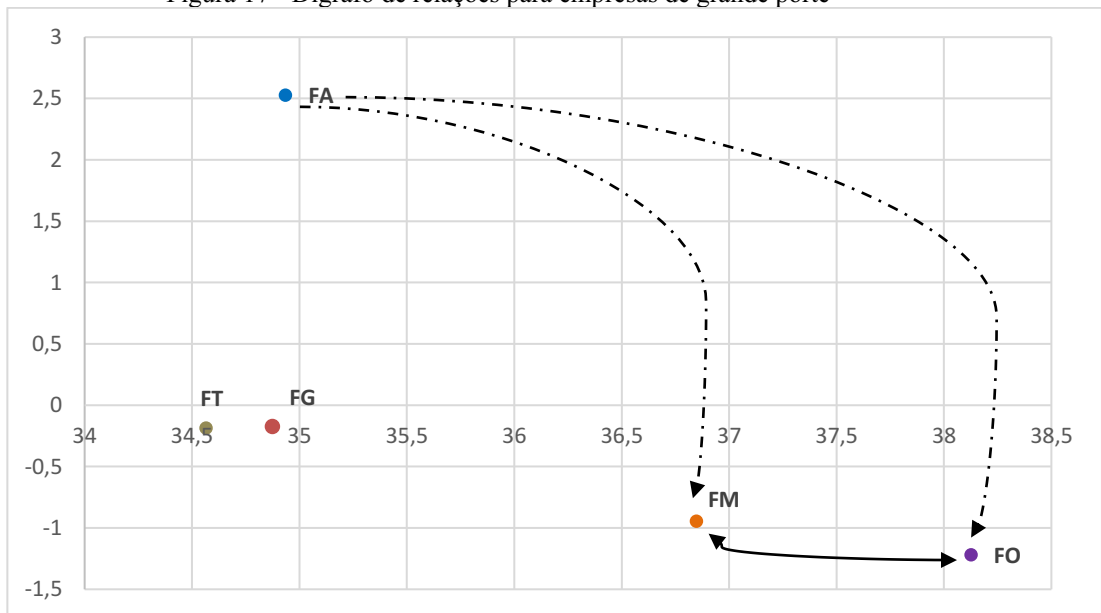
Figura 16 - Dígrafo de relações



Fonte: A autora (2022)

As etapas foram repetidas duas vezes, utilizando primeiramente as respostas dos contribuintes atuantes em empresas de grande porte, sendo eles os Respondentes 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12, e posteriormente todas as outras respostas, para fins de comparação.

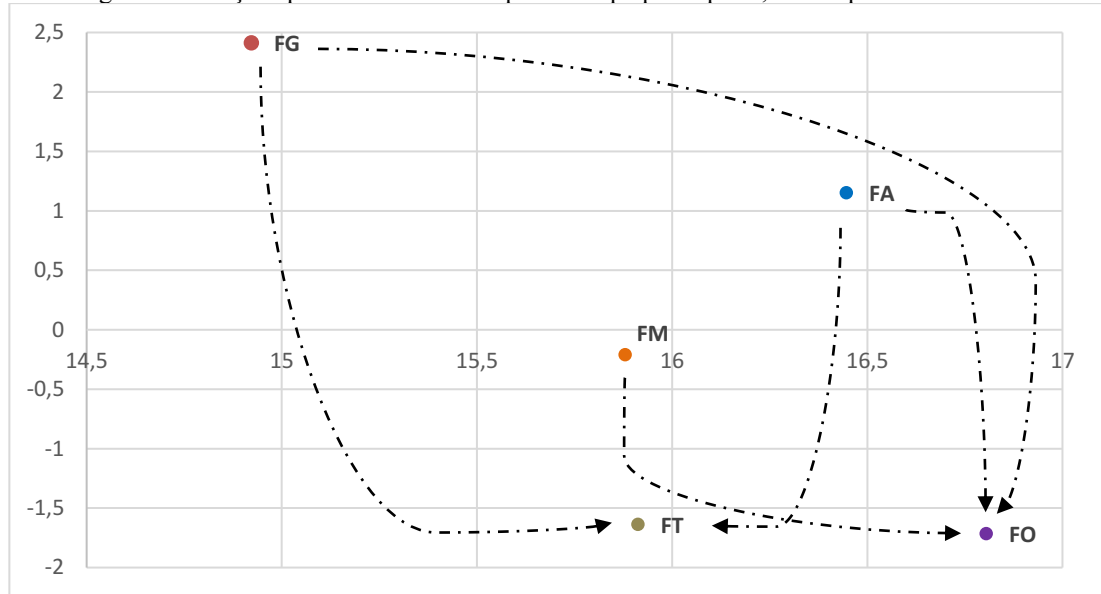
Figura 17 - Dígrafo de relações para empresas de grande porte



Fonte: A autora (2022)

O dígrafo gerado para as respostas dos respondentes atuantes em empresas de grande porte possui uma relação de dupla influência entre Fatores de Mercado e Fatores Organizacionais, relação representada pela seta cheia.

Figura 18 - Dígrafo de relações para atuantes em empresas de pequeno porte, médio porte e acadêmicos



Fonte: A autora (2022)

Já o dígrafo de relações gerado para as respostas provenientes de respondentes atuantes em empresas de pequeno e médio porte, ou cenário acadêmico, apresenta o Fator Técnico como um fator de efeito relacionado a Fatores Ambientais e Fatores Governamentais.

#### 4.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E COMPARAÇÃO COM OUTROS TRABALHOS

A análise em pares das categorias dos FCS elencados pela literatura através do método DEMATEL ordenou os grupos de FCS em termos de importância global da seguinte maneira: Fatores Organizacionais > Fatores de Mercado > Fatores Ambientais > Fatores Técnicos > Fatores Governamentais. O critério de importância se baseia na soma (D+R), que compõe o eixo x do Diagrama Causal apresentado na Figura 16. Desse modo, os Fatores Organizacionais foram considerados os mais importantes na visão dos especialistas consultados, seguidos dos Fatores de Mercado. Fatores de importância são fatores que se relacionam com grande parte dos outros fatores, são notórios por terem alta relação, mesmo que seja de efeito como é o caso dos Fatores Organizacionais nesse caso. Já os Fatores Governamentais foram considerados os menos importantes com base em (D+R).

Como fatores componentes da categoria Fatores Organizacionais, foram considerados: Comprometimento da alta direção, Alinhamento à EC na política geral da empresa e/ou em suas metas e objetivos, Capital para investimento, Colaboração e coordenação entre as equipes e Boa performance na gestão dos recursos. A posição do grupo de Fatores Organizacionais em termos de importância converge para o resultado de importância encontrado no trabalho de Erol et al. (2021) que trouxe o fator “interoperabilidade aprimorada” como fator de maior importância do sistema. Apesar de não ter sido trazido exatamente esse fator para essa pesquisa, seu significado está entre “colaboração e coordenação entre as equipes” e “boa performance na gestão dos recursos”, ou seja, pode ser relacionado ao grupo de Fatores Organizacionais. Outros Fatores Organizacionais estão no topo do ranking de FCS derivado da pesquisa de Erol et al. (2021), como “eficiência na gestão de recursos” e “agilidade operacional”. Para Bouzon et al. (2016), que elencou barreiras ao invés de fatores e no contexto da logística reversa, Fatores Organizacionais como “planejamento limitado” e “importância do tópico sustentável em relação a outros assuntos tratados pela empresa” também estiveram no topo da lista de importância. Na pesquisa realizada por Moktadir et al. (2020), o “comprometimento da liderança e alta gestão” também se mostrou como fator de impacto principal, o que demonstra mais uma evidência de convergência para com os resultados de outras pesquisas. O trabalho de Orji, U-Dominic e Okwara (2021) também traz os fatores organizacionais como os de maior importância. Nenhum dos trabalhos mencionados aborda diretamente o setor de Energia Solar Fotovoltaica, mas sim a implementação da Economia Circular num contexto geral, industrial ou de outros setores, o que demonstra a importância dos Fatores Organizacionais na implementação da EC independente do setor de estudo.

Fatores de Mercado se posicionaram entre os mais importantes no ranking de fatores estabelecido por Orji, U-Dominic e Okwara (2021), através dos fatores de “desenvolvimento de relacionamento com fornecedores” e “atitude positiva dos consumidores”. Os Fatores Ambientais obtiveram uma posição intermediária no ranking de importância entre FCS realizado por Moktadir et al. (2020), como na presente pesquisa. Inclusive, os fatores ambientais de “escassez de recursos utilizados como matéria-prima” e “contexto de prejuízos ambientais” considerados foram derivados diretamente do trabalho de Moktadir et al. (2020).

Uma divergência encontrada entre os trabalhos de base e a pesquisa realizada foi a baixa importância relativa dos Fatores Governamentais com relação aos outros fatores encontrada na presente pesquisa, visto que nos trabalhos de Bouzon et al. (2016) e Orji, U-

Dominic e Okwara (2021) fatores dessa categoria ocuparam posições relevantes em termos de importância, longe do final do ranking.

Porém, os Fatores Ambientais e Fatores Governamentais foram analisados como os fatores causais no contexto dessa pesquisa, ou seja, possuem relevância prioritária por influenciarem outros fatores. Os Fatores Governamentais também foram definidos como fatores causais na pesquisa de Bouzon et al. (2016) realizada no cenário brasileiro, dado o cenário legislativo brasileiro e carência por políticas de incentivo à Economia Circular.

Como fatores de efeito, os Fatores Organizacionais se encontram em primeira posição, influenciados diretamente pelos Fatores Ambientais, Fatores de Mercado e Fatores Governamentais, nessa ordem de influência. Esse fator é importante, portanto, por sofrer influência de quase todos os outros fatores. O Fator de Mercado é influenciado por Fatores Ambientais, e o Fator Técnico também é considerado um fator de efeito devido à classificação (D-R) negativa, mas não possui influência relativa tão importante quanto os outros, portanto é o fator menos relevante em termos de interrelação.

O Quadro 10 resume a ordem de importância apresentada, bem como a classificação encontrada em fatores causais e fatores de efeito.

Quadro 10 - Resumo da importância relativa dos fatores, fatores causais e fatores de efeito

<b>Análise</b>	<b>Ordem</b>
Importância	FO > FM > FA > FT > FG
Fatores causais	FA > FG
Fatores de efeito	FO > FT > FM

**Fonte: A autora (2022)**

#### 4.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS POR PORTE DAS EMPRESAS

O método foi aplicado também em dois grupos separados, sendo o primeiro composto pelas respostas dos contribuintes atuantes em empresas de grande porte, e o segundo composto por todas as outras respostas. O Quadro 11 apresenta os resultados obtidos para cada um dos grupos, e as diferenças encontram-se destacadas.

Quadro 11 - Resumo da importância relativa dos fatores, fatores causas e fatores de efeito para os dois grupos de aplicação

<b>Resultado</b>	<b>Grupo 1</b>	<b>Grupo 2</b>
Importância	FO > <b>FA</b> > FT > <b>FM</b> > FG	FO > <b>FM</b> > FA > FG > FT
Fatores causais	FA	<b>FG</b> > FA
Fatores de efeito	FO > <b>FM</b> > FT > <b>FG</b>	FO > FT > <b>FM</b>

Fonte: A autora (2022)

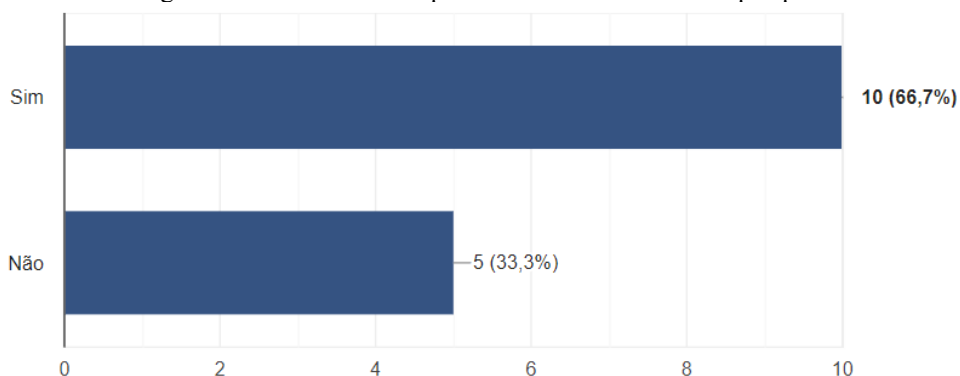
Como diferenças principais, elenca-se o maior destaque dos Fatores Técnicos em termos de importância para o contexto das empresas de grande porte, sobrepassando a importância dos Fatores de Mercado nesse contexto. Para ambos os contextos, esses Fatores Técnicos são fatores de efeito, influenciados pelas outras categorias de fatores. O Fator de Mercado é o segundo mais importante para o contexto de pequenas empresas, o que se justifica pela maior volatilidade dessas empresas com base no mercado, visto que ainda não conquistaram seu espaço como as grandes empresas (GHAZILLA et al., 2015). Os Fatores Organizacionais, no Grupo 1, possuem relação bidirecional de causa e efeito para com os Fatores de Mercado. Essa relação bidirecional pode estar alinhada ao fato de que as empresas grandes exercem também influência no mercado por possuírem maior fatia que os concorrentes.

#### 4.5 IMPLICAÇÕES PRÁTICAS E GERENCIAIS

Conforme já apresentado, o conceito de energia solar se traduz em uma energia limpa e de fonte renovável, mas para alinhamento às práticas sustentáveis o ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos carece de estudo na direção de uma Economia mais Circular - dados os rejeitos advindos da predominância linear atual na produção desses painéis. Considerando a crescente escassez de recursos de entrada para os painéis e a difusão das práticas sustentáveis no mercado como fator competitivo, o presente trabalho aborda temas de grande importância para o ambiente gerencial das empresas do setor de energia solar fotovoltaica.

Essa importância foi observada inclusive durante a coleta de respostas dos especialistas para a presente pesquisa, visto que a última pergunta do questionário indagava o interesse dos mesmos pelos resultados do trabalho. As respostas foram predominantemente positivas, demonstrando a relevância do tema para os atuantes da área.

Figura 19 - Interesse dos especialistas nos resultados da pesquisa



Fonte: A autora (2022)

A importância relacionada aos fatores críticos de sucesso se dá pela possibilidade de utilização dos FCS principais na tomada de decisão em projetos com o fim de Implementação da EC no setor de energia solar FV, ou na abordagem de práticas sustentáveis num geral relacionadas ao setor. A ciência dos FCS que mais impactam e influenciam as ações da empresa em termos de estratégia sustentável permite que a alta direção alinhe seus esforços num sentido mais assertivo, com maior foco na busca pelo maior retorno às suas ações.

Os Fatores Organizacionais foram levantados na análise como os fatores de maior importância para a implementação de práticas sustentáveis, tanto para o cenário geral como para o contexto de empresas de grande porte e de pequeno porte. Foram também analisados como fatores influenciados pelos Fatores de Mercado, onde se encaixa a competitividade atual das estratégias sustentáveis que pressiona a busca pela circularização das cadeias produtivas.

## 5 CONCLUSÃO

A localização favorável para a geração de energia solar no Brasil, bem como a expansão dessa fonte de energia renovável prevista para os próximos anos no país trazem o setor para uma posição de destaque. Essa fonte de energia limpa enfrenta problemas em termos de desenvolvimento sustentável devido aos rejeitos gerados pelos painéis em fim de vida, resultantes da cadeia produtiva linear tradicional. Nesse contexto, o trabalho teve como objetivo principal a identificação e análise dos fatores críticos de sucesso para a implementação da economia circular no setor de energia solar fotovoltaica no Brasil.

Como contribuições fornecidas pela presente pesquisa, destaca-se o quadro de Fatores Críticos de Sucesso para a implementação da EC no setor de estudo, fatores esses selecionados de outras obras e categorizados também conforme a literatura. Foram 15 fatores divididos em 5 categorias.

Outra contribuição importante foi a coleta da opinião de 15 especialistas sobre a interrelação entre os fatores selecionados. Os especialistas atuam em diferentes regiões do Brasil, em empresas de diferentes portes com diferentes enfoques relacionados à energia solar, desde usinas fotovoltaicas, empresas de reciclagem de painéis ou prestadoras de serviços em manutenção de painéis. Os fatores foram avaliados em pares fornecendo as matrizes que tornaram possível a aplicação do método multicritério proposto.

Por fim, a análise das respostas dos *experts* foi realizada por meio do método DEMATEL, em três cenários: o primeiro e principal, considerando o panorama geral de respondentes, e posteriormente separando-os em dois grupos com base no porte das empresas de atuação. A partir do método, foram observados os graus de importância relativa de cada um dos fatores, bem como a influência de causa ou de efeito entre os pares.

Através dos resultados do método, conclui-se que os Fatores Organizacionais são considerados os mais importantes para a implementação das práticas de EC no contexto do setor de energia solar, sendo esse um fator de efeito influenciado diretamente por quase todos os outros, à exceção dos Fatores Técnicos. Os Fatores Ambientais e Governamentais devem ser prioritariamente analisados na tomada de decisão, por serem fatores de causa que exercem grande influência sobre os outros fatores. Fatores de Mercado possuem maior importância para as empresas de menor porte, e exercem influência direta sobre os Fatores Organizacionais nesse contexto. Já para as empresas de grande porte, a relação de influência entre esses dois fatores é bidirecional, dada a posição das grandes empresas no mercado.

As próximas seções evidenciam o atingimento de cada um dos objetivos de pesquisa, além de abordarem as limitações encontradas e sugestões para pesquisas futuras.

## 5.1 ATINGIMENTO DOS OBJETIVOS DA PESQUISA

Todos os objetivos definidos para essa pesquisa, tanto geral como específicos, foram atingidos. O Quadro 12 resume como e em qual capítulo do trabalho cada um desses objetivos foram alcançados.

Quadro 12 - Atingimento dos objetivos de Pesquisa

<b>Objetivos</b>	<b>Atingimento</b>
<b>Objetivo 1 (Geral):</b> Analisar os fatores críticos de sucesso para a implementação da economia circular no setor de energia solar fotovoltaica no Brasil.	O objetivo da pesquisa foi atingido, principalmente nos capítulos 4 e 5 em que os FCS são analisados com base na opinião dos especialistas
<b>Objetivo 2 (Específico):</b> Identificar os Fatores Críticos de Sucesso para implementação da Economia Circular no setor de energia solar fotovoltaica	Este objetivo foi atingido, inicialmente pelo levantamento de FCS no contexto de EC e energia solar FV com base na literatura no capítulo 2, e em seguida pela seleção desses FCS e categorização em grupos de fatores, abordadas no capítulo 4
<b>Objetivo 3 (Específico):</b> Identificar o nível de importância de cada um dos Fatores Críticos de Sucesso, com base na opinião de especialistas;	O objetivo foi atingido através da aplicação do método DEMATEL a partir das respostas de especialistas. O método foi apresentado no capítulo 3, e sua aplicação foi realizada no capítulo 4. Os resultados foram discutidos e sintetizados nos capítulos 4 e 5.
<b>Objetivo 4 (Específico):</b> Identificar a interrelação entre esses Fatores Críticos de Sucesso	O atingimento desse objetivo também foi obtido através da aplicação do método DEMATEL, apresentado no capítulo 3 e aplicado no capítulo 4. A interrelação entre os fatores foi discutida no capítulo 4 e supracitada no capítulo 5, de conclusão.

Fonte: A autora (2022)

## 5.2 LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

A pesquisa realizada apresenta limitações, assim como o método multicritério DEMATEL utilizado para a análise dos fatores em pares. Essas limitações podem ser consideradas oportunidades para as pesquisas futuras, além de outras sugestões observadas pela autora.

A primeira limitação a destacar é a escassez de FCS já elencados em termos de Economia Circular para a conjuntura industrial brasileira, com enfoque em Energia Solar FV ou não. Dada essa limitação, a maior parte das fontes de pesquisa utilizadas foram trabalhos



realizados em outros países emergentes, que apesar de terem sido selecionados para o contexto podem ter trazido um enfoque não completamente alinhado à situação do país. Uma sugestão para os próximos trabalhos, advinda dessa limitação, seria a utilização de uma metodologia que contasse com a participação dos especialistas em duas etapas, a primeira contribuindo para elencar os fatores críticos, sendo o painel de fatores definido não apenas com base na literatura, mas também na opinião de especialistas atuantes no setor e no cenário brasileiro, e após essa definição seria realizada a etapa de análise da importância e interrelação entre os fatores. Na presente pesquisa, o questionário repassado aos contribuintes possuía uma pergunta sobre outros possíveis FCS que deveriam ser considerados, e houve contribuições referentes a fatores não mencionados como o fator “Relações internacionais” destacado por um dos respondentes como importante. Porém, as contribuições individuais não foram analisadas pelos outros respondentes.

Ainda, é importante destacar o local de atuação dos respondentes como uma limitação em termos de viés da pesquisa. Por mais que esse fator tenha sido considerado e tenha sido realizada a busca por respondentes de diferentes cidades, não foram obtidas respostas de especialistas de todas as regiões do país. As regiões Nordeste e Sul predominaram em termos de localização dos respondentes, e houve a contribuição de apenas um respondente da região Sudeste, sem respondentes representando as regiões Centro-oeste e Norte. Desse modo, sugere-se para próximas pesquisas a busca por pelo menos um representante de cada região, visando também a possibilidade de comparação entre os fatores analisados como mais importantes por localidade. O contato com universidades dessas regiões pode proporcionar a rede de ligação a esses respondentes, e um período de pelo menos três semanas para a aplicação do formulário permitiria uma busca mais ampla por contribuintes.

Foi definida como delimitação da pesquisa o enfoque em painéis fotovoltaicos de silício, o tipo mais comum encontrado. Esta delimitação gera uma limitação, então sugere-se a exploração de práticas circulares relacionadas a outros materiais utilizados para a confecção dos painéis, e o direcionamento de uma pesquisa em termos de fabricação dos painéis e seus componentes.

Como limitação do método, elenca-se a subjetividade das respostas dos especialistas. As respostas possuem um nível considerável de incerteza pelo possível motivo de falta de informações específicas. Para próximas pesquisas, a sugestão seria a utilização de hipóteses como números cinzentos (*grey numbers*) e lógica difusa (*fuzzy*) que lidam com o fator incerteza dos respondentes.

Sugestões não agregadas às limitações dessa pesquisa também podem ser consideradas. Uma delas seria a realização da pesquisa com o intuito de comparação com outros países em diferentes estágios de desenvolvimento (também emergentes ou desenvolvidos), visando observar as semelhanças e particularidades entre os diferentes contextos. A escolha por outros métodos multicritério e até mesmo a comparação dos resultados na aplicação de mais de um método é também uma sugestão para próximas pesquisas.

Conforme já mencionado, é escasso o número de pesquisas que abordam os tópicos Fatores Críticos de Sucesso, Economia Circular, Desenvolvimento Sustentável, Indústria Brasileira, e, principalmente, enfoque em Energia Solar. O objeto de estudo se torna relevante num contexto de necessidade brasileira por geração de energia advindas de fontes renováveis como a fotovoltaica, escassez de recursos ambientais, e a contribuição da pesquisa para o cenário empresarial do setor em termos de sustentabilidade. Desse modo, incentiva-se a realização de outras pesquisas em termos relacionados.

## REFERÊNCIAS

ABEPRO. **Áreas da Engenharia de Produção.** Disponível em: <http://www.abepro.org.br/interna.asp?c=362>. Acesso em: 1 mar. 2022.

AHI, P.; SEARCY, C. **An analysis of metrics used to measure performance in green and sustainable supply chains** *Journal of Cleaner Production*, 1 jan. 2015.

AMARAL, A. B. A. et al. Solar Energy and Distributed Generation : 2015 , a Year of Inflection in Brazil ? **IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS**, v. 14, n. 8, p. 3731–3737, 2016.

ANEEL. **Matriz elétrica brasileira.** Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>. Acesso em: 22 fev. 2022.

ANSARI, Z. N.; KANT, R. A state-of-art literature review reflecting 15 years of focus on sustainable supply chain management. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 2524–2543, 20 jan. 2017.

APAYDIN, O.; ALADAĞ, Z. Ranking the evaluation criteria of Hi-Fi audio systems and constricted information space: A novel method for determining the DEMATEL threshold value. **Applied Acoustics**, v. 190, 2022.

ARMAROLI, N.; BALZANI, V. Solar Electricity and Solar Fuels: Status and Perspectives in the Context of the Energy Transition. **Chemistry - A European Journal**, v. 22, n. 1, p. 32–57, 2016.

ARNAIZ, F. D. et al. Identifying Critical Success Factors in continuous improvement Projects in a steel company. **Procedia Computer Science**, v. 196, n. 2021, p. 832–839, 2021.

ASADI, S. et al. Drivers and barriers of electric vehicle usage in Malaysia: A DEMATEL approach. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 177, n. October 2021, p. 105965, 2022.

ATABAKI, M. S.; MOHAMMADI, M.; NADERI, B. New robust optimization models for closed-loop supply chain of durable products: Towards a circular economy. **Computers and Industrial Engineering**, v. 146, n. June, p. 106520, 2020.

BAI, C. et al. Sustainable supply chain flexibility and its relationship to circular economy-target performance. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 19, p. 5893–5910, 1 out. 2020.

BAKER, P. et al. Ultra-processed foods and the nutrition transition: Global, regional and national trends, food systems transformations and political economy drivers. **Obesity Reviews**, v. 21, n. 12, p. 1–22, 2020.

BALLOU, R. H. **Logística Empresarial: Transportes, Administração De Materiais, Distribuição Física.** 1. ed. São Paulo: Atlas, 1992.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos/ logística empresarial**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

BENDUL, J. C.; ROSCA, E.; PIVOVAROVA, D. Sustainable supply chain models for base of the pyramid. **Journal of Cleaner Production**, v. 162, p. S107–S120, 20 set. 2017.

BESARATI, S. M. et al. The potential of harnessing solar radiation in Iran: Generating solar maps and viability study of PV power plants. **Renewable Energy**, v. 53, p. 193–199, 2013.

BOUZON, M. **EVALUATING DRIVERS AND BARRIERS FOR REVERSE LOGISTICS IMPLEMENTATION UNDER A MULTIPLE STAKEHOLDERS ' PERSPECTIVE ANALYSIS USING GREY - DEMATEL APPROACH**. [s.l.] UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

BOUZON, M. et al. Identification and analysis of reverse logistics barriers using fuzzy Delphi method and AHP. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 108, p. 182–197, 2016.

BOUZON, M.; GOVINDAN, K.; RODRIGUEZ, C. M. T. Evaluating barriers for reverse logistics implementation under a multiple stakeholders' perspective analysis using grey decision making approach Marina. "**Resources, Conservation & Recycling**", 2016.

BOWERSOX, D. J. et al. **Gestão Logística da Cadeia de Suprimentos**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013.

BUI, T. D. et al. **Sustainable supply chain management towards disruption and organizational ambidexterity: A data driven analysis** **Sustainable Production and Consumption** Elsevier B.V., , 1 abr. 2021.

CAMPOS, E. A. R. DE et al. A grey-DEMATEL approach for analyzing factors critical to the implementation of reverse logistics in the pharmaceutical care process. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 14156–14176, 2021.

CAPELLEVEEN, G. VAN et al. Exploring recommendations for circular supply chain management through interactive visualisation. **Decision Support Systems**, v. 140, p. 113431, 2021.

CASTRO, D. M. et al. A review on multi-criteria decision- making for energy efficiency in automotive engineering. v. 17, n. 1, p. 53–78, 2021.

CHAN, F. T. S.; CHAN, H. K. A survey on reverse logistics system of mobile phone industry in Hong Kong. n. Department of Industrial & Manufacturing Systems Engineering, University of Hong Kong, Hong Kong, and Norwich Business School, University of East Anglia, Norwich, UK, p. 7, 2008.

CHEN, Z. et al. Explore and evaluate innovative value propositions for smart product service system: A novel graphics-based rough-fuzzy DEMATEL method. **Journal of Cleaner Production**, v. 243, p. 118672, 2020.

CHIOU, T. et al. The influence of greening the suppliers and green innovation on environmental

performance and competitive advantage in Taiwan. **Transportation Research Part E**, v. 47, n. 6, p. 822–836, 2011.

CHOWDHURY, M. S. et al. **An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling***Energy Strategy Reviews* , 2020.

ÇOLAK, M.; KAYA, İ. Prioritization of renewable energy alternatives by using an integrated fuzzy MCDM model: A real case application for Turkey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, n. May, p. 840–853, 2017.

CONTRERAS-LISPERGUER, R. et al. A set of principles for applying Circular Economy to the PV industry: Modeling a closed-loop material cycle system for crystalline photovoltaic panels. **Sustainable Production and Consumption**, v. 28, p. 164–179, 2021.

COUNCIL OF SUPPLY CHAIN MANAGEMENT PROFESSIONALS. **SUPPLY CHAIN MANAGEMENT TERMS and GLOSSARY**Kate Vitasek, , 2013. (Nota técnica).

DALVI-ESFAHANI, M. et al. Telematics and Informatics Social media addiction : Applying the DEMATEL approach. **Telematics and Informatics**, v. 43, n. July, p. 101250, 2019.

DE SOUZA, E. D. et al. Performance evaluation of green logistics: Paving the way towards circular economy. **Cleaner Logistics and Supply Chain**, v. 3, n. September 2021, p. 100019, 2022.

Developing relationship management strategies in a network context. **Journal of Administrative and Business Studies**, v. 5, n. 3, 28 jun. 2019.

DEWI, K. C. et al. Critical Success Factor for Implementing Vocational Blended Learning. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 953, n. 1, 2018.

DIAS, P. et al. Waste electric and electronic equipment (WEEE) management: A study on the Brazilian recycling routes. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 7–16, 2018.

DOMÍNGUEZ, A.; GEYER, R. Photovoltaic waste assessment in Mexico. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, n. February, p. 29–41, 2017.

DU, Y.; LI, X. Critical factor identification of marine ranching ecological security with hierarchical DEMATEL. **Marine Policy**, v. 138, n. December 2021, p. 104982, 2022.

ECHEGARAY, F. Understanding stakeholders views and support for solar energy in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 63, n. December 2011, p. 125–133, 2014.

EL, A.; MILLET, D. Designing a sustainable reverse logistics channel: the 18 generic structures framework. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 6–7, p. 588–597, 2011.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Rumo à economia circular: o racional de negócio para acelerar a transição. 2015.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Uma economia circular no Brasil: uma**

**abordagem exploratória inicial.**

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional - BEN 2021EPE - Empresa de Pesquisa Energética.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>.

EROL, I. et al. Towards a circular economy: Investigating the critical success factors for a blockchain-based solar photovoltaic energy ecosystem in Turkey. **Energy for Sustainable Development**, v. 65, p. 130–143, 2021.

FAROOQUE, M. et al. Circular supply chain management: A definition and structured literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 228, p. 882–900, 2019.

FARRELL, C. C. et al. **Technical challenges and opportunities in realising a circular economy for waste photovoltaic modules** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, , 1 ago. 2020.

FERREIRA, A. et al. **Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in brazil** *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Elsevier Ltd, , 2018.

FLEURY, P. F.; WANKE, P.; FIGUEIREDO, K. F. **Logística Empresarial: A Perspectiva Brasileira.** 1. ed. São Paulo: ATLAS, 2000.

FONSECA, L. M. et al. Assessment of circular economy within Portuguese organizations. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 7, 19 jul. 2018.

FRANCO, M. A. Circular economy at the micro level: A dynamic view of incumbents' struggles and challenges in the textile industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 168, p. 833–845, 2017.

FREI, R.; JACK, L.; KRZYZANIAK, S.-A. Sustainable reverse supply chains and circular economy in multichannel retail returns. **Business Strategy and the Environment**, v. 29, p. 1925–1940, 2020.

GARLET, T. B. et al. Paths and barriers to the diffusion of distributed generation of photovoltaic energy in southern Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 111, p. 157–169, 1 set. 2019.

GARLET, T. B. et al. **Value chain in distributed generation of photovoltaic energy and factors for competitiveness: A systematic review** *Solar Energy* Elsevier Ltd, , 15 nov. 2020.

GATES, L. P. **Strategic Planning with Critical Success Factors and Future Scenarios: An Integrated Strategic Planning Framework.** PITTSBURGH: [s.n.].

GEISSDOERFER, M. et al. **The Circular Economy – A new sustainability paradigm?** *Journal of Cleaner Production*, 1 fev. 2017.

GEISSDOERFER, M. et al. Business models and supply chains for the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 190, p. 712–721, 20 jul. 2018.

GHAZILLA, R. A. R. et al. Drivers and barriers analysis for green manufacturing practices in Malaysian SMEs: A Preliminary Findings. **12th Global Conference on Sustainable Manufacturing**, v. 26, p. 658–663, 2015.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

GLOBAL SOLAR ATLAS. **Potencial de energia fotovoltaica global por país**. Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/map?c=24.099958,-144.609373,3>.

GOVIL, M.; PROTH, J.-M. **Supply Chain Design and Management: Strategic and Tactical Perspectives**. San Diego: Academic press, 2002.

HESKETT, J. L.; GLASKOWSKY, N. A.; IVIE, R. M. **Business logistics; physical distribution and materials management**. 2. ed. New York: New York, Ronald Press Co, 1973.

ISE. **Photovoltaics Report**. [s.l: s.n.].

IVANOV, D. **Structural dynamics and resilience in supply chain risk management, International Series in Operations Research & Management Science**. 1. ed. New York: Springer International Publishing, 2008.

JABBARZADEH, A.; HAUGHTON, M.; KHOSROJERDI, A. Computers & Industrial Engineering Closed-loop supply chain network design under disruption risks: A robust approach with real world application. **Computers & Industrial Engineering**, v. 116, n. August 2017, p. 178–191, 2018.

JABBOUR, A. B. L. DE S. et al. Green supply chain practices and environmental performance in Brazil: Survey, case studies, and implications for B2B. **Industrial Marketing Management**, v. 66, n. March 2015, p. 13–28, 2017.

JABBOUR, C. J. C.; JABBOUR, B. L. DE S. Latin America: research opportunities on management for sustainable development. **Latin American J. Management for Sustainable Development**, v. 1, n. 1, 2014.

JÄGER-WALDAU, A. Snapshot of Photovoltaics—February 2020. n. February, 2020.

JOSHI, S. A review on sustainable supply chain network design: Dimensions, paradigms, concepts, framework and future directions. **Sustainable Operations and Computers**, v. 3, n. July 2021, p. 136–148, 2022.

JULIET, I.; U-DOMINIC, C. M.; KALU, U. Exploring the determinants in circular supply chain implementation in the Nigerian manufacturing industry. v. 29, p. 761–776, 2022.

KABIR, E. et al. Solar energy: Potential and future prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. September 2016, p. 894–900, 2018.

KAZANCOGLU, Y.; KAZANCOGLU, I.; SAGNAK, M. A new holistic conceptual

framework for green supply chain management performance assessment based on circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 195, p. 1282–1299, 10 set. 2018.

KILIÇ, M.; KAYA, I. Investment project evaluation by a decision making methodology based on type-2 fuzzy sets. **Applied Soft Computing**, v. 27, p. 399–410, 2015.

KIRCHHERR, J. et al. Breaking the Barriers to the Circular Economy. **Deloitte**, n. October, p. 1–13, 2017.

KUMAR, S. et al. To identify industry 4.0 and circular economy adoption barriers in the agriculture supply chain by using ISM-ANP. **Journal of Cleaner Production**, v. 293, p. 126023, 2021.

LAHANE, S.; KANT, R. Evaluation and ranking of solutions to mitigate circular supply chain risks. **Sustainable Production and Consumption**, v. 27, p. 753–773, 2021.

LAHANE, S.; KANT, R.; SHANKAR, R. Circular supply chain management: A state-of-art review and future opportunities. **Journal of Cleaner Production**, v. 258, p. 120859, 2020.

LAMBERT, D. M.; COOPER, M. C. Issues in Supply Chain Management. **Industrial Marketing Management**, v. 83, p. 65–83, 2000.

LATUNUSSA, C. E. L. et al. Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 156, p. 101–111, 2016.

LEITE, P. R. **Logística reversa: sustentabilidade e competitividade**. São Paulo: Editora Saraiva, 2017.

LIEBETRUTH, T. **Sustainability in Performance Measurement and Management Systems for Supply Chains**. Procedia Engineering. **Anais...**, 2017

LIU, C.; ZHANG, Q.; WANG, H. Cost-benefit analysis of waste photovoltaic module recycling in China. **Waste Management**, v. 118, p. 491–500, 2020.

LUZ, B. **Economia circular Holanda-Brasil: Da teoria à prática**. 4. ed. Rio de Janeiro: Exchange, 2017.

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

MANGLA, S. K.; GOVINDAN, K.; LUTHRA, S. Prioritizing the barriers to achieve sustainable consumption and production trends in supply chains using fuzzy Analytical Hierarchy Process. **Journal of Cleaner Production**, v. 151, p. 509–525, 10 maio 2017.

MANOHARAN, S. et al. Contextual relationships among drivers and barriers to circular economy: An integrated ISM and DEMATEL approach. **Sustainable Operations and Computers**, v. 3, n. July 2021, p. 43–53, 2022.

MARCONI, M. DE A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 8. ed.



São Paulo: Atlas, 2017.

MARHAVILAS, P. K. et al. Safety-assessment by hybridizing the MCDM/AHP & HAZOP-DMRA techniques through safety's level colored maps: Implementation in a petrochemical industry. **Alexandria Engineering Journal**, v. 61, n. 9, p. 6959–6977, 2022.

MARTINS, F. R. et al. Solar energy scenarios in Brazil. Part two : Photovoltaics applications. **Energy Policy**, v. 36, p. 2865–2877, 2008.

MASTROCINQUE, E. et al. An AHP-based multi-criteria model for sustainable supply chain development in the renewable energy sector. **Expert Systems with Applications**, v. 150, p. 113321, 2020.

MATHUR, N.; SINGH, S.; SUTHERLAND, J. W. Promoting a circular economy in the solar photovoltaic industry using life cycle symbiosis. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 155, 1 abr. 2020.

MCMURRAY, A. J. et al. Sustainable procurement in Malaysian organizations: Practices, barriers and opportunities. **Journal of Purchasing and Supply Management**, v. 20, n. 3, p. 195–207, 1 set. 2014.

MERCIER, J. et al. Understanding continuity in sustainable transport planning in Curitiba. **Urban Studies**, v. 52, n. 8, p. 1454–1470, 10 jun. 2015.

MOHAMED, E. E.-K.; EL-MOHSNAWY, E.; FUKUZUMI, S. **Solar energy conversion: From natural to artificial photosynthesis** *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews* Elsevier B.V., , 1 jun. 2017.

MOKTADIR, A. et al. Critical success factors for a circular economy : Implications for business strategy and the environment. v. 0, n. July, p. 1–25, 2020.

MORAES, R. et al. Analysis of the sustainability reports from multinationals tobacco companies in southern Brazil. v. 232, 2019.

MOREAU, V.; DOS REIS, P. C.; VUILLE, F. Enough metals? Resource constraints to supply a fully renewable energy system. **Resources**, v. 8, n. 1, 2019.

MUKISA, N. et al. Multi criteria analysis ranking of solar photovoltaic modules manufacturing countries by an importing country: A case of Uganda. **Solar Energy**, v. 223, n. June, p. 326–345, 2021.

NOBRE, G. C.; TAVARES, E. The quest for a circular economy final definition : A scientific perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 314, n. December 2020, p. 127973, 2021.

NOSRATABADI, S. et al. Sustainable business models: A review. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 6, p. 1–30, 2019.

OPON, J.; HENRY, M. Implementation of a multicriteria analytical framework for the sustainability evaluation and comparison of concrete materials considering methodological

uncertainties. **Journal of Cleaner Production**, v. 344, n. January 2021, p. 131057, 2022.

ORJI, I. J.; U-DOMINIC, C. M.; OKWARA, U. K. Exploring the determinants in circular supply chain implementation in the Nigerian manufacturing industry. **Sustainable Production and Consumption**, v. 29, p. 761–776, 2021.

PANG, S. et al. Enhanced separation of different layers in photovoltaic panel by microwave field. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 230, 15 set. 2021.

PATTERSON, M.; MCDONALD, G.; HARDY, D. Is there more in common than we think? Convergence of ecological footprinting, energy analysis, life cycle assessment and other methods of environmental accounting. **Ecological Modelling**, v. 362, p. 19–36, 24 out. 2017.

RAJEEV, A. et al. **Evolution of sustainability in supply chain management: A literature review** *Journal of Cleaner Production* Elsevier Ltd, , 20 set. 2017.

REBS, T.; BRANDENBURG, M.; SEURING, S. **System dynamics modeling for sustainable supply chain management: A literature review and systems thinking approach** *Journal of Cleaner Production* Elsevier Ltd, , 20 jan. 2019.

REDISKE, G. et al. Multi-criteria decision-making model for assessment of large photovoltaic farms in Brazil. **Energy**, v. 197, p. 117167, 2020.

ROSSA, C. H.; DIAS, J. B.; MACAGNAN, M. H. Simulation of Energy Production in Grid-Connected Photovoltaic Systems From Measured and Calculated Data From Clear-Sky Radiation Model. **Sol. Energy Eng.**, v. 137(3), 2015.

ROY, V.; SCHOENHERR, T.; CHARAN, P. **The thematic landscape of literature in sustainable supply chain management (SSCM): A review of the principal facets in SSCM development** *International Journal of Operations and Production Management* Emerald Group Holdings Ltd., , 21 mar. 2018.

SALA, S.; CIUFFO, B.; NIJKAMP, P. A systemic framework for sustainability assessment. **Ecological Economics**, v. 119, p. 314–325, 1 nov. 2015.

SARASWAT, S. K. et al. MCDM and GIS based modelling technique for assessment of solar and wind farm locations in India. **Renewable Energy**, v. 169, p. 865–884, 2021.

SCHALLMO, D. R. A. **Kompodium Geschäftsmodell-Innovation: Grundlagen, Aktuelle Ansätze Und Fallbeispiele Zur Erfolgreichen Geschäftsmodell-Innovation**. 1. ed. Wiesbaden: Springer Gabler, 2014.

SCHROEDER, P.; ANGGRAENI, K.; WEBER, U. The Relevance of Circular Economy Practices to the Sustainable Development Goals. **Journal of Industrial Ecology**, v. 23, n. 1, p. 77–95, 1 fev. 2019.

SHAHSAVARI, A.; AKBARI, M. **Potential of solar energy in developing countries for reducing energy-related emissions** *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 1 jul. 2018.

SHAIK, M. N.; ABDUL-KADER, W. Comprehensive performance measurement and causal-effect decision making model for reverse logistics enterprise. **Computers & Industrial Engineering**, v. 68, p. 87–89, 2013.

SI, S. L. et al. DEMATEL Technique: A Systematic Review of the State-of-the-Art Literature on Methodologies and Applications. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2018, n. 1, p. 33, 2018.

SILVA, E. L. DA; MENEZES, E. M. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 4. ed. Florianópolis: UFSC, 2005.

SILVA, W. D. O.; MORAIS, D. C. Transitioning to a circular economy in developing countries: A collaborative approach for sharing responsibilities in solid waste management of a Brazilian craft brewery. **Journal of Cleaner Production**, v. 319, n. May, p. 128703, 2021.

SILVEIRA, J. L.; TUNA, C. E.; LAMAS, W. D. Q. **The need of subsidy for the implementation of photovoltaic solar energy as supporting of decentralized electrical power generation in Brazil** *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Elsevier Ltd, , 2013.

SIMCHI-LEVI, D.; KAMINSKY, P.; SIMCHI-LEVI, E. **Designing and Managing the Supply Chain : Concepts, Strategies and Case Studies**. 1. ed. New York: Irwin McGraw-Hill, 2000.

SINGHAL, D.; TRIPATHY, S.; JENA, S. K. Remanufacturing for the circular economy: Study and evaluation of critical factors. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 156, n. June 2019, p. 104681, 2020.

SOUSA-ZOMER, T. T.; CAUCHICK, P. A. Exploring the critical factors for sustainable product-service systems implementation and diffusion in developing countries : an analysis of two PSS cases in Brazil. **Procedia CIRP**, v. 47, p. 454–459, 2016.

SUN, D.; WANG, L. Research on heat transfer performance of passive solar collector-storage wall system with phase change materials. **Energy and Buildings**, v. 119, p. 183–188, 2016.

TAN, C. L. et al. The impact of green supply chain management practices on firm competitiveness. **International Journal of Business Innovation and Research**, v. 11, n. 4, p. 539–558, 2016.

TIXIER, D.; MATHE, H.; COLIN, J. **La logistique d'entreprise vers un management plus compétitif**. 2. ed. Paris: DUNOD, 1998.

TURCU, C. Re-thinking sustainability indicators: Local perspectives of urban sustainability. **Journal of Environmental Planning and Management**, v. 56, n. 5, p. 695–719, jun. 2013.

VAN HOOFF, B.; THIELL, M. Anchor company contribution to cleaner production dissemination: Experience from a Mexican sustainable supply programme. **Journal of Cleaner Production**, v. 86, p. 245–255, 1 jan. 2015.

VARGAS GIL, G. M. et al. Photovoltaic energy in South America: Current state and grid

regulation for large-scale and distributed photovoltaic systems. **Renewable Energy**, v. 162, p. 1307–1320, 1 dez. 2020.

VAZQUEZ, M.; HALLACK, M. The role of regulatory learning in energy transition: The case of solar PV in Brazil. **Energy Policy**, v. 114, p. 465–481, 1 mar. 2018.

VENKATESH, V.; BROWN, S. A.; SULLIVAN, Y. W. Guidelines for conducting mixed-methods research: An extension and illustration. **Journal of the Association for Information Systems**, v. 17, n. 7, p. 435–495, 2016.

VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica – Conceitos e Aplicações - Sistemas Isolados e Conectados à Rede**. 1. ed. São Paulo: [s.n.].

WALKER, A. M. et al. Sustainability assessment in circular inter-firm networks : An integrated framework of industrial ecology and circular supply chain management approaches. **Journal of Cleaner Production**, v. 286, p. 125457, 2021.

WEETMAN, C. **Circular Economy Handbook for Business and Supply Chains: Repair, remake, redesign, rethink**. London: Kogan Page, 2017.

WILSON, M.; GOFFNETT, S. Reverse logistics: Understanding end-of-life product management. **Business Horizons**, 2021.

XIA, X.; GOVINDAN, K.; ZHU, Q. Analyzing internal barriers for automotive parts remanufacturers in China using grey-DEMATEL approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 87, p. 811–825, 2015.

XU, M.; DAVID, J. M.; KIM, S. H. The fourth industrial revolution: Opportunities and challenges. **International Journal of Financial Research**, v. 9, n. 2, p. 90–95, 2018.

XU, Y. et al. **Global status of recycling waste solar panels: A review** **Waste Management** Elsevier Ltd, , 1 maio 2018.

ZAMAN, S. et al. Impact of critical success factors and supportive leadership on sustainable success of renewable energy projects: Empirical evidence from Pakistan. **Energy Policy**, v. 162, n. January, p. 112793, 2022.

ZANARDO, R. P. et al. Energy audit model based on a performance evaluation system. **Energy**, v. 154, p. 544–552, 2018.

ZHAO, Z.; ZHANG, S.; ZUO, J. A critical analysis of the photovoltaic power industry in China – From diamond model to gear model. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 4963–4971, 2011.

ZHU, Q.; SARKIS, J.; GENG, Y. Barriers to environmentally-friendly clothing production among Chinese apparel companies. v. 10, n. 3, p. 425–452, 2011.

ZOTT, C.; AMIT, R.; MASSA, L. The Business Model : Recent Developments and Future Research. **Journal of Management**, v. 37, p. 1019–1042, 2011.

## **APÊNDICE A – Formulário de Pesquisa**

### **Formulário de Pesquisa – TCC CAMYLLA RAMOS DE AMORIM**

#### **1. Objetivo do questionário e definições**

O presente formulário tem como objetivo a identificação do nível de importância de cada um dos Fatores Críticos de Sucesso selecionados da literatura para a Implementação da Economia Circular no setor de Energia Solar Fotovoltaica, bem como propiciar a análise da inter-relação entre esses fatores críticos. Os objetivos serão atingidos através da opinião dos atuantes na área (respondentes do questionário).

Fatores Críticos de Sucesso: São os fatores que tornam possível a concretização de um objetivo, nesse caso a implementação da Economia Circular no setor objeto de estudo. Os fatores críticos de sucesso são as porcas e parafusos que constroem um projeto bem-sucedido (ZAMAN et al., 2022) e são utilizados para otimização e priorização de ações (ARNAIZ et al., 2021).

Economia Circular: Processo de transformação das operações da cadeia de suprimentos do modelo linear a um modelo de produção e negócios circular, onde materiais já utilizados e rejeitos ou componentes são reintroduzidos na cadeia, em um ciclo fechado de reuso, reciclagem, remanufatura, reparo e reforma, recapturando valor e minimizando os impactos ambientais negativos (CHEN et al., 2020; FREI; JACK; KRZYZANIAK, 2020)

#### **2. Perguntas gerais**

- a) Nome do respondente
- b) Formação do respondente
- c) Cargo do respondente
- d) Empresa/ usina/ instituição de atuação (informação não divulgada)
- e) Cidade em que a empresa, usina ou instituição se localiza
- f) Porte da empresa ou usina (se aplicável)

### 3. Relação entre os Fatores Críticos

Através deste relacionamento, se torna possível comparar os fatores críticos de sucesso mencionados na literatura.

#### **Instrução de preenchimento:**

Para o preenchimento das matrizes, é analisada a influência da categoria de fatores da questão para com a categoria de fatores das opções das linhas, assinalando uma célula de cada linha de acordo com a legenda:

- 0 – Sem influência;
- 1 – Influência muito baixa;
- 2 – Influência baixa;
- 3 – Influência alta;
- 4 – Influência muito alta.

#### Abreviações:

EC = Economia Circular

FCS = Fatores críticos de sucesso

FV = Fotovoltaico(s)

Os fatores que compõem cada categoria de fatores, bem como a descrição detalhada de cada fator, se encontram no Quadro A1. As referências foram ocultadas visando direcionar o enfoque ao texto informativo, mas podem ser enviadas aos respondentes caso seja de interesse.

### **Quadro A1 - FCS para a implementação da EC no setor de painéis fotovoltaicos**

Categorias	Sigla da categoria	FCS	Descrição
Fatores organizacionais	FO	Comprometimento da alta direção	A liderança e o comprometimento da alta administração facilitam a implementação podem das práticas de EC.
		Alinhamento à EC na política geral da empresa e/ou em suas metas e objetivos	Influência significativa em termos de motivação
		Capital para investimento	Viabiliza a implementação
		Colaboração e coordenação entre as equipes	Permitindo desenvolvimento do projeto de implementação
		Boa performance na gestão dos recursos	Permitindo desenvolvimento do projeto de implementação
Fatores técnicos	FT	Conhecimento técnico das equipes para desenvolvimento de tecnologia	Habilidades técnicas que proporcionam o avanço em projetos tecnológicos
		Conhecimento das práticas de EC	Alinhamento aos objetivos da EC para implementação coerente no processo produtivo
		Enfoque em ecodesign visando desmontagem e gestão dos resíduos	Possibilita melhor gestão dos componentes dos painéis em fim de vida
Fatores de mercado	FM	Consciência sustentável dos consumidores	Motiva as empresas a investirem em EC visando atender às expectativas dos seus clientes
		Relacionamento de parceria e confiança com fornecedores	Maior facilidade na implementação das práticas de EC também em etapas da cadeia sob responsabilidade dos <i>stakeholders</i>
		Presença de concorrentes implementando EC	A pressão da concorrência para práticas de EC instiga a introdução dessas práticas no ciclo da empresa
Fatores governamentais	FG	Regulação governamental estruturada e exigente	Uma legislação forte obriga as indústrias a implementarem práticas de EC para a redução dos prejuízos ao meio ambiente
		Existência de programas de incentivos governamentais eficazes	Incentivos fiscais ou apoio em verba de P&D motivam a implementação
Fatores ambientais	FA	Escassez de recursos utilizados como matéria-prima	A escassez ecológica de recursos necessários para o processo produtivo induz os tomadores de decisão a implementarem práticas de EC no intuito de minimizar o uso desses recursos, ou reincorporar recursos de produtos em fim de vida
		Contexto de prejuízos ambientais	Um cenário de prejuízos ambientais significativos pode incentivar a movimentação das indústrias no sentido da circularização da economia

a) Qual é a influência dos Fatores Organizacionais nos seguintes fatores: (0 – Sem influência; até 4 – Influência muito alta).

Fatores/Influência	0	1	2	3	4
Fatores Técnicos					
Fatores de Mercado					
Fatores Governamentais					
Fatores Ambientais					

- b) Qual a influência dos Fatores Técnicos nos seguintes fatores: (0 – Sem influência; até 4 – Influência muito alta).

<b>Fatores/Influência</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Fatores Organizacionais					
Fatores de Mercado					
Fatores Governamentais					
Fatores Ambientais					

- c) Qual é a influência dos Fatores de Mercado nos seguintes fatores: (0 – Sem influência; até 4 – Influência muito alta).

<b>Fatores/Influência</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Fatores Organizacionais					
Fatores Técnicos					
Fatores Governamentais					
Fatores Ambientais					

- d) Qual é a influência dos Fatores Governamentais nos seguintes fatores: (0 – Sem influência; até 4 – Influência muito alta).

<b>Fatores/Influência</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Fatores Organizacionais					
Fatores Técnicos					
Fatores de Mercado					
Fatores Ambientais					

- e) Qual é a influência dos Fatores Ambientais nos seguintes fatores: (0 – Sem influência; até 4 – Influência muito alta).



<b>Fatores/Influência</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Fatores Organizacionais					
Fatores Técnicos					
Fatores de Mercado					
Fatores Governamentais					

4. Espaço para comentários gerais sobre o tema, como menção a outros FCS relevantes não abordados ou compartilhamento de experiências
5. Possui interesse em receber os resultados desta pesquisa?

## APÊNDICE B – Matrizes resultantes das respostas de cada especialista

Tabela B1 - Matriz preenchida pelas respostas do especialista 1

	FO	FT	FM	FG	FA
FO	0	4	2	0	2
FT	2	0	1	0	4
FM	4	2	0	0	3
FG	3	1	3	0	4
FA	3	2	2	3	0

Fonte: A autora (2022)

Tabela B2 - Matriz preenchida pelas respostas do especialista 2

	FO	FT	FM	FG	FA
FO	0	2	4	3	2
FT	2	0	4	2	3
FM	3	2	0	2	2
FG	3	1	4	0	4
FA	4	3	4	4	0

Fonte: A autora (2022)

Tabela B3 - Matriz preenchida pelas respostas do especialista 3

	FO	FT	FM	FG	FA
FO	0	1	4	3	1
FT	3	0	2	2	1
FM	4	2	0	3	1
FG	4	2	3	0	1
FA	2	1	2	3	0

Fonte: A autora (2022)

Tabela B4 - Matriz preenchida pelas respostas do especialista 4

	FO	FT	FM	FG	FA
FO	0	3	1	0	0
FT	2	0	0	0	0
FM	4	3	0	2	0
FG	4	4	3	0	0
FA	4	4	4	4	0

Fonte: A autora (2022)

Tabela B5 - Matriz preenchida pelas respostas do especialista 5

	FO	FT	FM	FG	FA
FO	0	4	4	3	3
FT	3	0	3	3	3
FM	3	3	0	3	3
FG	2	3	3	0	2
FA	2	3	2	2	0

Fonte: A autora (2022)

Tabela B6 - Matriz preenchida pelas respostas do especialista 6

	FO	FT	FM	FG	FA
FO	0	3	3	3	4
FT	4	0	3	2	2
FM	3	2	0	4	3
FG	1	1	3	0	4
FA	2	2	4	4	0

Fonte: A autora (2022)

Tabela B7 - Matriz preenchida pelas respostas do especialista 7

	FO	FT	FM	FG	FA
FO	0	2	3	3	4
FT	3	0	2	3	3
FM	3	2	0	3	3
FG	4	2	4	0	4
FA	3	3	3	3	0

Fonte: A autora (2022)

Tabela B8 - Matriz preenchida pelas respostas do especialista 8

	FO	FT	FM	FG	FA
FO	0	3	0	0	0
FT	3	0	0	0	0
FM	3	3	0	0	0
FG	0	0	0	0	0
FA	0	0	0	0	0

Fonte: A autora (2022)

Tabela B9 - Matriz preenchida pelas respostas do especialista 9

	FO	FT	FM	FG	FA
FO	0	4	3	2	0
FT	4	0	3	2	1
FM	4	4	0	4	1
FG	4	4	4	0	1
FA	4	4	4	4	0

Fonte: A autora (2022)

Tabela B10 - Matriz preenchida pelas respostas do especialista 10

	FO	FT	FM	FG	FA
FO	0	4	4	3	4
FT	3	0	4	3	4
FM	3	3	0	3	3
FG	4	2	3	0	4
FA	4	4	4	4	0

Fonte: A autora (2022)

Tabela B11 - Matriz preenchida pelas respostas do especialista 11

	FO	FT	FM	FG	FA
FO	0	4	3	3	3
FT	4	0	3	2	2
FM	4	3	0	3	3
FG	3	1	3	0	4
FA	3	3	3	4	0

Fonte: A autora (2022)

Tabela B12 - Matriz preenchida pelas respostas do especialista 12

	FO	FT	FM	FG	FA
FO	0	4	4	4	4
FT	4	0	3	3	4
FM	4	4	0	2	3
FG	4	4	2	0	4
FA	4	4	4	4	0

Fonte: A autora (2022)

Tabela B13 - Matriz preenchida pelas respostas do especialista 13

	FO	FT	FM	FG	FA
FO	0	3	3	3	3
FT	3	0	3	3	3
FM	3	3	0	3	3
FG	3	3	3	0	3
FA	3	3	3	3	0

Fonte: A autora (2022)

Tabela B14 - Matriz preenchida pelas respostas do especialista 14

	FO	FT	FM	FG	FA
FO	0	4	3	2	3
FT	2	0	3	2	4
FM	4	3	0	1	1
FG	3	3	4	0	3
FA	4	2	3	1	0

Fonte: A autora (2022)

Tabela B12 - Matriz preenchida pelas respostas do especialista 15

	FO	FT	FM	FG	FA
FO	0	4	3	3	3
FT	4	0	3	3	3
FM	3	2	0	3	4
FG	2	2	3	0	3
FA	2	2	3	3	0

Fonte: A autora (2022)

## **APÊNDICE C – Respostas à pergunta aberta referente a sugestão de outros FCS e contribuições gerais**

**Respondente 2:** Além dos fatores mencionados, acrescentaria um fator que seria “relações internacionais”. Esse tema está entre o fator de mercado e o governamental, mas tem sua particularidade em casos de influência de situações externas de outros países, que geralmente são os fornecedores.

**Respondente 3:** Em mercados incipientes, tais como aqueles que permeiam e compõem as tecnologias que fomentam a transição energética, das fontes fósseis e não renováveis para as ditas limpas e renováveis, é essencial a existência de políticas públicas (figurado aqui por fatores governamentais), dado que as organizações empresariais (no caso, fatores organizacionais) visam, em maior parte, exclusivamente o resultado financeiro e, além disso, estão pareadas com seus respectivos concorrentes (fatores de mercado), sendo que os fatores técnicos devem ter pouca influência nos demais fatores, sendo mais influenciado do que influenciável.

**Respondente 6:** No caso de empreendimentos (usinas solares) de grande porte, é importante também verificar:

- O relacionamento com a comunidade, que além de poder criar alguns entraves durante o processo de implantação se torna um aspecto da economia circular e do desenvolvimento sustentável;

- Aspecto ambiental conta bastante, licenças (instalação e operação), condicionantes, recuperação de Áreas de Preservação Permanentes (APP).

**Respondente 12:** Para Execução de projetos Usinas Solares, um dos fatores mais importantes são os fatores Ambientais, principalmente em regiões onde existem reservas de mata nativa, a cobrança ambiental é muito Alta, o que mostra a relevância da circularização dessa economia.