

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOENERGIA

**CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR EM ENERGIA
ELÉTRICA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE A
AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA E ESTUDO DE
VIABILIDADE ECONÔMICA**

Angelica Lima da Silva Oliveira

Maringá – PR

2022

ANGELICA LIMA DA SILVA OLIVEIRA

**CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR EM ENERGIA
ELÉTRICA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE A
AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA E ESTUDO DE
VIABILIDADE ECONÔMICA**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado em Bioenergia, área de concentração, Impactos Ambientais e Socioeconômicos da Universidade Estadual de Maringá.

Orientador: Mauro A. da Silva Sá Ravagnani

Maringá – PR

2022

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Dedico este trabalho ao meu marido Joseph dos Santos Oliveira, por todo carinho, paciência, ajuda e atenção durante esse período. Por ser esse companheiro para todas as horas, por ajudar mesmo quando não sabia, por reavivar minhas energias nas horas de desânimo, por estar a meu lado nesse período de alegrias, tristezas, dificuldades e realizações. Dedico especialmente aos meus pais, Idrenio de Lima Carlos e Lenira Lima da Silva que sempre me incentivaram a estudar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por permitir que esse sonho se tornasse realidade.

Agradeço a meu marido Joseph Oliveira, pela ajuda durante esses anos.

Agradeço a meus pais, pelo apoio durante este período.

Agradeço ao amigo Franklin Lopes, pelas palavras de direcionamento e pelas conversas que possibilitaram ideias a serem realizadas no trabalho.

Agradeço a minhas amigas por todo incentivo durante esse processo.

Agradeço em especial ao casal amigo, Karen e Edilson pelo apoio e ajuda nesse período.

Agradeço a todos os professores e funcionários do Programa de Pós Graduação em Bioenergia e a todas as instituições Nucleadoras. Em especial, ao atual coordenador do programa na UEM, Professor Dr. Daniel Tait Vareschini, a coordenadora anterior Dra. Gisella Maria Zanin e a nossa querida secretária Maria Sueli, por toda ajuda, atenção e paciência desde a minha inscrição no programa.

Agradeço as empresas que fizeram parte da pesquisa exploratória. As empresas que forneceram os dados para a Avaliação Econômica e Financeira: Solução Energia Solar & Renováveis e Tryrex Industria & Comércio LTDA.

Agradeço em especial a meu orientador Dr. Mauro Antônio da Silva Sá Ravagnani, que aceitou seguir neste caminho comigo. Obrigada professor pelos dois anos e meio de orientação e paciência.

Por fim meu agradecimento a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa concedida a mim no segundo ano do mestrado.

Sem Deus e sem todas essas pessoas, não seria possível chegar até aqui.

*“Não abandone o processo.
Sempre haverá um recurso disponível.”*

Jaqueline Sutil

OLIVEIRA, Angelica Lima da Silva. **Conversão de energia solar em energia elétrica: Uma revisão sistemática sobre a avaliação do ciclo de vida e estudo de viabilidade econômica.** 2022, 58 f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Centro de Tecnologia, Universidade Estadual de Maringá. Maringá, 2022.

RESUMO

A preocupação com o ambiente em que vivemos, com a poluição do ar, do solo e das águas cresce constantemente. Desse modo, é essencial que fontes de energia renováveis sejam estudadas e implementadas no Brasil e no mundo. Nesse sentido, a presente pesquisa teve como objetivo avaliar a conversão de energia solar em energia elétrica, fazer uma revisão sistemática sobre a avaliação do ciclo de vida e um estudo de viabilidade econômica. Quanto a metodologia para a Avaliação do Ciclo de Vida foi realizada uma revisão sistemática onde foram coletados dados específicos sobre o tema. Algumas das palavras empregadas na busca foram: energia fotovoltaica, ciclo de vida da energia fotovoltaica, fases do ciclo de vida da energia fotovoltaica. Um estudo de avaliação econômica e financeira em uma residência na cidade de Maringá – PR também foi realizado. Para a avaliação econômica uma empresa de instalação de placas fotovoltaicas na cidade de Maringá disponibilizou alguns dados. Os dados que não foram obtidos junto a empresa, foram coletados na literatura. Um dos resultados da pesquisa está relacionado ao impacto ambiental que o processo de manufatura do silício ocasiona. Em todos os artigos verificados foi observado que nessa fase ocorre um grande consumo de recursos naturais e emissões de poluentes. No que se refere a avaliação econômica, após a instalação das placas o tempo de retorno do investimento ocorre entre o terceiro e quarto ano. Diante disso, pode-se concluir que uma parte do ciclo de vida da energia fotovoltaica causa impactos ao meio ambiente e esses impactos ocorrem no processo de manufatura do silício e na fabricação dos painéis, majoritariamente. Após essa fase a energia gerada é limpa e o processo é sustentável. Com a avaliação econômica e financeira, podemos observar que a energia gerada é rentável ao consumidor.

Palavras-chave: Energia renovável. Avaliação econômica. Energia fotovoltaica. Impactos Ambientais.

OLIVEIRA, Angelica Lima da Silva. **Conversion of solar energy into electrical energy: A systematic review on life cycle assessment and economic feasibility**

study. 2022, 58 f. Dissertation (Master in Bioenergy) – Technology Center, State University of Maringá. Maringá, 2022.

ABSTRACT

The concern with the environment in which we live, with air, soil and water pollution is constantly growing. Thus, it is essential that renewable energy sources be studied and implemented in Brazil and worldwide. In this sense, the present research aimed to evaluate the conversion of solar energy into electrical energy, to carry out a systematic review on the assessment of the life cycle and an economic feasibility study. As for the methodology for the Life Cycle Assessment, a systematic review was carried out where specific data on the subject were collected. Some of the words used in the search were: photovoltaic energy, photovoltaic energy life cycle, phases of the photovoltaic energy life cycle. A study of economic and financial evaluation in a residence in the city of Maringá - PR was also carried out. For the economic evaluation, a company that installs photovoltaic panels in the city of Maringá provided some data. Data that were not obtained from the company were collected from the literature. One of the results of the research is related to the environmental impact that the silicon manufacturing process causes. In all articles checked, it was observed that in this phase there is a large consumption of natural resources and emissions of pollutants. With regard to the economic evaluation, after the installation of the boards, the return on investment occurs between the third and fourth year. In view of this, it can be concluded that part of the life cycle of photovoltaic energy causes impacts on the environment and these impacts occur in the silicon manufacturing process and in the manufacture of panels, mostly. After this phase, the energy generated is clean and the process is sustainable. With the economic and financial evaluation, we can see that the energy generated is profitable for the consumer.

Keywords: Renewable energy. Economic evaluation. Photovoltaics. Environmental impacts.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Respostas à pergunta (a) do questionário aplicado.....	36
Tabela 2 – Respostas à pergunta (b) do questionário aplicado.....	37
Tabela 3 – Respostas à pergunta (c) do questionário aplicado.....	37
Tabela 4 – Principais trabalhos utilizados.....	43
Tabela 5 – Cálculos.....	49
Tabela 6 – Tempo de Retorno de Investimento em Energia (<i>Energy Payback Time - EPBT</i>).....	50
Tabela 7 – Resultado dos cálculos para VPL.....	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Emissão de CO ₂ dos setores industrial, de energia e de mudança do uso da terra e florestas.....	14
Figura 2 – Fluxograma do processo para fabricação de placas fotovoltaicas.....	20
Figura 3 – Matriz elétrica brasileira de 2021, ano base 2020.....	26
Figura 4 – Matriz elétrica brasileira de 2022, ano base 2021.....	26
Figura 5 – Matriz elétrica Mundial.....	27
Figura 6 – Lavadora de painéis Solares e seus componentes.....	40
Figura 7 – Etapas da realização deste estudo de ACV.....	42

LISTA DE ABREVIACÕES

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida.
BNEF – *Bloomberg New Energy Finance*.
ECE – Eficiência de Conversão de Energia.
EG-Si – Silício de Grau Eletrônico.
EPBT – *Energy Payback Time* (tempo de retorno do investimento).
EPBT – Tempo de Reembolso de Energia.
EVA – Acetato Vinílico de Etileno.
FV – Capacidade Fotovoltaica.
GD – Geração Distribuída.
GEE – Gases de Efeito Estufa.
IBICT – Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia.
IRENA – Agência Internacional de Energia Renovável.
ISO – Organização Internacional de Normalização.
ITC – *Investment Tax Credit* (Investimento em Imposto).
LCA – *Life-Cycle Assessment*.
MG-Si – Silício de Grau Metalúrgico.
ODS – Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável.
ONU – Organização das Nações Unidas.
OPV – Células Orgânicas.
PBACV – Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida.
PCH – Pequenas Centrais Hidrelétricas.
PQs – Pontos Quânticos.
SoG-Si – Silício de Grau solar.
TIR – Taxa Interna de Retorno.
TMA - Taxa Mínima de Atratividade.
UFV – Usinas Fotovoltaicas.
VPL – Valor Presente Líquido.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
---------------------------	----

2 REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1 Avaliação do ciclo de vida – acv	15
2.2 Energia limpa	17
2.3 Geração distribuída	17
2.4 Fases do ciclo de vida da transformação da energia solar em energia elétrica	19
2.4.1 Fabricação das placas.....	20
2.4.2 Os sistemas fotovoltaicos.....	23
2.5 Potencial solar	24
2.5.1 Potencial solar no Brasil.....	24
2.5.2 Potencial solar no mundo.....	26
2.6 Legislação	28
2.7 Trabalhos sobre a avaliação do ciclo de vida	30
3 METODOLOGIA	34
3.1 O método	34
3.2 Pesquisa experimental	35
3.3 Definição de objetivo e escopo	37
3.4 Análise do inventário	38
3.5 Avaliação dos impactos	40
3.6 Interpretação	40
3.7 Análise de investimento de capital	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1 Resultados e discussão da avaliação do ciclo de vida	42
4.2 Resultados e discussão da avaliação econômica e financeira	47
4.2.1 Construção do fluxo de caixa.....	47
5 CONCLUSÕES	51
REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

A partir da revolução industrial a capacidade do ser humano de interferir na natureza aumentou e com isso a energia proveniente das fontes fósseis tem sido cada dia mais utilizadas. A busca por conforto e praticidade na sociedade atual é constante, e essa necessidade de praticidade e rapidez demanda cada dia mais energia.

Diante disso, a energia elétrica passou a ser indispensável para a vida humana e o aumento do seu uso trouxe a preocupação em encontrar novas fontes de energia que causem menos impacto ao ambiente, as chamadas fontes renováveis (RAMOS, DURANTE e CALLEJAS, 2017).

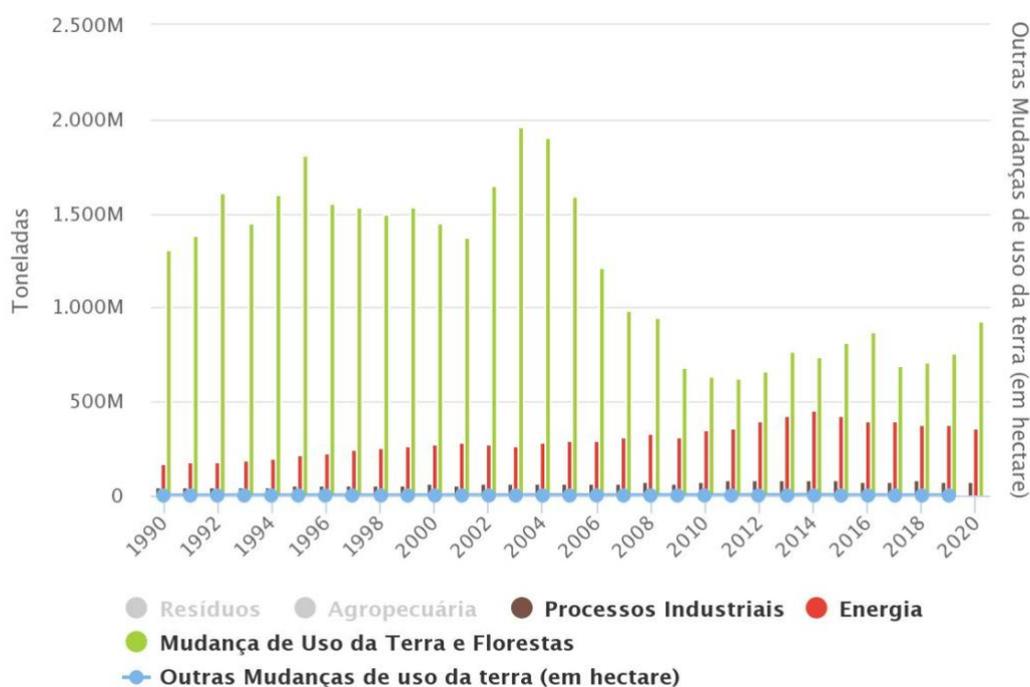
Uma das preocupações sobre este desenvolvimento é a poluição causada por essa demanda constante por energia. Assim, a mudança da matriz energética fóssil, não renovável, se faz cada dia mais necessária. Uma vez que um dos efeitos do uso desta fonte de energia é a geração de gases conhecidos como do efeito estufa, que influencia no aumento médio das temperaturas e em eventos climáticos extremos, como no aquecimento dos oceanos.

Há um debate atualmente sobre a diminuição desses chamados gases de efeito estufa (GEE), principalmente no setor energético. A principal medida para mudar essa situação é a substituição de fontes fósseis por fontes de energia renováveis. No entanto, não é somente o setor energético o principal emissor desses gases (SILVA NETO, 2021). Na Figura 1 podemos observar as emissões de CO₂ do setor de energia, indústria e de uso da terra e florestas.

O Brasil apresenta ainda uma dependência parcial de fontes não renováveis para geração de energia. Todavia, possui potencial para instalação de fontes de energia renováveis como a fotovoltaica.

Com destino a uma gestão eficaz do sistema energético é necessário o desenvolvimento de estudos de previsão do consumo de energia elétrica (CASTRO e MONTINI, 2010). Países como Portugal, Canadá e Austrália, entre outros, estão investindo em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) da energia fotovoltaica para geração de energia elétrica. Esses estudos são necessários para estabelecer um direcionamento para pessoas, indústrias e países de investimento e retorno das fontes fotovoltaicas. No entanto, no Brasil não há muitas pesquisas de impacto abordando a ACV (BARROS, PIEKARSKI e SALVADOR, 2017).

Figura 1 – Emissão de CO₂ dos setores industrial, de energia e de uso da terra e florestas.



Fonte: elaborado pela autora, a partir da plataforma de Sistema de Estimativas De Emissão de Gases - SEEG (2022).

O século XXI é o século da mudança de mentalidade com relação à proteção ambiental. No que se refere a energia, esse é o tempo onde mais fontes renováveis estão sendo implementadas. Diante dessa mudança de mentalidade e prática de consumo, a energia solar surge como uma fonte promissora a médio prazo. Para isso é importante que todas as energias de fontes renováveis sejam estudadas para que possam ser instaladas de maneira que consigam competir com as fontes fósseis em relação ao custo e ao benefício (FUKUROZAKI e PASCHOAL, 2010).

No presente estudo foi avaliado o ciclo de vida da energia elétrica produzida a partir da energia solar, de forma a auxiliar indústrias e governos na tomada de decisão. Segundo Barros, Piekarski e Salvador (2017), estão sendo desenvolvidas pesquisas que utilizam ACV com a finalidade de fornecer dados, para direcionar o presente e o futuro da geração de energia elétrica. No entanto, a maioria das pesquisas sobre o uso de ACV em sistemas de geração de energia elétrica a partir da energia solar estão sendo feitas em países europeus. O Brasil ainda tem poucas pesquisas relacionadas a este tema e os estudos feitos no exterior relatam que as fontes renováveis são as principais formas de geração de energia do futuro.

Existem 17 objetivos para o desenvolvimento sustentável (ODS) elaborados pela Organização das Nações Unidas (ONU). A meta sete trata das energias limpas e acessíveis a todos e tem como um dos objetivos reduzir as emissões globais de Gases do Efeito Estufa (GEE) e aumentar a porcentagem de energias renováveis presentes na matriz energética brasileira até 2030 (UN, 2016).

A preocupação com a poluição do ar, do solo e das águas cresce constantemente. Desse modo, é essencial que fontes de energia renováveis sejam estudadas e implementadas no Brasil e no mundo. Diante do exposto o presente estudo faz-se necessário para conhecer a situação atual do Brasil com relação as fontes de energia solar e a sua conversão em energia elétrica.

O objetivo desse trabalho foi: avaliar a conversão de energia solar em energia elétrica, fazer uma revisão sistemática sobre a avaliação do ciclo de vida e um estudo de viabilidade econômica. Realizou-se também:

- Coleta de dados presentes em estudos já desenvolvidos no Brasil e no mundo;
- Análise dos impactos ocasionados nestes processos;
- Avaliação da instalação de energia solar, se é benéfica ou não.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo os assuntos relacionados a avaliação do ciclo de vida - ACV, a energia limpa e a avaliação econômica e financeira serão introduzidos.

2.1 Avaliação do ciclo de vida – ACV

A produção de qualquer produto pode causar uma série de impactos ao ambiente. Os fluxos de energia precisam ser avaliados e medidos, para que os prováveis impactos ambientais de uma determinada atividade, possam ser verificados. No final dessa avaliação é possível compreender quais são os danos e benefícios da fabricação e uso de um produto específico (IBICT, 2019).

Os estudos sobre avaliação do ciclo de vida tiveram seu início na década de 1960. A Coca-Cola Company foi a primeira empresa a iniciar as pesquisas que geraram a base da ACV. A companhia fez a comparação de diferentes recipientes de bebidas para determinar qual container causava menos impactos ao meio ambiente.

Este estudo quantificou matérias-primas e combustíveis usados e as cargas ambientais dos processos de fabricação de cada container (CURRAN, 2008).

A Avaliação do Ciclo de Vida – ACV, em inglês *Life-Cycle Assessment*, é um estudo de contabilidade e gestão ambiental usado para avaliar as diversas fases de um processo ou produto. Dentro dessa avaliação pode-se fazer uma abordagem do berço ao túmulo, ou seja, avaliar todas as entradas e saídas, os aspectos e impactos ambientais de determinada atividade ou pode-se avaliar apenas uma parte do processo. A ACV ajuda a entender como as escolhas feitas no início do processo interferem nas outras fases do ciclo de vida, além disso ajuda pessoas e organizações a tomarem decisões a respeito de determinado produto ou processo, é uma ferramenta destinada a auxiliar tomadores de decisão a compararem fatores, riscos e impactos ambientais de uma determinada atividade. Por meio da ACV pode-se avaliar todas as fases do produto ou processo em questão, partindo do princípio que eles são interdependentes e que uma decisão tomada em uma fase do processo tem consequências em outra fase. (CURRAN, 2008; ABNT, 2009b).

A ISO 14040 e a ISO 14044 descrevem as fases de uma ACV, que são: objetivo e definição do escopo do estudo, inventário de ciclo de vida, avaliação de impactos e interpretação. O objetivo do estudo visa identificar porque o estudo é necessário, o porquê de se pesquisar a respeito e para quem o estudo está sendo feito. O escopo é o caminho que terá que ser percorrido para chegar ao objetivo. Nessa fase, leva-se em consideração as funções do produto ou sistema a ser estudado, os impactos selecionados para avaliação, a metodologia a ser utilizada, os limites do estudo, o formato do relatório e durante o estudo, o escopo pode ser modificado, pois a ACV é uma técnica que pode ser feita mais que uma vez. A análise do inventário quantifica aspectos ambientais como: consumo de energia, uso de água, geração de efluentes, entre outros. A fase de avaliação dos impactos busca mensurar o quanto aquele impacto interfere no ciclo de vida da atividade em questão. Por último, é realizada a interpretação dos resultados, em que são feitas constatações para responder questões como: O resultado gerado é confiável? Quanto de impacto essa atividade gera? Quais impactos são mais relevantes para essa atividade? Todas essas perguntas devem ser respondidas ou não, com a interpretação dos dados coletados (ABNT, 2009a).

2.2 Energia limpa

O impacto comprovado provocado no ambiente e na saúde humana pela geração e emissão de gases de efeito estufa fez com que o mundo passasse a procurar alternativas para diminuir as emissões de dióxido de carbono (CO₂), provocadas pelo uso desmedido de fontes fósseis. Essa necessidade, atrelada ao Protocolo de Kyoto, em 1997, que foi o primeiro tratado internacional que estabeleceu metas para redução das emissões de gases do efeito estufa, fez com que os países se empenhassem em gerar uma energia mais limpa e isso levou a indústria a desenvolver células fotovoltaicas (dispositivos elétricos responsáveis por converter a energia do sol em energia elétrica) de melhor performance, com custos acessíveis para a sua implantação na geração de energia elétrica para uso residencial e comercial a partir da energia solar (VALKILA e SAARI, 2010).

A natureza oferece muitas possibilidades de produção de energia, e o Brasil é um país privilegiado nesse aspecto. Deste modo, é fundamental que o desenvolvimento da indústria esteja diretamente atrelado à preocupação social e ambiental, e não somente com o aspecto econômico (LIBONI e CEZARINO, 2012).

A Agência Internacional de Energia Renovável descreve metas de descarbonização. Diminuir a emissão de CO₂ relacionada a energia é a principal meta. Em segundo lugar, deve-se reduzir a poluição do ar, que causa grandes problemas a saúde, usando tecnologias que emitam menos gás carbônico para a atmosfera. A mudança na geração de energia ajuda não só na diminuição do envio de carbono para a atmosfera, como também na melhora da qualidade do ar e também na saúde pública. A mudança no sistema de geração de energia precisa ser rápida para que o objetivo do acordo de Paris, que é manter o aumento da temperatura média global por volta de 1,5 graus Celsius, seja cumprido (IRENA, 2019).

2.3 Geração distribuída

Os setores energéticos do Brasil e do mundo vêm buscando fontes alternativas de geração de energia elétrica. Desse modo, a geração distribuída (GD), que é a

geração de energia elétrica realizada perto da unidade consumidora ou junto aos consumidores, ganha destaque e esta se tornando mais comum (SCOLLA, 2020).

A geração distribuída é a energia gerada mais perto dos consumidores, diminui as perdas relacionadas à transmissão na forma convencional e diversifica as tecnologias empregadas na produção de energia, envolvendo tecnologias não-renováveis e renováveis, como a energia solar (OLADE, 2011; BORÉM e VASCONCELOS 2016).

De acordo com a norma brasileira, uma empresa ou pessoa jurídica pode instalar e vender energia distribuída na rede. Todavia, a pessoa física só pode receber créditos para abater no seu consumo. Essa falta de incentivo para geração de energia elétrica em residências é fruto da falta de políticas públicas e planejamento nacional (BURSZTYN, 2020).

O programa Luz para todos do governo federal foi de imensa importância para que o Brasil quase chegasse à universalização do acesso à energia elétrica (BURSZTYN, 2020). No entanto, gerou um outro problema: como pagar a conta de luz? Com os devidos incentivos e políticas públicas a energia solar poderia se tornar um divisor de águas para as famílias, produtores rurais e a sociedade como um todo, pois gerando a própria energia e podendo vender essa energia à rede as pessoas não dependeriam tanto do governo para sobreviver. Todavia, como a legislação atual permite apenas acumular créditos para serem abatidos na conta. Isso não seria possível sem uma mudança nessa lei, permitindo, assim, que as pessoas físicas pudessem vender o excedente de sua produção para a companhia de energia, gerando renda e diminuindo o impacto causado pelas fontes fósseis e até mesmo economizando água usada pelas fontes hidrelétricas que causam um impacto imenso no meio ambiente e no entorno de suas instalações, além de um custo exorbitante (BURSZTYN, 2020).

Rangel, Borges e Santos (2016) realizaram um estudo comparativo para saber os custos e tarifas da geração de diferentes fontes de energia renovável. Ao fim da pesquisa os autores concluíram que quanto maior o custo unitário maior a tarifa de energia e nessa pesquisa os custos unitários mais baixos foram da energia eólica e da PCH, a tarifa da energia fotovoltaica é aproximadamente 40 % maior do que a tarifa de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH).

A geração de energia por meio de fontes renováveis traz muitos benefícios ao meio ambiente e à sociedade, além da diversificação da matriz energética, da diminuição dos gases de efeito estufa, e da geração de empregos (PACHECO, 2006).

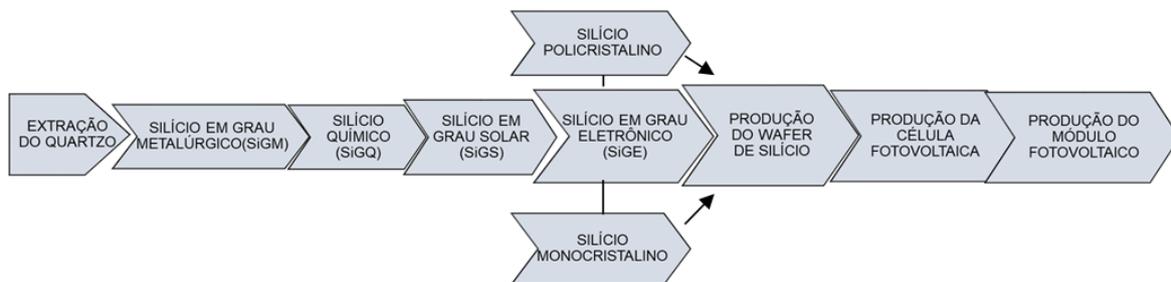
2.4 Fases do ciclo de vida da transformação da energia solar em energia elétrica

Há milhares de anos a humanidade usa a luz do sol para auxiliar em algumas atividades. As plantas utilizam a luz solar para a fotossíntese e há outras maneiras de aproveitar este recurso abundante na terra, como por exemplo a captação da luz solar por meio das células fotovoltaicas, onde ocorre uma reação química, que converte a energia solar em eletricidade. A maioria das células fotovoltaicas é feita de silício. Este elemento faz ligações covalentes perfeitas, devido as suas propriedades semicondutoras (HOLMES e FLETCHER, 2015).

Na década de 1950 foi fabricada a primeira célula solar fotovoltaica de semicondutor de silício. Isso aconteceu nos Estados Unidos e a aplicação inicial aconteceu para geração de eletricidade para os satélites espaciais americanos. Em meados dos anos 1970, devido à crise do petróleo, os módulos de células fotovoltaicas tiveram a sua expansão global em escala comercial para geração de energia elétrica (MUNTASSER *et al.*, 2000).

Para que as reações químicas aconteçam na transformação do dióxido de silício em semicondutor, ele é transformado em sílica com carbono em uma grande fornalha. Assim, o silício é purificado no forno e se converte em silício de grau metalúrgico, para ser usado como semicondutor (SHERWANI; USMANI; VARUN, 2010). A Figura 2 apresenta todas as etapas do processo de manufatura do silício, até chegar à produção dos módulos.

Figura 2: Fluxograma do processo para fabricação de placas fotovoltaicas.



Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados da CETEM, (2019) e dados de BEZERRA, LIRA e SILVA (2018).

2.4.1 Fabricação das placas

Na natureza, o silício não é encontrado no estado puro. No entanto, seus compostos podem ser encontrados. É o segundo elemento mais abundante e utiliza mais de 28 % da massa da crosta terrestre, ficando atrás apenas do oxigênio, que compõe quase a metade da crosta. Existe silício na água do mar, mas sua concentração é baixa, ocupando três miligramas por litro. O silício está presente no quartzo (SiO_2), sua principal fonte de exploração. Também existe silício na maioria das rochas que formam a crosta terrestre, como arenitos e granitos (CARVALHO; MESQUITA e ROCIO, 2014).

O material inicial para a produção do silício puro usado em painéis fotovoltaicos e componentes eletrônicos é o Silício de Grau Metalúrgico (MG-Si), que é produzido pela redução do óxido de silício com carbono em forno de arco (SAFARIAN; TRANELL; TANGSTAD, 2012). Para usar o MG-Si como semicondutor para células solares, por exemplo, ele precisa ser purificado até que atinja cerca de 0,01 até 0,00001 ppm de impurezas. O silício pode ser classificado como Silício de Grau solar (SoG-Si) com 0,01 ppm ou Silício de Grau Eletrônico (EG-Si) com 0,00001 ppm de impurezas (JUNGBLUTH *et al.*, 2012).

Existem vários tipos de processos para purificação do silício. Alguns estão descritos abaixo:

Processo Siemens – as barras de silício metalúrgico (pureza de até 99,5 %) são expostas, à temperatura de 1.150°C, ao gás triclorossilano, que se decompõe e deposita o silício puro nas barras, fazendo com que se atinja uma pureza aproximada de 99,9999999 %. O silício obtido por esse método e por outros similares apresenta uma fração de impurezas de uma parte por bilhão ou menos e é denominado silício policristalino (CARVALHO; MESQUITA e ROCIO, 2014).

Processo DuPont – reação de tetracloreto de silício, à temperatura de 950°C, com vapores de zinco, na reação. É um método difícil, onde o cloreto de zinco, que é um subproduto da reação, solidifica-se e provoca a obstrução das linhas de produção. Esse método foi abandonado e substituído pelo processo Siemens. O silício policristalino pode ser produzido em diferentes graus de pureza (CARVALHO; MESQUITA e ROCIO, 2014).

Processo Czochralski – faz a transformação do silício de grau eletrônico (SiGE), que tem alto grau de pureza e é utilizado para a fabricação, pelo método do silício monocristalino, muito usado nas indústrias de semicondutores e de energia fotovoltaica. O silício de grau eletrônico (SiGE) gasta mais energia para sua purificação em comparação com o silício de grau solar SiGS, que possui pureza inferior, e é utilizado para fabricar lingotes ou faixas policristalinas. Uma vantagem do silício monocristalino é que os módulos possuem alta eficiência, comparados com o silício policristalino (CARVALHO; MESQUITA e ROCIO, 2014).

A célula solar ou célula fotovoltaica é um dispositivo eletrônico, um semicondutor que capta luz solar e a converte em energia elétrica. Existem diferentes tipos de células, como as fabricadas com silício, orgânicas, com telureto de cádmio (CdTe), de pontos quânticos, de perovskita (um mineral de óxido de cálcio e titânio que também pode ser usado para fabricação das células solares), etc (JEAN *et al.*, 2015).

A Primeira geração é constituída por células de silício cristalino, divididas em duas categorias, o silício monocristalino e o policristalino, que consistem de uma lâmina de silício na qual é formada uma junção metalúrgica P-N. O silício ainda é o material dominante no mundo todo, principalmente pela sua alta eficiência de conversão de energia (ECE), que fica geralmente entre 15 e 20 % (CARVALHO; MESQUITA e ROCIO, 2014; JEAN *et al.*, 2015).

A Segunda geração de células solares é constituída por filmes finos. Os principais são: Telureto de cádmio (CdTe), que tem a melhor relação custo benefício

entre os filmes finos; Disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS), que permite ao fabricante do painel reduzir os custos; Silício amorfo hidrogenado (a-Si:H), que é o que tem menor eficiência e sua implementação esbarra na falta de longevidade das placas. A eficiência das células solares de filmes finos está entre 7 e 13 %, dependendo do material utilizado. Uma das vantagens da tecnologia de filmes finos é sua baixa perda de temperatura quando expostos a sombreamento ou a baixas irradiâncias. Entre as desvantagens estão a degradação mais rápida, e sua eficiência menor que os filmes cristalinos (JOÃO, 2016).

As células de Terceira geração são as células orgânicas (OPV), pontos quânticos (PQs), células tandem/multijunção, células solares sensibilizadas por corantes e tecnologias de upconversion. Essas células permitem a utilização da luz solar de maneira mais eficiente, utilizam materiais abundantes e possuem baixa toxicidade (ELY e SWART, 2014).

As células de silício monocristalino são historicamente as mais usadas. Passam por um processo de desoxidação e purificação em grandes fornos. Com isso, alcançam um grau de pureza de 98 a 99 %. No entanto, para serem usadas como células fotovoltaicas, precisam alcançar 99,9999 % de pureza. As células monocristalinas são geralmente as que apresentam maior eficiência, chegando em 15% em níveis industriais e em até 18 % em laboratório (CEPEL, 2006).

As de Silício policristalino são mais baratas e exigem um processo de preparação das células menos rigoroso. No entanto, são menos eficientes, chegando em até 12,5 % de eficiência em escala industrial (CEPEL, 2006).

As células de silício Amorfo têm um custo de produção mais barato que as outras células. Possuem um processo de fabricação mais simples e um baixo consumo de energia na produção. Contudo, apresenta baixa eficiência em comparação com as células monocristalina e policristalina e, ao longo do seu uso, a célula vai se degradando, diminuindo, assim, sua competitividade em relação às outras (CEPEL, 2006).

Os módulos fotovoltaicos são várias células agrupadas. As células podem ser agrupadas em série ou em paralelo. Quando conectadas em paralelo, suas correntes são somadas e a tensão do módulo é equivalente a tensão da célula. Quando agrupadas em série soma-se o valor de tensão de cada célula chegando à tensão de 12 V. A intensidade da iluminação faz com que a corrente gerada nos módulos

aumente linearmente. Todavia, quando aumenta a temperatura na célula a eficiência do módulo cai (CEPEL, 2006).

Outros materiais em menores quantidades são usados para fabricação dos módulos fotovoltaicos. Estes materiais são o alumínio, que está na moldura que fica ao redor do painel solar; o cobre que é um excelente condutor, podendo aumentar a eficiência das placas; o vidro, que fica diretamente exposto ao ambiente; o filme encapsulante conhecido como EVA (acetato vinílico de etileno, derivado do inglês *Ethylene Vinyl Acetat*); o Backsheet, que é o filme branco que vai na parte de trás do painel solar; a caixa de junção, que fica na parte de trás do painel solar e que possui dentro diodos e o by-pass, que garante a segurança e o bom funcionamento do painel solar (PORTAL SOLAR, [entre 2014 e 2022]).

2.4.2 Os sistemas fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos podem ser conectados à rede (conhecidos também como *on grid*), isolados (*off grid*) e podem ser híbridos (sistema que busca unir: *on grid* e *off grid*, buscando a conexão com a rede de distribuição local e o armazenamento de energia, por meio de baterias. Já os sistemas de geração de energia elétrica por hibridização (instalações híbridas) possuem a geração de energia provinda de diversas fontes como turbinas eólicas, geração a diesel e módulos fotovoltaicos, atendem um número maior de usuários, todas essas fontes compartilham um mesmo ponto de conexão (CEPEL, 2006).

A energia fotovoltaica está sendo usada de diversas formas nos dias de hoje e pode-se verificar instalações em residências e verificar usinas com capacidade de gerar energia para uma cidade toda, tanto no Brasil como no mundo. Tanto as instalações menores quanto as maiores geram impacto em nosso meio. No estudo de Turney e Fthenakis (2011), por exemplo, os autores abordaram os impactos que a instalação de grandes usinas fotovoltaicas ocasionam. Nesse estudo os autores encontraram trinta e dois tipos de impacto, vinte e dois deles benéficos, quatro impactos neutros e os outros seis precisam ser mais estudados. No que se refere aos impactos ocasionados pelo uso do solo, os impactos ocasionados pela instalação de usinas solares seriam benéficos em áreas desérticas, pois não iriam destruir fauna e flora e, no deserto, até mesmo no inverno há altos níveis de irradiação solar. Dentre

os impactos positivos da instalação de usinas fotovoltaicas estão a diminuição de GEE para o ambiente. Um impacto negativo estudado pelos autores refere-se aos recursos hídricos, pois a grande área ocupada pelos módulos fotovoltaicos pode diminuir a infiltração da água e aumentar o escoamento, ocasionando assim o surgimento de erosão, principalmente se o solo estiver sem vegetação.

2.5 Potencial solar

2.5.1 Potencial solar no Brasil

O Brasil pode tornar-se uma potência no setor de energia fotovoltaica, pois possui uma uniformidade quase plena de radiação solar incidente no seu território, que é uma grande vantagem em relação à Alemanha, por exemplo, que recebe 40 % menos radiação do que o lugar menos ensolarado do Brasil e, mesmo assim, é um país onde as instalações e os estudos sobre energia fotovoltaica estão bem avançados (MOREIRA JÚNIOR e SOUZA, 2020). Este resultado corrobora os resultados da pesquisa de Galdino *et al.*, (2000), que relata que o potencial de radiação solar do Brasil é muito superior à verificada em alguns países, o que coloca o país em uma posição de destaque para geração desse tipo de energia.

Em 2016 o Brasil foi considerado um dos dez maiores investidores em energia solar no mundo (ABES, 2017). De acordo com o relatório *Bloomberg New Energy Finance - BNEF* (2021), os investimentos em energia de baixo carbono no âmbito global chegaram a US\$ 501,3 bilhões em 2020, 9 % a mais do que em 2019. Mesmo nesse período difícil de crise econômica causada pela pandemia de COVID-19, o setor de energias renováveis foi o que mais recebeu investimentos, chegando a US\$ 303,5 bilhões para novos projetos. Dentre as energias renováveis o destaque foi para a energia solar, que recebeu o maior investimento, no valor de US \$ 148,6 bilhões, o que representa um aumento de 12 % de um ano para o outro.

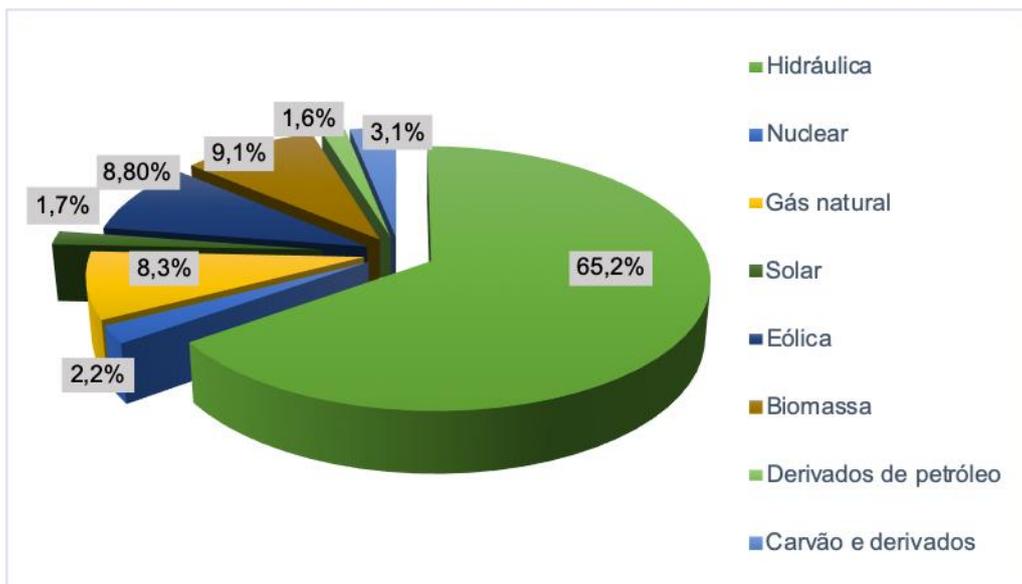
A energia solar, de 2017 em diante, teve um grande crescimento, devido à queda nos preços do material para instalação fotovoltaica e dos avanços da geração distribuída. Com isso, ao final de 2020, o Brasil tinha uma potência de 7.977,7 MW instalada. Só o estado do Ceará tem aproximadamente 200 MW instalados de geração distribuída regional (BEZERRA, 2021).

No Brasil existem 4.277 usinas fotovoltaicas em operação e mais 4.063 micros usinas de até 3 kW (ANEEL, 2021).

Rosa e Gasparin (2016) descreveram o potencial de energia solar do Brasil e o índice de irradiação solar, que é bem melhor que em países da Europa. O litoral norte do Estado de Santa Catarina apresenta o menor índice de irradiação solar, que é de 1500 kWh/m² de irradiação global anual na superfície horizontal. Já o maior nível de irradiação está no norte do Estado da Bahia, com 2350 kWh/m² de irradiação. Sendo assim, a média diária de irradiação ao longo de um ano no território brasileiro varia de 4,1 a 6,5 kWh/m². A Alemanha possui uma incidência entre 900 a 1.250 kWh/m² ao ano. A média diária equivale entre 2,5 e 3,5 kWh/m² e a Espanha varia de 1.200 a 1.950 kWh/m² ao ano, correspondendo a 3,28 e 5,3 kWh/m² de média diária.

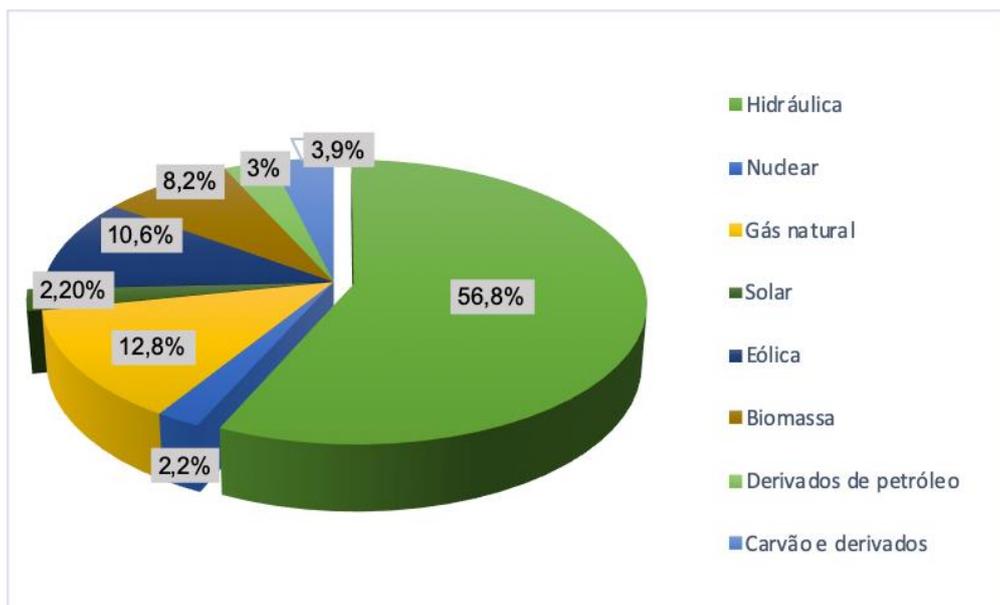
A matriz elétrica brasileira possui em sua maioria fontes renováveis de energia, e essas fontes renováveis, estão crescendo no Brasil. Pode-se verificar avanço das fontes renováveis com as Figuras 3 e 4. Petróleo e carvão aumentaram, hidráulica diminuiu, nuclear manteve a mesma porcentagem.

Figura 3 – Matriz elétrica brasileira de 2021, ano base 2020.



Fonte: Elaborado pela autora com dados do Balanço Energético Nacional – BEN (EPE, 2021).

Figura 4 – Matriz elétrica brasileira de 2022, ano base 2021.



Fonte: Elaborado pela autora, com dados do Balanço Energético Nacional – BEN (EPE, 2022).

2.5.2 Potencial solar no mundo

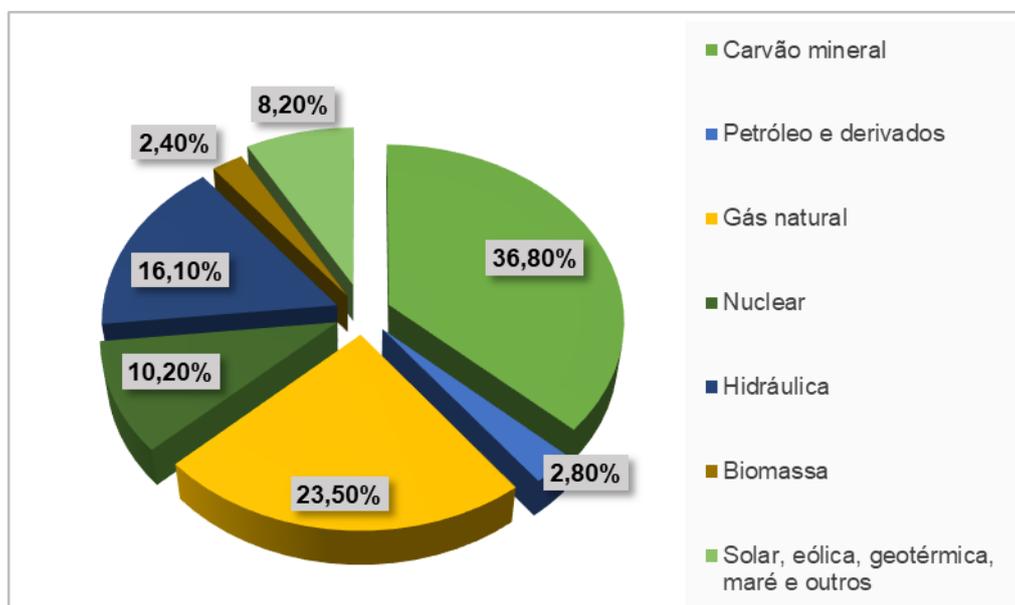
O setor de energias renováveis empregou 10,3 milhões de pessoas direta e indiretamente em 2017, e esses níveis de empregabilidade estão crescendo constantemente. Na China, o crescimento dos empregos no setor fotovoltaico solar foi estimado em 2,2 milhões, o que representa uma expansão de 13 % sobre o ano anterior. Desses, quase 1,4 milhões de pessoas desenvolveram atividades na etapa

de fabricação e cerca de 792.000 pessoas atuaram no segmento de construção e instalação, 25% a mais do que em 2016. No Brasil, em 2017, foram estimados cerca de 42 mil empregos, sendo 27.500 na fabricação e 14.500 na instalação (IRENA, 2018).

Em 2007 a capacidade fotovoltaica (FV) instalada foi de aproximadamente 2,26 GW. Cerca de (73 %) dessa instalação ocorreu na Alemanha e na Espanha. Contando com o Japão e os Estados Unidos, mais de 90% das instalações FV em 2007 ocorreram nestes quatro países (CGEE, 2009).

Em 2019 o percentual da energia solar no mundo era de 2,68 % e essa fonte vem crescendo exponencialmente. Entre os anos de 2012 e 2019 a capacidade instalada de energia fotovoltaica cresceu, em média, 30% ao ano. A China alcançou a liderança da geração fotovoltaica em 2015, ultrapassando a Alemanha, que era a líder em 2010 (BEZERRA, 2021). Na Figura 5 podemos observar a matriz elétrica Mundial de 2019.

Figura 5 – Matriz elétrica Mundial.



Fonte: Elaborado pela autora com dados da International Energy Agency – IEA (2019).

2.6 Legislação

Impactos relacionados à implantação das Usinas Fotovoltaicas - UFV devem ser considerados no licenciamento Ambiental. Entretanto, no Brasil não há legislação federal que estabeleça critérios para esse licenciamento. Alguns estados criaram legislações próprias, que divergem nas exigências e critérios adotados. Isso causa insegurança no processo de licenciamento, dificuldades para a aprovação dos estudos e provoca aumento de custos e prazos, podendo inviabilizar empreendimentos (PERAZZOLI; GOBBI; TIEPOLO, 2020).

O artigo de Perazzoli, Gobbi e Tiepolo (2020) trata das leis e critérios para o licenciamento ambiental das usinas fotovoltaicas (UFV). Essa forma de energia causa menos impactos ambientais do que as usinas termelétricas e hidroelétricas. No entanto, ainda geram impactos e isso deve ser considerado e avaliado no seu licenciamento ambiental. No Brasil não existe legislação federal para a instalação de UFV. Todavia, alguns estados criaram legislação específica para esses empreendimentos. Neste estudo, os autores identificaram legislações de 12 estados diferentes com intuito de propor critérios claros e objetivos para o licenciamento das UFV. Os autores agruparam os aspectos e impactos em 5 classes:

- uso do solo;
- saúde humana;
- habitat e vida selvagem;
- recursos hidrogeológicos;
- clima e gases de efeito estufa (GEE).

Após esse agrupamento, foram realizadas pesquisas bibliográficas a respeito de cada impacto e depois das pesquisas e análises realizadas o estudo propôs o enquadramento das UFV como sendo de baixo impacto ambiental, e o processo de licenciamento seria simplificado com emissão de licença prévia e de instalação em uma única etapa, menos em áreas de fragilidade ambiental. No que diz respeito ao potencial poluidor, deve-se levar em consideração a necessidade de supressão de vegetação nativa (e/ou APP) e a localização em área de fragilidade ambiental, tudo isso avaliado por meio de um estudo de impacto ambiental (EIA) e um relatório de impacto ambiental (RIMA).

Com relação ao descarte das placas existe no Brasil a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que incentiva a logística reversa para descarte de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE), evitando que módulos fotovoltaicos sejam descartados sem os cuidados necessários (BRASIL, 2010).

Para que os resíduos provenientes das instalações fotovoltaicas sejam reaproveitados é necessário que ocorra o desmanche dos módulos fotovoltaicos, nos módulos baseados em silício. Estruturas de alumínio e caixas de junção são desmontadas manualmente. Na sequência, ele é triturado e acontece a separação dos componentes. O módulo passa, então, por um tratamento térmico de alta temperatura, podendo ser recuperado em até 80% e a maior parte do material recuperado é o vidro (GIL e ISIDRO, 2019).

Nos Estados Unidos há uma legislação federal chamada Crédito de Investimento em Imposto (*Investment Tax Credit - ITC*). O possível fim do ITC levou os empresários, em 2009, a investirem em instalações de sistemas fotovoltaicos, utilizando os créditos existentes na bolsa. Isso fez com que as instalações fotovoltaicas nos Estados Unidos aumentassem muito. O país teve outras ações, como a Iniciativa Solar Americana (*Solar America Initiative - SAI*). Essas iniciativas aceleraram o desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica (IEA-PVSP, 2009).

O Japão apresentou um Programa de Disseminação de Sistemas FV Residenciais. A Alemanha apresentou um Programa Integrado de Energia e Clima - Lei de Fontes de Energia Renováveis. Estes países também investiram em Políticas Públicas para diminuir o uso das fontes fósseis, reduzindo os gases do efeito estufa, aumentando, assim, o uso de energias renováveis (IEA-PVSP, 2009).

2.7 Trabalhos sobre a avaliação do ciclo de vida

O artigo de Curran (2008) abordou a história da ACV, uma ferramenta de trabalho que vem se tornando muito importante em diversas empresas com ramos de atuação bem distintos. Com a leitura dele, foi possível perceber que uma análise de ACV bem estruturada, minuciosa, traz benefícios financeiros e comerciais para organização.

O artigo de Fukurozaki e Paschoal (2010) tratou do Tempo de Retorno de Investimento em Energia (*Energy Payback Time* - EPBT) e dos custos com a instalação do sistema. Os autores concluíram que o retorno (lucro) acontece depois do segundo ano, e que os custos para instalação estão diminuindo. A tecnologia para produção das células fotovoltaicas também está em evolução. O artigo de Fukurozaki e Paschoal (2010) proporcionou uma visão do tempo de retorno do investimento na energia solar e com essas informações consegue-se verificar em artigos mais recentes que isso mudou, de 2010 até os dias de hoje.

Sherwani, Usmani e Varun (2010), na revisão sobre Avaliação do Ciclo de Vida da energia solar, relataram que, por mais que o sol seja uma fonte renovável de energia, a geração de energia elétrica a partir dessa fonte também gera impactos. Na pesquisa os autores analisaram desde a extração do silício até a montagem do painel fotovoltaico para identificar os impactos dessa atividade. Os resultados mais relevantes no estudo foram relativos ao tempo de reembolso de energia (EPBT), que para painel amorfo foi de 2,5 a 3,2 anos, para o painel monocristalino foi de 3,2 a 15,5 anos e para o policristalino foi de 1,5 a 5,7 anos. Quanto às emissões de gases de efeito estufa (GEE) foram 15,6 a 50 (g-CO₂/kWh) para o painel amorfo, 44 a 280 (g-CO₂/kWh) para o monocristalino e 9,4 a 104 (g-CO₂/kWh) para o policristalino. Essas variações dependem de fatores como o tipo da célula solar, o ângulo do painel, a quantidade de radiação solar etc. Os autores concluíram que os sistemas fotovoltaicos são uma fonte promissora de energia, economia de recursos e redução dos gases de efeito estufa e que a melhoria na eficiência desses sistemas pode diminuir os impactos ambientais que eles ocasionam ao ambiente.

O trabalho de Carvalho, Mesquita e Rocio (2014) colaborou com o presente trabalho no que se refere à rota que o silício faz até chegar às células fotovoltaicas e aos processos de purificação desse componente. Os autores explicaram as características do silício, seus usos e o caminho até se tornarem uma célula fotovoltaica. Na pesquisa os autores observaram a situação do mercado global no que se refere a energia solar na Europa dos anos 2000 em diante. Este setor teve um crescimento rápido neste período. O Brasil é um dos maiores produtores de silício metalúrgico e o país concentra as maiores reservas de quartzo onde é encontrado o óxido de silício.

Holmes e Fletcher (2015) relataram que a fabricação das células solares requer recursos, principalmente no processo de conversão do silício. No entanto, existe um retorno de três a quatro anos usando a célula solar. Eles afirmaram ainda que o uso da energia do sol não causa poluição do ar nem causa danos à superfície da Terra.

O estudo de Barros, Piekarski e Salvador (2017), analisou a produção científica de artigos relacionados a avaliação do ciclo de vida e chegou a uma importante conclusão, que a sociedade está cada dia mais preocupada com as questões ambientais e no que é ecologicamente correto e mais econômico. A preocupação atual gira em torno da produção de energia mais limpa, de menos geração de CO₂, de um maior aproveitamento dos recursos naturais e um dos resultados obtidos no estudo revela que já estão sendo desenvolvidos estudos científicos internacionais de alto impacto, nos quais os países analisaram suas composições energéticas e estudos utilizando a ACV para melhorar a tomada de decisão nas indústrias e melhorar as políticas públicas.

O trabalho de Ramos, Durante e Callejas (2017), apresentou uma revisão sistemática da literatura sobre a geração de eletricidade abordando o ciclo de vida. Esse artigo trouxe à presente pesquisa embasamento, principalmente em relação à metodologia. Os autores abordaram a importância da ACV na fase de verificação dos impactos. Por meio dessa ferramenta é possível estudar cada impacto e como ele afeta o meio ambiente. Com a Avaliação do Ciclo de Vida é possível tomar decisões individuais relacionadas a cada impacto e medidas de sua mitigação.

O trabalho de Oliveira (2017) realizou uma ACV dos painéis fotovoltaicos com uma situação hipotética entre Brasil e China e outra exclusivamente na China. Isso mostrou a realidade do Brasil, que não possui indústrias brasileiras que realizam o processo de purificação do silício no grau solar. A autora não realizou uma ACV com todos os processos envolvidos, ou seja, do berço ao túmulo. No entanto, fez um estudo detalhado dos processos iniciais do ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos, desde a extração do silício até a montagem dos painéis em uma residência. Para realizar a análise a autora usou dois cenários. O Cenário 1 corresponde à produção do módulo FV na China e o Cenário 2, com a modelagem dividida entre a China e o Brasil. Estes cenários foram necessários, pois no Brasil ainda não há fábricas de purificação do silício de grau solar. O estudo levou em consideração sete categorias de impacto:

- Água;
- Energia;
- Aquecimento Global;
- Potencial de acidificação;
- Potencial de eutrofização;
- Potencial de toxicidade humana
- Potencial de depleção abiótica.

Quanto às etapas do processo, estas foram divididas em extração do silício, purificação do silício policristalino, produção do wafer multicristalino, produção da célula de silício e produção do módulo fotovoltaico. A unidade funcional foi uma residência com consumo de 330 kWh/mês. Entre os resultados foi possível observar que o módulo fotovoltaico foi o principal contribuinte para os impactos, porquê, além do conjunto de células solares, o módulo também é constituído por vidro e alumínio, que tem uma contribuição enorme nos impactos ambientais. Todavia, seus resultados comprovam que o cenário que envolve parte da produção no Brasil gera menos impactos devido à matriz energética do país ser mais limpa que a chinesa.

Oliveira (2017) percebeu que o vidro, o silício e o alumínio são os principais responsáveis para os impactos causados no ciclo de vida e que estes estão presentes, principalmente na construção do módulo, que representa o processo mais impactante. O trabalho de Oliveira (2017) possibilitou a identificação dos materiais que causam mais impactos no ciclo de vida da produção dos módulos. O autor, ao verificar esses materiais principais, recomendou a substituição deles nos módulos fotovoltaicos para que o processo de fabricação também ficasse mais limpo.

O artigo de Moreira Júnior e Souza (2018) traz um panorama da situação da energia solar no Brasil e seu potencial de crescimento comparado com a Alemanha. Os autores relataram que o Brasil tem uma uniformidade quanto ao potencial energético quando comparado aos países europeus, nesse caso, a Alemanha. No entanto, os incentivos governamentais na Alemanha a tornaram uma grande potência fotovoltaica. O objetivo dos autores foi mostrar que o Brasil é capaz de melhorar sua capacidade fotovoltaica e se tornar uma referência no assunto para o mundo.

Paiva (2018) desenvolveu um estudo no município de Sorriso – MT, com o objetivo de dimensionar um sistema fotovoltaico para uma granja que tinha um consumo anual de 227.981 kWh. O autor verificou a aplicabilidade de um sistema

fotovoltaico neste local, identificando os impactos ambientais gerados. No final do estudo foi constatada a viabilidade do sistema fotovoltaico para a granja. A instalação do sistema evita a emissão de 17,1 toneladas de CO₂ equivalente, anualmente. Os impactos ambientais mais relevantes foram identificados principalmente durante a fase de fabricação dos equipamentos do sistema fotovoltaico, quando há grande consumo de recursos naturais e emissão de poluentes.

Bezerra, Lira e Silva (2018) realizaram um estudo sobre a Avaliação do Ciclo de vida aplicada a painéis fotovoltaicos. Nesse estudo os autores consideraram todos os processos envolvendo a fabricação dos painéis com células policristalinas, entradas e saídas de massa e energia. Começaram na produção do silício de grau metalúrgico e terminaram no processo de montagem. Um dos resultados obtidos revela que em todo o processo de produção do painel solar há o uso intenso de fontes não renováveis, como combustíveis fósseis e energia nuclear. No entanto, as fontes renováveis de energia, como biomassa, eólica, solar e hidroelétricas aparecem em pequenas quantidades e apenas nos processos de produção do Wafer de silício e da célula fotovoltaica. Com relação aos impactos verificados observou-se a produção de dióxido de enxofre, óxido nítrico, compostos orgânicos voláteis, material particulado fino e metais pesados, como chumbo, níquel, estanho, cobre, cádmio, arsênio e mercúrio, componentes estes que podem causar toxicidade em humanos. No que se refere a eutrofização da água doce o processo que mais contribui para essa situação é a produção de silício metalúrgico, com 51%. Isso acontece devido as emissões de óxidos nitrosos que são liberados no processo de queima. Sobre o impacto da acidificação terrestre a produção do MG-Si contribui com 30%, pois possui emissões consideráveis de dióxido de enxofre. Com relação as mudanças climáticas os processos que possuem maior contribuição são a produção de MG-Si, dos módulos fotovoltaicos e a produção do Wafer, com 31%, 27% e 18%, respectivamente. No processo de produção de MG-Si estão monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos nitrosos e o uso de produtos fósseis como a coca de carvão bruto no fluxo energético. Ao final do estudo os autores concluíram que a expectativa de tempo de uso para o painel é de 25 anos, com um tempo de retorno de aproximadamente 3 anos. A energia produzida pelo painel por 22 anos estará livre de emissões.

Dupont, Koppelaar e Jeanmart (2020) estudaram o potencial global de energia solar disponível. Para realizar essa pesquisa criaram células de grade e dividiram o

globo terrestre em várias partes, chegando, aproximadamente ao valor de 5 milhões de células. Os autores precisaram levar em consideração fatores geográficos para saber o quanto de radiação solar está sendo produzida em determinada célula, restrições de recursos solares, ou seja, o quanto de fótons é capturado e transformado em energia elétrica, entre outros fatores. Com esse estudo foi possível chegar ao resultado de que a União Europeia fixa apenas 2% do potencial líquido global de energia solar.

Diante dessa revisão, o presente trabalho avaliou o ciclo de vida do processo de conversão de energia solar em elétrica, fizemos também uma avaliação econômica e financeira de uma instalação em uma residência na cidade de Maringá – PR para verificar os benefícios do uso dessa fonte renovável na geração de energia elétrica.

3 METODOLOGIA

Este capítulo abordará os métodos usados nesta pesquisa para chegar aos resultados. O item 3.1 trata do método para a pesquisa científica e descreve o método de revisão sistemática usado na avaliação do ciclo de vida. O item 3.2 diz respeito a pesquisa experimental aplicada no ano de 2020 na cidade de Maringá, para obter um panorama a respeito das empresas de energia solar da região. O item 3.3 aborda a definição e objetivo do escopo desse estudo. O Item 3.4 traz a análise do inventário nesse item é feita a descrição do estudo de caso. O Item 3.5 fala de como os impactos devem ser avaliados. O item 3.6 trata de como fazer a interpretação dos dados e o item 3.7 diz respeito às análises de investimento de capital que precisam ser feitas para avaliar o retorno de investimento da instalação da energia solar em uma residência.

3.1 O método

Gil (1994) apontou que “o objetivo fundamental da pesquisa é descobrir respostas para problemas, mediante o emprego de procedimentos científicos. ” O procedimento metodológico utilizado nesse estudo será a revisão sistemática,

juntamente com uma avaliação econômica e financeira da instalação de energia solar em uma residência em Maringá-PR.

Sampaio e Mancini (2007) descrevem revisão sistemática como: “forma de pesquisa que utiliza como fonte de dados da literatura sobre determinado tema e disponibiliza um resumo das evidências relacionadas a uma estratégia de intervenção específica, mediante a aplicação de métodos explícitos e sistematizados de busca.”

No presente trabalho foram coletados dados presentes em estudos já desenvolvidos no Brasil e no mundo. Técnicas de ACV serão utilizadas para avaliar esses dados, mensurar os impactos ocasionados nestes processos e analisar 4 categorias de impacto: mudanças climáticas; qualidade do ecossistema; saúde humana e recursos e propor maneiras de compensação ambiental.

Para alcançar o objetivo desta pesquisa, a escolha dos artigos e os aspectos a serem levados em consideração para essa escolha são primordiais.

A metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida vem sendo desenvolvida ao longo dos últimos 50 anos e continua em evolução. No Brasil, o Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia - IBICT é um dos grandes fomentadores do desenvolvimento da ACV desde o ano 2000. Ele é responsável por trazer os conteúdos de Avaliação do Ciclo de vida para a realidade brasileira disseminando o Pensamento do Ciclo de Vida e realizando outras ações. O IBICT é responsável pelo Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida – PBACV, que é responsável pelas ações relacionadas ao ciclo de vida em diversos setores da sociedade (IBICT, 2019).

Uma avaliação econômica e financeira da instalação da energia solar em uma residência também foi feita. A partir desses estudos pode-se verificar se é benéfico ou não investir em energia solar no Brasil.

3.2 Pesquisa experimental

Para obter dados para realizar um panorama para a presente pesquisa foi aplicado um questionário exploratório na cidade de Maringá, situada na região noroeste do Estado do Paraná. O primeiro passo foi buscar quantas e quais empresas trabalham com energia fotovoltaica no município. Com relação a esta questão foram encontradas 20 empresas. Destas, 18 têm sede em Maringá, uma tem funcionamento

online e uma tem sede em Londrina-PR. Foram feitas quatro perguntas simples a respeito da energia solar:

- a) Qual o material utilizado para fabricação das células solares fotovoltaicas?
- b) De onde vem a matéria prima para fabricação das placas?
- c) Qual painel solar é mais usado atualmente, monocristalino ou policristalino?
- d) Sobre o descarte das placas, existe alguma empresa no Brasil responsável por isso?

As perguntas foram feitas via telefone, e-mail e WhatsApp. Das 20 empresas, apenas 8 responderam. As respostas à pergunta (a) são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Respostas à pergunta (a) do questionário aplicado.

Empresa	Qual o material utilizado para fabricação das células solares fotovoltaicas?
3	Silício.
5	Materiais semicondutores (os tipos de células solares mais utilizadas no mundo são silício: cristalino, monocristalino, policristalino e amorfo).
8	São fabricadas em silício 100%
9	Silício + alumínio
11	Tipos de Silício utilizados: silício cristalino, monocristalino, policristalino e amorfo.
12	Silício (monocristalino; policristalino; amorfo; orgânico).
17	Silício
19	A maior parte é composta de silício + semicondutores

Fonte: Elaborada pelos autores com base na pesquisa exploratória aplicada.

As respostas à pergunta (b), que tem com relação à matéria prima para fabricação das placas, estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Respostas à pergunta (b) do questionário aplicado.

Empresa	De onde vem a matéria prima para fabricação das placas?
3	China.
5	Os maiores produtores são: China, Brasil, EUA, França e Noruega.
8	No Brasil não se fabrica nada com relação as placas. Os componentes vêm da China. Há montadoras de placas no Brasil, mas algumas fecharam
9	Majoria da China
11	Resposta incoerente com a questão.
12	O maior volume vem da China.

17	Distribuidor. Geralmente as placas são fabricadas na China.
19	95% da China e um pouco da Alemanha.

Fonte: Elaborada pelos autores com base na pesquisa exploratória aplicada.

As respostas à pergunta (c), que é sobre painéis monocristalinos e policristalinos, são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Resposta à pergunta (c) do questionário aplicado.

Empresa	Qual painel solar é mais usado atualmente, monocristalino ou policristalino?
3	Principalmente painéis monocristalinos, que são mais eficientes.
5	Policristalino.
8	A tendência agora é monocristalino. Pelas características técnicas o monocristalino está mais barato.
9	Monocristalino tem uma potência maior e melhor custo benefício.
11	Monocristalino, pois são mais eficientes. Normalmente precisa-se de uma área maior para produzir a mesma quantidade de energia com painéis policristalinos.
12	Policristalino, relação kWh/R\$. O monocristalino aumentou um pouco devido a indisponibilidade de Policristalino.
17	Monocristalino.
19	Monocristalino (mais barato e um pouco menos eficiente)

Fonte: Elaborada pelos autores com base na pesquisa exploratória aplicada.

A última pergunta do questionário foi com relação ao descarte das placas, se existe no Brasil alguma empresa responsável. Algumas das respostas foram: O fabricante recolhe, empresa multinacional chamada Veólia, empresa Euawhats recolhe.

Com esse questionário aplicado, foi possível observar que há muitas empresas de instalação de placas solares em Maringá, todavia o conhecimento sobre os materiais para fabricação das placas e seu destino depois do uso é mínimo ou inexistente.

A avaliação do ciclo de vida de produtos ou processos é de extrema importância para pessoas e empresas. Esse trabalho busca evidenciar os prós e os contras da instalação solar e quem sabe direcionar as empresas e o setor público nessa área.

3.3 Definição de objetivo e escopo

A definição do escopo é o momento do estudo de determinar as fronteiras, até onde se quer chegar, para quem são os resultados, o momento de estabelecer critérios, regras e os impactos a serem consideradas (IBICT, 2019).

O objetivo do estudo é avaliar o ciclo de vida do processo de conversão de energia solar em energia elétrica e fazer uma avaliação econômica e financeira. Um caso de uma instalação de placas solares em uma residência na cidade de Maringá-PR, localizada na região Sul do Brasil foi utilizado para analisar a viabilidade econômica e financeira da sua instalação.

3.4 Análise do inventário

A análise do inventário é a fase de coleta de dados e de reconhecimento dos fluxos de energia que entram e saem do processo (IBICT, 2019).

➤ **Dados da residência:**

A casa em questão consome aproximadamente 326 kWh/mês; a potência total do sistema a ser instalado é de 3,81 kW de geração média mensal: 474 kWh + 50 kWh (taxas mínimas); sobra mensal: 198 kWh; área necessária para instalação: 17,85 m²; massa: aproximadamente 13 kg/m. O sistema disponibilizará para uso um total de 524 kWh/mês. Estes 524 kWh/mês, se pagos à companhia de energia, custariam mensalmente o valor de R\$ 434,92, mais a contribuição de iluminação pública (taxa cobrada pela prefeitura).

➤ **Painéis Solares:**

Quantidade: 7 unidades; marca/modelo: Painel Solar DAH 545W – Monocristalino; garantia: 25 anos (eficiência até 80%) e 12 anos de fabricação.

➤ **Inversores:** quantidade: 1; marca/modelo: Growatt 3 kW– garantia: 10 anos.

➤ **Complementos:** cabo solar estruturas de fixação transformador (se necessário) Stringbox (se necessário).

➤ **Serviços:**

1. Dimensionamento/Projeto da Usina Solar;
2. Pagamento Taxa CREA-PR;
3. Solicitação de Acesso de Micro Geração junto a Companhia de Energia;
4. Instalação - Garantia de 12 meses;

5. Solicitação de Vistoria junto a Companhia de Energia;

6. Treinamento no uso do aplicativo de monitoramento.

- Investimento total com as placas e demais complementos para instalação: R\$ 15.500,00. Essa proposta de valor foi feita pela empresa Solução Energia Solar & Renováveis, em outubro de 2021, para uma residência localizada em Maringá PR.
- Para o cálculo da avaliação econômica acrescentou-se ao investimento total mais R\$ 5.300,00, divididos em 25 anos equivale a R\$ 212,00 mensais. Esse valor é referente a limpeza das placas. Para essa limpeza das placas acrescentamos a lavadora de painéis solares, que foi produzida e patenteada pela empresa: Tryrex Industria & Comércio LTDA, a empresa enviou essa proposta de valor via WhatsApp. A aquisição do equipamento de limpeza das placas é opcional, todavia as placas necessitam de uma limpeza anual ao menos, para manterem sua eficiência na geração de energia. A imagem da lavadora de painéis solares está na Figura 6.
- O investimento total então é de: R\$ 20.800,00.

A matéria prima para montagem dos painéis vem normalmente da China, chega nos portos e vem de caminhão até Maringá.

A produção de energia está relacionada à quantidade de radiação solar que incide nas placas. Isso depende da localização da instalação.

Figura 6: Lavadora de painéis Solares e seus componentes.



Fonte: Tryrex Industria & Comércio Ltda, 2020.

3.5 Avaliação dos Impactos

Impacto ambiental é qualquer atividade humana que altera a saúde, segurança e bem-estar da população, das atividades sociais e econômicas, da biota, das condições estéticas e sanitárias ambientais e da qualidade dos recursos ambientais, podendo ser positivo ou negativo (CONAMA, 1986).

Nessa fase converte-se os impactos identificados em valores. Por exemplo, pode-se usar kg de CO₂ equivalente para a categoria de aquecimento global (IBICT, 2019). A análise dos impactos foi feita com base nos artigos utilizados.

3.6 Interpretação

Fase da identificação de informações relevantes para o estudo, que é o momento de verificar os resultados e chegar a conclusões e recomendações (IBICT, 2019).

3.7 Análise de investimento de capital

No momento que se pensa em investir em um projeto, há necessidade de verificar a sua viabilidade econômica e financeira. O presente estudo tem como um dos objetivos a viabilidade econômica e financeira da instalação de um sistema de energia solar fotovoltaica. Para isso, foi necessário realizar os cálculos de análise financeira do tempo de retorno de investimento por meio do tempo de *payback*, VPL – Valor Presente Líquido e TIR – Taxa Interna de Retorno, com o objetivo de avaliar se o investimento em energia solar em residências é viável.

- *Payback*- Tempo de retorno do investimento, tempo necessário para recuperar o investimento realizado. Nesse caso, em quantos anos o custo da instalação de placa solar será pago.
- VPL – Valor Presente Líquido, indicador que analisa o valor presente do fluxo de caixa e nesse cálculo são considerados lançamentos positivos e negativos. Para calcular o VPL é necessário descontar a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de cada uma dessas entradas e saídas, pelo período de tempo daquele projeto.
- TMA - Taxa Mínima de Atratividade representa a taxa mínima na qual o cliente quer investir para ter um retorno mínimo do investimento.
- TIR – Taxa Interna de Retorno que representa a rentabilidade do fluxo de caixa. Se a TIR for maior que a TMA significa que o investimento é viável (SOARES, 2020).

A Taxa Mínima de Atratividade – TMA, utilizada nos cálculos foi de 7,27% correspondente a um rendimento de uma aplicação de caderneta de poupança dos últimos 12 meses, ou seja, de outubro de 2021 até outubro de 2022 (CNN, 2022).

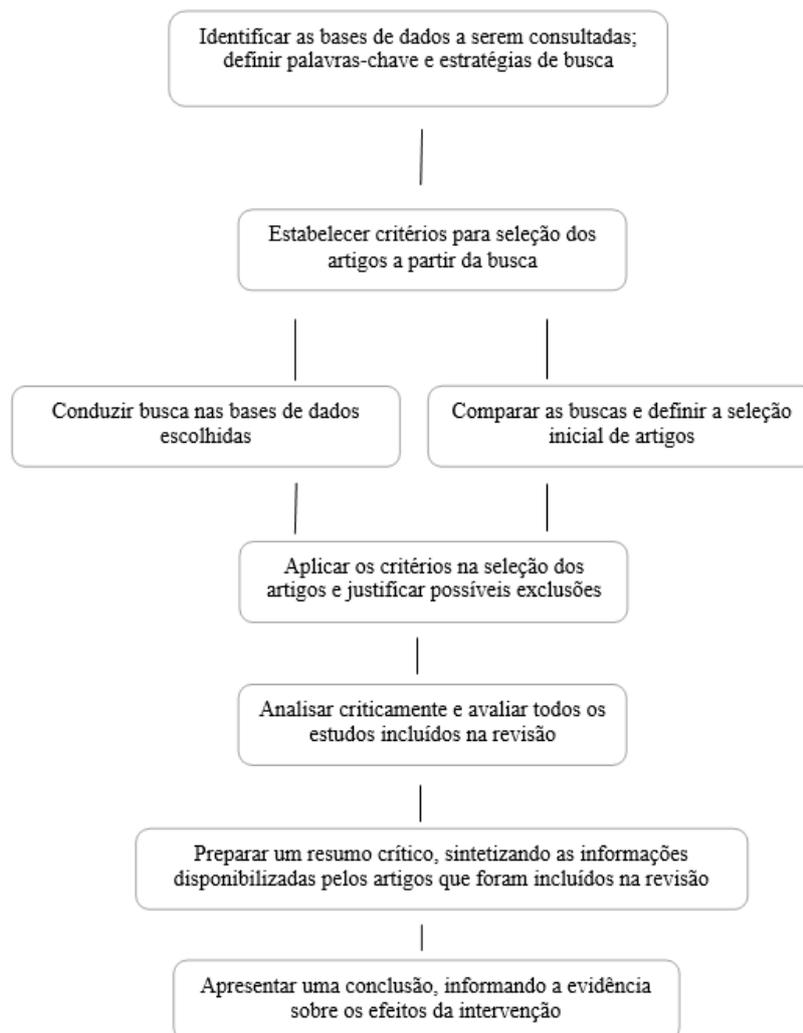
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os principais dados do estudo. O item 4.1 corresponde aos resultados e discussão da avaliação do ciclo de vida, e o item 4.2, diz respeito aos resultados e discussão da avaliação econômica e financeira da instalação da energia solar em uma residência.

4.1 Resultados e discussão da Avaliação do Ciclo de Vida.

As etapas para realização deste estudo estão dispostas na Figura 7.

Figura 7: Etapas da realização deste estudo de ACV.



Fonte: Elaborado pela autora, adaptado de Sampaio e Mancini (2007).

Com relação a escolha dos artigos foram usadas palavras chaves como: ciclo de vida, energia solar e ciclo de vida da energia solar. As buscas ocorreram no portal

periódicos da CAPES, nas bases de dados *Science Direct* e Scielo, no *The International Journal of Life Cycle Assessment*, em bibliotecas digitais de Universidades nacionais e internacionais e revistas.

Quanto aos critérios para escolha dos artigos foram estabelecidos os seguintes para a revisão bibliográfica:

- Se o trabalho analisado era sobre Avaliação do Ciclo de Vida;
- Se o trabalho analisado abordava a implementação da ACV.

Quanto aos critérios para escolha dos artigos nos itens de Metodologia e Resultados:

- Se o trabalho analisado continha métodos que explicassem os meios para a avaliação do ciclo de vida;
- Se os resultados encontrados discutiam os impactos ocasionados pela implantação da energia solar.

A principal vantagem da pesquisa bibliográfica é que o pesquisador tem acesso a muitos dados de todos os lugares possíveis (GIL,1994). Todavia, essa vantagem também gera um problema, que é o de organização e análise dos dados.

Os principais trabalhos consultados para embasar o desenvolvimento dessa pesquisa com relação a avaliação do ciclo de vida – ACV, para revisão bibliográfica e para a metodologia e resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Principais trabalhos utilizados.

Autores e ano publicação	Resumo
BEZERRA; LIRA e SILVA, 2018;	Realizaram uma pesquisa, sobre os impactos relacionados a geração de energia elétrica por meio da fonte solar. Concluíram que, os impactos mais relevantes ocorrem na fase da manufatura do silício.
CARVALHO; MESQUITA e ROCIO, 2014;	Os autores explicam na pesquisa sobre o silício, como material para fabricação das placas. Explicam sobre os processos de purificação e transformação desse composto.
	Os autores nesse artigo, elaboram um texto explicativo sobre a Avaliação do Ciclo de Vida –

CURRAN, 2008;	ACV. O texto explica a importância da ACV dentro de organizações e processos.
DUPONT; KOPPELAAR e JEANMART, 2020;	Estudaram o potencial global de energia solar disponível, os autores levaram em consideração fatores geográficos e com esse chegaram ao resultado de que a União Europeia fixa apenas 2% do potencial líquido global de energia solar.
FUKUROZAKI e PASCHOAL, 2010;	O artigo tratou do Tempo de Retorno de Investimento em Energia (<i>Energy Payback Time</i> - EPBT) e dos custos com a instalação do sistema. Os autores concluíram que o retorno, acontece depois do segundo ano, e que os custos para instalação estão diminuindo.
MOREIRA JÚNIOR e SOUZA, 2018;	O artigo aborda a situação da energia solar no Brasil e seu potencial de crescimento, comparado com a Alemanha. O Brasil tem uma uniformidade quanto ao potencial energético comparado a Alemanha, no entanto, os incentivos governamentais na Alemanha a tornaram uma grande potência fotovoltaica.
OLIVEIRA, 2017.	O trabalho de Oliveira (2017) possibilitou a identificação dos principais que causam mais impactos no ciclo de vida da produção dos módulos, esses materiais são: vidro sílicio e alumínio.
RAMOS; DURANTE e CALLEJAS, 2017;	Esse artigo trouxe à presente pesquisa embasamento em relação à metodologia. Os autores abordaram a importância da ACV, principalmente na fase de verificação dos impactos.
SHERWANI; USMANI e VARUN, 2010;	Os autores realizaram uma revisão sobre Avaliação do Ciclo de Vida da energia solar, os autores analisaram desde a extração do silício até a montagem do painel fotovoltaico, para identificar os impactos dessa atividade. Com a pesquisa concluíram que, os sistemas fotovoltaicos são uma fonte promissora de energia, economia de recursos e redução dos gases de efeito estufa e que a melhoria na

eficiência desses sistemas pode diminuir os impactos ambientais que eles ocasionam ao ambiente.

O artigo de Bezerra, Lira e Silva (2018) usou como método para gerar resultados o método ReCiPe, no software SimaPro8. Este é um método derivado do Eco-Indicator99, e é um dos principais métodos de avaliação de impacto do ciclo de vida. Os autores analisaram 9 etapas do ciclo de vida da energia fotovoltaica, que estão listados abaixo:

1. Produção do módulo fotovoltaico;
2. Produção do silício metalúrgico;
3. Produção da célula fotovoltaica;
4. Produção de silício de grau eletrônico, re;
5. Produção do silício misturado;
6. Produção de silício de grau eletrônico;
7. Produção do silício policristalino;
8. Produção do silício de grau solar;
9. Produção do wafer de silício.

A respeito dos impactos gerados no ciclo de vida da energia fotovoltaica, os resultados de Bezerra, Lira e Silva (2018) são os apresentados a seguir:

- **Ecotoxicidade:** a produção do módulo fotovoltaico gerou 49% dos impactos relacionados a ecotoxicidade marinha e também 49% dos impactos relacionados a ecotoxicidade de água doce. A produção de silício metalúrgico (MG-Si) resultou em 29% da geração dos impactos relacionados, tanto a ecotoxicidade marinha quanto para ecotoxicidade de água doce. A produção do módulo fotovoltaico e a produção do MG-Si foram os processos que mais geraram impactos para as categorias de ecotoxicidade marinha e ecotoxicidade de água doce. De acordo com os autores, esse resultado é devido ao uso de quantidades significativas de metais pesados.
- **Toxicidade Humana:** a produção do módulo fotovoltaico contribuiu para essa categoria de impacto em 47% e a produção do MG-Si contribuiu com 31%. Alguns dos compostos que contribuíram para esse impacto da toxicidade humana foram dióxido de enxofre, óxidos nitrosos, compostos orgânicos

voláteis, material particulado fino e metais pesados como chumbo, níquel, estanho, cobre, cádmio, arsênio e mercúrio.

- Eutrofização de água doce: a produção de silício metalúrgico contribui com 51% no processo de eutrofização de água doce. Isso ocorre porque durante o processo de sua produção são liberadas emissões de óxidos nitrosos no processo de queima.
- Depleção de recursos fósseis: a produção de MG-Si foi o processo que contribuiu com 50% do impacto relacionado a essa categoria. A produção do módulo fotovoltaico contribuiu com 20% do impacto e a produção do Wafer de silício contribuiu com 14%.
- Acidificação terrestre: o processo de produção do MG-Si contribuiu com 30% para acidificação terrestre. Esse processo possui emissões de dióxido de enxofre.
- Mudanças Climáticas: nessa categoria de impactos é possível verificar que existe a emissão de CO₂ para atmosfera, e a produção de silício metalúrgico (MG-Si) contribui para as mudanças climáticas com 31%, a produção do módulo fotovoltaicos contribui com 27% e a produção do Wafer contribui com 18%. O processo de manufatura de MG-Si possui a produção de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos nitrosos e o uso de muitos produtos fósseis, como a coca de carvão bruto no fluxo energético.

Quanto aos resultados esperados para os impactos de mudanças climáticas, observa-se que a geração de energia solar causa impacto na fase da manufatura do silício, e que depois de sua implantação em residências, indústrias ou parques solares esse impacto não ocorre mais. Isso porque a geração da energia depende da irradiação solar, que é uma fonte de energia limpa e renovável.

Quanto a qualidade do ecossistema: só é afetada no processo de manufatura do silício, pois ocorre liberação de gases dos compostos químicos pela queima dos materiais.

Com relação à saúde humana, o processo de transformação de energia solar em elétrica produz emissão de gases tóxicos para atmosfera, no processo de produção do silício. Todavia, essa quantidade não é significativa, a ponto de prejudicar a saúde humana.

No que se refere aos recursos ambientais, a produção de energia elétrica a partir da fonte solar traz apenas benefícios, pois o sol é um recurso renovável e a geração de eletricidade por meio dele não irá causar desabastecimento desse recurso. No entanto pode-se investir em estudos que desenvolvam outros meios de manufatura do silício, com o uso de energias renováveis nos processos de manufatura do silício, como o citado no trabalho de Bezerra, Lira e Silva (2018), onde as fontes renováveis de energia, como biomassa, eólica, solar e hidroelétricas foram utilizadas nos processos de produção do Wafer de silício e da célula fotovoltaica.

O trabalho de Moreira Júnior e Souza (2018) obteve como um de seus resultados que o nordeste brasileiro apresenta os maiores valores de irradiação solar global, e a menor variabilidade anual entre todas as regiões geográficas. Todavia, a Alemanha tem condições climáticas menos favoráveis que a região brasileira e por meio de tecnologias e mecanismos eficientes tem apresentado uma capacidade de aproveitamento da energia solar superior à do Brasil e é, atualmente, um país bem-sucedido no desenvolvimento desta fonte de energia.

4.2 Resultados e discussão da avaliação econômica e financeira

4.2.1 Construção do fluxo de caixa

Para o cálculo do fluxo de caixa foram considerados os seguintes dados:

- Investimento total de instalação: R\$ 15.500,00 em equipamentos (proposta de valor feita pela empresa Solução Energia Solar & Renováveis) e R\$ 5.300,00 em um equipamento para limpeza das placas: a lavadora de painéis solares, (produzida e patenteada pela empresa: Tryrex Industria & Comércio LTDA, proposta de valor enviada pela empresa via whatsapp), opcional. Todavia, as placas necessitam de uma limpeza anual, pelo menos, para manterem sua eficiência na geração de energia. Desse modo, se dividirmos o valor do equipamento por 25 anos daria um total de R\$ 212,00 reais por ano com gasto de manutenção e limpeza das placas. Totalizando o investimento de R\$ 20.800,00.

Cálculo:

Lavadora de painéis solares: R\$ 5.300,00 (proposta de valor da empresa: Tryrex Industria & Comércio LTDA).

Durabilidade dos painéis fotovoltaicos: 25 anos.

$$\frac{\text{R\$ 5.300,00}}{25 \text{ anos}} = \text{R\$ 212,00 por ano}$$

- O Gasto da família mensal é em média 326 kWh/mês (considerando a tarifa energética do primeiro semestre de 2022 no Paraná de, R\$ 0,83 centavos). O Valor pago mensalmente a concessionária de eletricidade é R\$ 270,58.
- A potência do sistema é de 3,81 kW.
- A geração média mensal será de 524 kWh, ou seja, irá gerar mais do que a residência consome. Para calcular o valor que a família pagaria a concessionária de energia elétrica do Paraná fez-se o seguinte cálculo:

Quantidade que o sistema irá gerar: 524 kWh;

Valor da tarifa de energia elétrica do primeiro semestre de 2022: R\$ 0,83 centavos.

$$524 \text{ kWh} \times \text{R\$ } 0,83 = \text{R\$ } 434,92 \text{ mensais de energia elétrica.}$$

Se a família fosse pagar à concessionária de energia elétrica o valor seria R\$ 434,92. Ou seja, com a instalação da energia solar a família deixará de pagar a concessionária R\$ 434,92 centavos mensais.

Com auxílio de uma planilha eletrônica foi calculada a viabilidade financeira do cenário proposto. A Tabela 5 demonstra os cálculos realizados para: fluxo de caixa, organização e manutenção, despesas, payback - EPBT e VPL.

Tabela 5: Cálculos.

Tempo	CAPEX	O&M	Despesas	Fluxo de caixa	Payback	VPL
Ano 0	-R\$ 20.800		-R\$ 20.800	-R\$ 20.800	-R\$ 20.800	-R\$ 20.800
Ano 1		197,63	197,63	R\$ 5.510	-R\$ 15.290	-R\$ 15.290
Ano 2		184,24	184,24	R\$ 5.510	-R\$ 9.779	-R\$ 9.779
Ano 3		171,75	171,75	R\$ 5.510	-R\$ 4.269	-R\$ 4.269
Ano 4		160,11	160,11	R\$ 5.510	R\$ 1.242	R\$ 1.242
Ano 5		149,26	149,26	R\$ 5.510	R\$ 6.752	R\$ 6.752
Ano 6		139,14	139,14	R\$ 5.510	R\$ 12.262	R\$ 12.262
Ano 7		129,71	129,71	R\$ 5.510	R\$ 17.773	R\$ 17.773
Ano 8		120,92	120,92	R\$ 5.510	R\$ 23.283	R\$ 23.283
Ano 9		112,73	112,73	R\$ 5.510	R\$ 28.794	R\$ 28.794
Ano10		105,09	105,09	R\$ 5.510	R\$ 34.304	R\$ 34.304
Ano11		97,97	97,97	R\$ 5.510	R\$ 39.814	R\$ 39.814
Ano12		91,33	91,33	R\$ 5.510	R\$ 45.325	R\$ 45.325
Ano13		85,14	85,14	R\$ 5.510	R\$ 50.835	R\$ 50.835
Ano14		79,37	79,37	R\$ 5.510	R\$ 56.346	R\$ 56.346
Ano15		73,99	73,99	R\$ 5.510	R\$ 61.856	R\$ 61.856
Ano16		68,97	68,97	R\$ 5.510	R\$ 67.366	R\$ 67.366
Ano17		64,30	64,30	R\$ 5.510	R\$ 72.877	R\$ 72.877
Ano18		59,94	59,94	R\$ 5.510	R\$ 78.387	R\$ 78.387
Ano19		55,88	55,88	R\$ 5.510	R\$ 83.898	R\$ 83.898
Ano20		52,09	52,09	R\$ 5.510	R\$ 89.408	R\$ 89.408
Ano21		48,56	48,56	R\$ 5.510	R\$ 94.918	R\$ 94.918
Ano22		45,27	45,27	R\$ 5.510	R\$ 100.429	R\$ 100.429
Ano23		42,20	42,20	R\$ 5.510	R\$ 105.939	R\$ 105.939
Ano24		39,34	39,34	R\$ 5.510	R\$ 111.450	R\$ 111.450
Ano25		36,68	36,68	R\$ 5.510	R\$ 116.960	R\$ 116.960

Fonte: Elaborado pela autora.

Os cálculos do fluxo de caixa para energia fotovoltaica devem ser feitos e analisados, para que o cliente, ao instalar este serviço, tenha clareza dos gastos que terá com a instalação e funcionamento da energia solar, e a economia que ela pode trazer. O investimento inicial para esta residência, ao instalar energia solar será de R\$ 20.800,00, incluindo a manutenção com limpeza por 25 anos e os custos de manutenção e limpeza.

É possível verificar na Tabela 6 que o tempo de retorno do investimento, se torna positivo do terceiro para o quarto ano de instalação das placas. Isso significa que seu investimento em energia solar começará a dar lucro em menos de quatro anos.

O artigo de Fukurozaki e Paschoal (2010), também tratou do Tempo de Retorno de Investimento em Energia (*Energy Payback Time* - EPBT) e dos custos com a instalação do sistema.

Tabela 6: Tempo de Retorno de Investimento em Energia (*Energy Payback Time* - EPBT).

Tempo	Fluxo de caixa	Payback	VPL
Ano 0	-R\$ 20.800	-R\$ 20.800	-R\$ 20.800
Ano 1	R\$ 5.510	-R\$ 15.290	-R\$ 15.290
Ano 2	R\$ 5.510	-R\$ 9.779	-R\$ 9.779
Ano 3	R\$ 5.510	-R\$ 4.269	-R\$ 4.269
Ano 4	R\$ 5.510	R\$ 1.242	R\$ 1.242
Ano 5	R\$ 5.510	R\$ 6.752	R\$ 6.752
Ano 6	R\$ 5.510	R\$ 12.262	R\$ 12.262
Ano 7	R\$ 5.510	R\$ 17.773	R\$ 17.773
Ano 8	R\$ 5.510	R\$ 23.283	R\$ 23.283
Ano 9	R\$ 5.510	R\$ 28.794	R\$ 28.794
Ano 10	R\$ 5.510	R\$ 34.304	R\$ 34.304
Ano 11	R\$ 5.510	R\$ 39.814	R\$ 39.814
Ano 12	R\$ 5.510	R\$ 45.325	R\$ 45.325
Ano 13	R\$ 5.510	R\$ 50.835	R\$ 50.835
Ano 14	R\$ 5.510	R\$ 56.346	R\$ 56.346
Ano 15	R\$ 5.510	R\$ 61.856	R\$ 61.856
Ano 16	R\$ 5.510	R\$ 67.366	R\$ 67.366
Ano 17	R\$ 5.510	R\$ 72.877	R\$ 72.877
Ano 18	R\$ 5.510	R\$ 78.387	R\$ 78.387
Ano 19	R\$ 5.510	R\$ 83.898	R\$ 83.898
Ano 20	R\$ 5.510	R\$ 89.408	R\$ 89.408
Ano 21	R\$ 5.510	R\$ 94.918	R\$ 94.918
Ano 22	R\$ 5.510	R\$ 100.429	R\$ 100.429
Ano 23	R\$ 5.510	R\$ 105.939	R\$ 105.939
Ano 24	R\$ 5.510	R\$ 111.450	R\$ 111.450
Ano 25	R\$ 5.510	R\$ 116.960	R\$ 116.960

Fonte: Elaborado pela autora.

Com relação ao Valor Presente Líquido – VPL, que é o cálculo realizado para conhecer o valor atual do retorno do investimento, a tabela 7 apresenta o VPL de R\$ 40.930,44, que é um resultado positivo, o que significa que o investimento realizado para a instalação das placas solares na residência é lucrativo.

A TMA, utilizada nos cálculos foi de 7,27%, correspondente a um rendimento de uma aplicação de caderneta de poupança dos últimos 12 meses (CNN, 2022).

Tabela 7: Resultado dos cálculos para VPL.

Tempo	Fluxo de Caixa	Tempo	Fluxo de Caixa
Ano 1	-R\$ 20.800	Ano 8	R\$ 5.510,40
Ano 2	R\$ 5.510,40	Ano 9	R\$ 5.510,40
Ano 3	R\$ 5.510,40	Ano 10	R\$ 5.510,40
Ano 4	R\$ 5.510,40	Ano 11	R\$ 5.510,40
Ano 5	R\$ 5.510,40	Ano 12	R\$ 5.510,40
Ano 6	R\$ 5.510,40	Ano 13	R\$ 5.510,40

Ano 7	R\$ 5.510,40	Ano 14	R\$ 5.510,40
Ano 15	R\$ 5.510,40	Ano 22	R\$ 5.510,40
Ano 16	R\$ 5.510,40	Ano 23	R\$ 5.510,40
Ano 17	R\$ 5.510,40	Ano 24	R\$ 5.510,40
Ano 18	R\$ 5.510,40	Ano 25	R\$ 5.510,40
Ano 19	R\$ 5.510,40		
Ano 20	R\$ 5.510,40	TMA	7,27%
Ano 21	R\$ 5.510,40		
		VPL	R\$ 40.930,44

Fonte: Elaborado pela autora.

Com relação a TIR que é a taxa interna de retorno, o resultado foi de 26%, maior que a TMA de 7,27%, isso significa que o investimento é viável.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido um estudo sobre a aplicação de técnicas de ACV na geração de energia elétrica a partir da energia solar fotovoltaica. Foram verificados e discutidos diversos trabalhos, na área de Avaliação do ciclo de vida e uma avaliação econômica e financeira da instalação de placas solares em uma residência na cidade de Maringá foi realizada.

Com relação a avaliação do ciclo de vida, identificamos que, a geração de eletricidade a partir da fonte solar gera impactos, dentre eles a emissão de CO₂ para atmosfera. Todavia, esses impactos ocorrem principalmente na fase de extração e manufatura do silício e da fabricação dos painéis. Apesar dos impactos identificados, na fase de extração e manufatura do silício, o uso dessa fonte renovável é viável, visto que, depois da instalação das placas solares, não há mais impactos causados ao meio ambiente, como ocorre com as fontes de energia provenientes dos combustíveis fósseis.

Além disso, com a avaliação econômica e financeira, observa-se que, o tempo de retorno do investimento ocorre entre o terceiro e o quarto ano após a instalação das placas e a energia solar é rentável financeiramente ao consumidor, e o investimento em placas solares é viável.

Diante do exposto e após a Avaliação do Ciclo de Vida e a Avaliação Econômica realizada, constata-se que, a geração de energia elétrica a partir da fonte solar é benéfica

ao meio ambiente e rentável ao usuário. Todavia, para mais detalhes quanto aos impactos ocorridos, principalmente na extração e manufatura do silício, o uso de um software de ACV é necessário.

A energia solar é uma fonte limpa e renovável, que causa baixos prejuízos ambientais. Após sua instalação nos locais desejados, é uma saída para a crise energética atual e, principalmente, uma solução viável e rentável para o futuro, pois a energia proveniente dessa fonte renovável está disponível em abundância no planeta.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL - SIGA**. ANEEL, 2021. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 25 jan. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.10p.

ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIAS SOLAR. ABES, 2017. Disponível em:< <http://abes-dn.org.br/?p=1848>>. Acesso em: 04 jul. 2021.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL – BEN 2021, ano base 2020. BEM 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>. Acesso em: 09 out. 2022.

BARROS, M. V.; PIEKARSKI, C. M.; SALVADOR, R. 6th International Workshop Advances in Cleaner Production Academic Work. “Ten Years Working Together For a Sustainable Future”. 6. 2017. Avaliação de Ciclo de Vida de sistemas de geração de energia elétrica mais limpa: uma análise de produção científica **Downloads**. 10 p. São Paulo, 2017.

BEZERRA F. D. Caderno setorial. Energia Solar. Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste – ETENE. **Banco do nordeste**. Ano 6, Nº 174, 2021.

BEZERRA, J. L.; LIRA, M. A. T.; SILVA, E. A. Avaliação do ciclo de vida aplicada a painéis fotovoltaicos. **Congresso Brasileiro de Energia Solar**. Gramado - RS, V. 7, 2018.

BOREM, L. E. P. L. M.; VASCONCELOS, R. A. **Análise do Impacto da Geração Distribuída na Estabilidade Transitória**. 2016. 121 f. Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Energia - Universidade de Brasília. Brasília - DF, 2016.

BRASIL. Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Lei no 12.305** de 2 de agosto de 2010. Presidência da República. Departamento da Casa Civil. Brasília - DF, 2010.

BURSZTYN M. Energia solar e desenvolvimento sustentável no Semiárido: o desafio da integração de políticas públicas, 2020. Estudos Avançados. **Revista USP**. São Paulo - SP, v. 34 p. 98, 2020.

CARVALHO P. S. L.; MESQUITA P. P. D.; ROCIO M. A. R. A rota metalúrgica de produção de silício grau solar: uma oportunidade para a indústria brasileira? Biblioteca digital. Metalurgia. **Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES. Setorial**. 40, p. 205-234, 2014.

CASTRO, J. B.; MONTINI, A. Forecasting residential electricity consumption in Brazil: application of the ARX model. **Future Studies Research Journal: Trends and Strategies**, v. 2, n. 2, art. 13, p. 3-16, 2010.

CNN. BRASIL. **Taxa mínima de atratividade**. 2022. Disponível em: www.cnnbrasil.com.br. Acesso em: 10 de out. 2022.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução Nº 001**. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. Ministério do Meio Ambiente – MMA. Licenciamento Ambiental, normas e procedimentos de 23 de janeiro de 1986.

CURRAN M. A. Life-Cycle Assessment. Environmental Protection Agency. Human Ecology Cincinnati, OH, USA. **Elsevier**, 2008.

DUPONT, E.; KOPPELAAR, R.; JEANMART, H. 2020. Global available solar energy under physical and energy return on investment constraints. **Applied Energy**. **Elsevier**. v. 257, p. 17, 2020.

ELY F. e SWART J. W. Energia solar fotovoltaica de terceira geração. **Espaço IEEE**. O Setor Elétrico, p. 138, 2014. Disponível em: <<http://www.ieee.org.br/wp-content/uploads/2014/05/energia-solar-fotovoltaica-terceira-geracao.pdf>>. Acesso em: 31 jan. 2022.

Energia Solar - Princípio e Aplicações. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica – CRESESB. CEPEL Eletrobras. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2021.

Energy-Transition-Investment-Trends. Bloomberg NEF - BNEF. Free-Summary, 2021. Disponível em: <<https://about.bnef.com/energy-transition-investment/#toc-download>>. Acesso em: 01-jul.-2021.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética] Balanço Energético Nacional (BEN) 2021: Ano base 2020. Disponível em <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>>.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética] Balanço Energético Nacional (BEN) 2022: Ano base 2021. Disponível em <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>>.

FUKUROZAKI, S. H.; PASCHOAL, J. O. A. Avaliação do Ciclo de Vida de Tecnologias Fotovoltaicas: Panorama atual do Tempo de Retorno de Investimento em Energia e Custos Associados. **III Congresso Brasileiro de Energia Solar**. Belém, 2010.

GALDINO M. A. E.; LIMA J. H. G.; RIBEIRO C. M.; SERRA E. T. O Contexto das energias renováveis no Brasil. **Energias Renováveis**. **Revista Da Direng**, 2000.

GIL, A.C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo, 4 ed. 1994.

GIL, L. e ISIDRO, J. O fim da vida dos módulos fotovoltaicos. Dossier sobre solar fotovoltaico. **Renováveis Magazine**, 2019.

HOLMES A.; FLETCHER N. Da luz solar à eletricidade. **Australian Academy of Science**. 2015. Disponível em: <<https://www.science.org.au/curious/technology-future/solar-pv>>. Acesso em: 02 maio 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA - IBICT. **Avaliação de Ciclo de Vida**, 2019. Disponível em: <<http://acv.ibict.br/acv/o-que-e-o-acv/>> . Acesso em: 26 out. 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. Trends in Photovoltaic Applications: Survey Report of Selected Countries Between 1992 and 2008. **Photovoltaic Power Systems Programme - PVPS**. Report IEA-PVPS, 2009. Disponível em: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/tr_2008.pdf. Acesso em: 02 maio 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. World Energy Outlook 2019, IEA, Paris, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>. Acesso em: 10 out. 2022.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY – IRENA. Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects. **A Global Energy Transformation: paper, International Renewable Energy Agency**. Abu Dhabi, 2019.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY – IRENA. **Renewable Energy and Jobs, Annual Review**. Abu Dhabi, 2018.

JEAN, J.; BROWN, P.R.; JAFFE, R.L.; BUONASSISI, T.; BULOVIC. V. Energy & Environmental Science 8, 1200, 2015.

JOÃO, P. E. T. V. **Análise técnico-econômica de uma minigeração fotovoltaica em um galpão logístico em contagem MG**. Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, abr. 2016.

JUNGBLUTH N.; SCHOLTEN M. W.-. Life Cycle Assessment of Photovoltaics: Update ofecoinvent data **Article**. Jan. 2008.

LELEK, L.; KULCZYCKA J.; LEWANDOWSKA A.; ZAREBSKA J. Life cycle assessment of energy generation in Poland. **The international journal of life cycle assessment**, v. 21, n. 1, p. 1-14, 2016.

LIBONI L. B.; CEZARINO L. O.; Impactos sociais e ambientais da indústria da cana-de-açúcar. **Future studies research journal**. São Paulo, v. 4, n. 1, p. 202 - 230, 2012.

MARKVART, T.; CASTAÑER, L. Practical handbook of photovoltaics: Fundamentals and applications. **Elsevier Science**. Reino Unido, 2003. Disponível em:

<https://inis.iaea.org/search/searchsinglerecord.aspx?recordsFor=SingleRecord&RN=34028832>. Acesso em: 07 jun. 2022.

MOREIRA JÚNIOR. O.; SOUZA. C. C. **Aproveitamento fotovoltaico, análise comparativa entre Brasil e Alemanha**. Interações. Campo Grande – MS. v. 21. n. 2. p. 379-387. 2018.

MUNTASSER, M. A.; BARA, M.F. QUADRI, H.A. EL-TARABELSI, R. LA-AZEBI, I.F. Photovoltaic marketing in developing countries. Applied Energy. **Elsevier Science Ltd** v. 65(1-4), p. 67–72, abr. 2000.

OLIVEIRA, A. S. **Avaliação de Impactos Ambientais do Módulo Fotovoltaico: Produção e Uso Como Fonte de Energia Elétrica**. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia – Dpto. de Engenharia Mecânica, 2017.

Organización Latinoamericana de Energía - OLADE. Curso de la Generación Distribuída. **SABA System**, 2011. Disponível em: <http://elearning.olade.org/> . Acesso em: 23 maio 2022.

PACHECO F. Energias Renováveis: breves conceitos. Economia em Destaque. **Conjuntura e Planejamento – C&P**. Salvador: SEI, n.149, p.4-11, 2006.

PAIVA, M. L. **Avaliação da aplicabilidade de um sistema fotovoltaico conectado à rede em uma granja de aves no estado do Mato Grosso e seus impactos ambientais**. 2018. Dissertação de Mestrado em ciência e tecnologia ambiental. Universidade tecnológica federal do Paraná (UTFPR). Curitiba, 2018.

PERAZZOLI, D. L.; GOBBI, E. F.; TIEPOLO, G. M. Proposta de critérios norteadores e requisitos mínimos para licenciamento ambiental de usinas fotovoltaicas no Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**. v. 25, n. 2, p. 333-344, mar. 2020.

PORTAL SOLAR. Passo a Passo da Fabricação do Painel Solar. [entre 2014 e 2022]. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/passa-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html#ancora2>. Acesso em: 08 mar. 2022.

Poupança deixa de perder para inflação após dois anos. CNN BRASIL - Cable News Network Brasil, out. 2022. Disponível em: Acesso em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/business/poupanca-deixa-de-perder-para-inflacao-apos-dois-anos/>>. Acesso em: 29 out. 2022.

Produção de Silício Grau Solar no Brasil, nota técnica, Estudo de Prospectivo em Energia Solar. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos Ciência, Tecnologia e Inovação – CGEE. Brasília - DF, 2009.

RAMOS L. A.; DURANTE L. C.; CALLEJAS I. J. A.; Geração de eletricidade abordando o ciclo de vida: uma revisão sistemática sob a ótica da sustentabilidade ambiental. **E&S - Engineering and Science**, v. 1, n. 6, p. 1 - 15, 2017.

RANGEL, M. S.; BORGES, P. B.; SANTOS, I. F. S. Análise comparativa de custos e tarifas de energias renováveis no Brasil. Universidade Federal do Paraná. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**. V. 5, n. 3, p. 267-277. Minas Gerais, 2016.

Relatório final 2021. BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL - BEN 2021, ano base 2020. BEN 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>. Acesso em: 09 out. 2022.

Relatório final 2022. BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL - BEN 2022, ano base 2021. BEN 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>. Acesso em: 09 out. 2022.

ROSA A. R. O.; GASPARIN F. P. Panorama da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil. **Revista Brasileira de Energia Solar**. Volume VII, ano 7, n 2. p. 140 – 147, 2016.

SAFARIAN, J; TRANELL, G; TANGSTAD, M, Processes for upgrading metallurgical grade silicon to solar grade silicon. Energy Procedia. **Elsevier**, v.20, p. 88-97, 2012.

SAMPAIO R. F; MANCINI M. C. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. **Revista brasileira de fisioterapia**. V. 11, n. 1, p. 83-89. São Carlos, 2006.

SCOLLA M. **AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA: UMA ANÁLISE SOB A ÓTICA DE FATORES AMBIENTAIS. 2020**. Projeto de pesquisa apresentado como requisito para aprovação de Trabalho de Conclusão de curso de Engenharia Elétrica da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul, 2020.

SHERWANI, A.F.; USMANI, J.A.; VARUN. Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: a review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**. V. 14, n. 1, p. 540-544, jan. 2010.

SILVA NETO B. Limitação da emissão de gases de efeito estufa, desmatamento e crescimento econômico no Brasil: uma análise prospectiva. **Revista do Desenvolvimento Regional – Faccat**. V. 18, n. 4. Taquara/RS - dez. 2021.

Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa, SEEG - Observatório do Clima, 2022. Disponível em: <http://seeg.eco.br> Acesso em 24 out. 2022.

SOARES T. **Análise de Viabilidade Financeira de SFV: Entenda o que é Payback, TIR e VPL**. Investimento, 2020. Disponível em: <https://institutosolar.com/viabilidade-financeira-de-sfv/>. Acesso em: 29 out. 2022.

The role of nuclear power in clean Energy systems. International Energy Agency – IEA. Paris, 2019. Acesso em: 24 set. 2022. Disponível em: www.iea.org/reports/nuclear-power-in-a-clean-energy-system.

TRYREX INDUSTRIA & COMÉRCIO LTDA. 2020 Disponível em:
<<https://www.tryrex.com.br/sobre/>>. Acesso em: 31 out. 2022.

TURNEY, D.; FTHENAKIS, V. Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants. *Renewable and Sustainable. Energy Reviews*. V. 15, p. 3261-3270, 2011. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.023>. Acesso em: 25 Set. 2022.

UNITED NATIONS.UN. **17goal to transform our world**: Goal 7: Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all, 2016. Disponível em:
<<http://www.un.org/sustainabledevelopment/energy/>>. Acesso em: 27 out. 2021.

VALKILA, N. e SAARI, A. Urgent need for new approach to energy policy: The case of Finland. *Renewable and Sustainable, Energy Reviews*. V. 14, p. 2068–2076, 2010.