

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JOSIAS DE BAIROS

CUSTOS ENERGÉTICOS NA PRODUÇÃO, MANUFATURA E OPERAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: UMA ANÁLISE COMPARATIVA DE SUSTENTABILIDADE FRENTE AO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO
2019

JOSIAS DE BAIRROS

CUSTOS ENERGÉTICOS NA PRODUÇÃO, MANUFATURA E OPERAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: UMA ANÁLISE COMPARATIVA DE SUSTENTABILIDADE FRENTE AO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco.

Orientador: Prof. Dr. Fernando José Avancini Schenatto.

Coorientador: Prof. Dr. Marcos Paulo Belançon.

PATO BRANCO

2019

TERMO DE APROVAÇÃO

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado **CUSTOS ENERGÉTICOS NA PRODUÇÃO, MANUFATURA E OPERAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: UMA ANÁLISE COMPARATIVA DE SUSTENTABILIDADE FRENTE AO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA**, do acadêmico **Josias de Bairros** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **239** de 2019.

Fizeram parte da banca os professores:

Dr. Fernando José Avancini Schenatto

Dr. Ricardo Vasques de Oliveira

Me. César Augusto Portolann

A Ata de Defesa assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

DEDICATÓRIA

Aos meus pais.

Aos meus professores.

Aos meus amigos.

Aos que de alguma forma contribuem para
formação de pessoas com senso crítico e
que acreditam em um mundo melhor
através do conhecimento.

EPÍGRAFE

A vida é uma peça de teatro que não permite ensaios. Por isso, cante, chore, dance, ria e viva intensamente, antes que a cortina se feche e a peça termine sem aplausos.

Charlie Chaplin

AGRADECIMENTOS

Agradeço pela condição e o privilégio de obter uma formação que não se limita apenas a natureza técnica, mas que forma e prepara pessoas para vida.

Aos meus pais Genêncio e Terezinha, que sempre acreditaram fielmente nas minhas decisões e que tornaram possível a realização de minha graduação.

Ao meu orientador, Fernando Schenatto e coorientador, Marcos Paulo Belançon que acreditaram na minha proposta e que, com maestria, me conduziram na realização deste trabalho com muita atenção e compreensão.

Aos amigos que fiz na universidade e aos que eu trouxe comigo ao longo da vida.

E a todos que contribuíram de forma significativa na minha vida. Sou grato.

RESUMO

BAIRROS, Josias. **Custos energéticos na produção, manufatura e operação de painéis fotovoltaicos: Uma análise comparativa de sustentabilidade frente ao potencial de geração de energia.** 2019. Monografia. (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019.

A eletricidade é fundamental em qualquer sociedade atual, que por sua vez, torna-se cada vez mais dependente de energia elétrica. Essa dependência crescente por energia demanda cada vez mais dos sistemas elétricos de geração, fomentando estudos sobre alternativas renováveis que venham a substituir a matriz energética atual, que em sua maioria é de fontes fósseis.

Apesar de ser considerada uma geração de energia “limpa” em sua operação, a tecnologia fotovoltaica, durante seu ciclo de vida, consome uma grande quantidade de energia, e conseqüentemente emite gases do efeito estufa (GEE) durante os estágios de produção e manufatura dos painéis. Para obter maior precisão dos custos energéticos e ambientais envolvidos nesta tecnologia, devemos considerar processos de produção de materiais, fabricação, montagem de módulos, transporte de materiais, instalação, manutenção, descarte ou até mesmo reciclagem.

Este trabalho tem como objetivo examinar a sustentabilidade e o desempenho dos sistemas de geração de eletricidade baseados em painéis fotovoltaicos de silício cristalino, realizando uma revisão completa dos estudos de avaliação do ciclo de vida (ACV), a fim de estimar os custos energéticos envolvidos e o tempo de retorno da energia investida, considerando os processos existentes, desde a produção até o fim da vida útil.

Palavras-chave: Energia Solar, Fotovoltaica, Pannel solar, Extração, Mineração, Recurso, Manufatura, Módulos, Processos, Reciclagem, Tecnologia, Ciclo de vida, Fim de vida, Limpeza, Manutenção, Operação, Energia embutida, Energia incorporada, Retorno de energia, Tempo de retorno de energia.

ABSTRACT

BAIRROS, Josias. **Energy costs in the production, manufacture and operation of photovoltaic panels: A comparative sustainability analysis against the potential of power generation.** 2019. Monograph. (Course Completion Paper) - Electrical Engineering Course, Federal Technological University of Paraná. Pato Branco, 2019.

Electricity is fundamental in any current society, which in turn becomes increasingly dependent on electricity. This growing dependence on energy is increasingly in demand from electric generation systems, fostering studies on renewable alternatives that will replace the current energy matrix, which is hostile from fossil sources.

Although considered a “clean” power generation in its operation, photovoltaic technology, during its life cycle, consumes a large amount of energy, and consequently emits greenhouse gases (GHG) during the stages of production and manufacture of panels. For the most accurate energy and environmental costs involved in this technology, we must consider material production, fabrication, module assembly, material transportation, installation, maintenance, disposal or even recycling processes.

This paper aims to examine the sustainability and performance of crystalline silicon photovoltaic panel based electricity generation systems, performing a complete review of life cycle assessment (LCA) studies in order to estimate the energy costs involved and the return time of the invested energy, considering the existing processes, from production to the end of the useful life.

Keywords: Solar energy, Photovoltaic, Solar Panel, Extraction, Mining, Resource, Manufacturing, Modules, Processes, Recycling, Technology, Life cycle, End-of-life, Cleaning, Maintenance, Operation, Embedded energy, Embodied energy, Energy return, Energy payback time.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Matriz mundial de energia elétrica – 2018.....	19
Figura 2 -	Matriz brasileira de energia elétrica – 2019.....	20
Figura 3 -	Crescimento mundial de três fontes renováveis (1990 – 2016) ...	22
Figura 4 -	Mina de quartzo para produção de silício fotovoltaico.....	43
Figura 5 -	Fluxograma de produção de painéis FV (mono-Si) e (multi-Si)	44
Figura 6 -	Estruturas cristalinas em células de silício.....	46
Figura 7 -	Processos do silício para produção de painéis FV.....	48
Figura 8 -	Representação das camadas de um painel fotovoltaico.....	49
Figura 9 -	Perfil de irradiação solar na Espanha.....	51
Figura 10 -	Resultados e classificação dos artigos retornados.....	63
Figura 11 -	Fluxograma de classificação do portfólio integral.....	64
Figura 12 -	Representatividade dos artigos por número de citações.....	68
Figura 13 -	Representatividade dos periódicos por número de artigos.....	69
Figura 14 -	Crescimento das tecnologias renováveis, 2000 – 2018.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-	Relação de características de um módulo PV.....	30
Tabela 2 -	Fatores de conversão para unidades de energia elétrica.....	37
Tabela 3 -	Requisitos de metais por tipo de instalação.....	42
Tabela 4 -	EPBTs de sistemas em larga escala e distribuídos.....	54
Tabela 5 -	Comparação de custos utilizando a reciclagem.....	55
Tabela 6 -	Energia demanda por etapa de fabricação.....	56
Tabela 7 -	Custos por etapa na manufatura de módulos (mono-Si)	57
Tabela 8 -	Custos por etapa na manufatura de módulos (multi-Si)	57
Tabela 9 -	Resultados de EPBT para (mono-Si)	58
Tabela 10 -	Resultados de EPBT para (multi-Si)	59
Tabela 11 -	Classificação de eixos e palavras-chave.....	62
Tabela 12 -	Descrição dos artigos do portfólio integral.....	65
Tabela 13 -	Classificação dos autores por relevância.....	70
Tabela 14 -	Parâmetros médios da LCA, publicados entre 2009 e 2014.....	73
Tabela 15 -	Parâmetros de EPBT para tecnologia Mono-Si.....	74
Tabela 16 -	Parâmetros de EPBT para tecnologia Multi-Si.....	75

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BOS	Balance of System
BP	British Petroleum
CED	Cumulative Energy Demand
EG-Si	Silício de Grau Eletrônico
EPBT	Energy Playback Time
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EVA	Etil-Vinil Acetato
FV	Fotovoltaico
IEA	International Energy Agency
ITRPV	International Technology Roadmap for Photovoltaic
Kg	Quilograma
KW	Quilowatt
KWh	Quilowatt-hora
KWp	Quilowatt-pico
LCA	Life Cycle Assessment
LE	Larga Escala
m ²	Metro Quadrado
MG-Si	Silício de Grau Metalúrgico
MJ _{el}	Megajoule-Elétrico
MJ _{prim}	Megajoule-Primário
mm ²	Milímetro Quadrado
MME	Ministério de Minas e Energia
mono-Si	Silício Monocristalino
multi-Si	Silício Multicristalino
MWp	Megawatt-pico
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
SoG-Si	Silício de Grau Solar
µm	Micro-metro
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Wp	Watt-pico

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVOS	24
1.1.1 Objetivo Geral	24
1.1.2 Objetivos Específicos	24
1.2 JUSTIFICATIVA	25
1.3 ESTRUTURA	27
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	28
2.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (LCA)	28
2.2 TEMPO DE RETORNO DE ENERGIA (EPBT)	31
2.2.1 Demanda Acumulada de Energia (CED)	33
2.2.2 Energia de Saída do Sistema (E_{out})	35
2.3 SALDO ENERGÉTICO DA TECNOLOGIA (E_{liq})	38
2.3.1 Saldo Ambiental da Tecnologia e Emissões de (GEE)	39
2.4 ESTÁGIOS E PROCESSOS PRODUTIVOS DA TECNOLOGIA	40
2.4.1 Produção de Matéria-prima	41
2.4.2 Manufatura	43
2.4.2.2 Etapas e processos	45
2.4.2.3 Purificação e cristalização do silício	46
2.4.2.4 Corte de lingotes e produção de células solares	47
2.4.2.5 Montagem	49
2.4.3 Operação	50
2.5 ENERGIA INCORPORADA NO PRODUTO	53
3. METODOLOGIA DA PESQUISA	60
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	60
3.2 ETAPAS ADOTADAS PARA A ELABORAÇÃO DA PESQUISA	61

3.2.1 Revisão Sistemática da Literatura	61
3.2.2 Definição de Eixos e Palavras-chave	62
3.2.3 Combinações Entre Eixos e Palavras-chave	62
3.2.4 Busca nas Bases de Dados	63
3.2.5 Seleção dos Artigos	64
3.3 INSTRUMENTOS DE COLETA E ANÁLISE DE DADOS	66
3.3.1 Discussão do Portfólio	66
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
4.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	67
4.1.1 Classificação de Artigos por Número de Citações	68
4.1.2 Representatividade nos Periódicos	69
4.1.3 Autores de Maior Relevância	70
4.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	71
5. CONCLUSÃO	77
REFERÊNCIAS	79

1. INTRODUÇÃO

A eletricidade é um dos bens de consumo mais fundamentais em qualquer sociedade atual. Diretamente ligada à qualidade de vida e ao desenvolvimento econômico, a energia elétrica vem sendo consumida cada vez mais nas indústrias, residências e no setor de transporte. Dispositivos que utilizam eletricidade para o seu funcionamento vêm crescendo na medida em que os avanços tecnológicos se tornam mais expressivos.

Equipamentos elétricos que possibilitam uma maior produtividade e melhores condições de trabalho, assim como, os que atuam nos setores de refrigeração, saneamento e saúde, ainda que demandem uma geração de energia elétrica expressiva, propiciam melhorias diretamente relacionadas à expectativa de vida humana. Estas melhorias, ainda que em menor grau, também são percebidas com o uso de eletroeletrônicos ligados aos setores de entretenimento, lazer e na informação, proporcionando conforto e bem-estar.

Estes são exemplos de alguns entre os inúmeros benefícios que o uso da eletricidade proporciona, entretanto, essa dependência crescente por energia demanda cada vez mais dos sistemas elétricos de geração, uma vez que o consumo nos setores comerciais, governamentais e *per capita* vem aumentando significativamente ao longo dos anos (IEA, 2018).

Dados e estatísticas relacionados ao consumo mundial de energia em suas diferentes formas podem ser obtidos por meio do site da International Energy Agency (IEA), sediada em Paris e ligada à Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE). A agência contribui para o desenvolvimento de estudos ligados aos diversos tipos de energia.

Apesar dos benefícios que a eletricidade proporciona, existe uma real preocupação relacionada ao impacto que este desenvolvimento vem causando. De acordo com IEA (2018), o mundo possui uma matriz energética composta, principalmente, por fontes não renováveis, como o carvão, gás natural e óleo diesel, sendo o carvão a que possui maior representatividade. Desse modo, o volume de CO₂ emitido na atmosfera, causado pela crescente demanda global por energia elétrica, vem causando um impacto significativo sobre o meio ambiente, o que torna o desafio de substituir essas fontes fósseis por fontes mais eficientes e renováveis uma necessidade importante para resolução deste problema.

A Figura 1 ilustra a participação das fontes mais significativas na geração mundial de eletricidade.

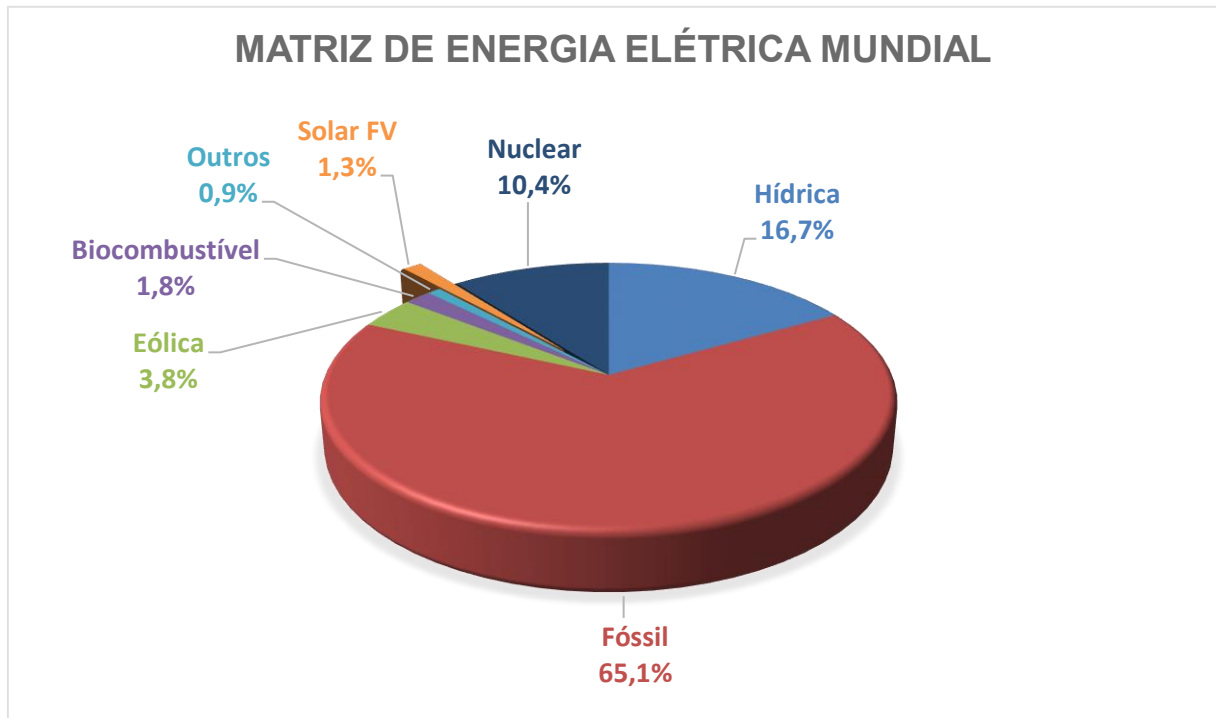


Figura 1 - Matriz mundial de energia elétrica – 2018.
 Fonte: Adaptado de IEA (2018).

Estatísticas apontam que, além das energias eólica e solar FV, o gás natural mesmo se tratado de um recurso não renovável, está inserido entre as fontes de energia de baixo carbono que estão substituindo as fontes fósseis mais poluentes. Essa transição vem se tornando significativa frente ao petróleo e o carvão, e ainda que o gás natural tenha um papel importante na matriz energética, reduzindo as emissões de CO₂, o recurso não é suficiente e em algum momento no futuro precisará ser substituído (BP, 2019).

A Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, além de desempenhar diversas atividades para garantir que o setor elétrico se desenvolva com equilíbrio e em benefício da sociedade, fornece dados atualizados relacionados ao setor elétrico no Brasil.

Por fatores geológicos de disponibilidade de recursos energéticos para a produção de eletricidade, o Brasil possui uma matriz elétrica com características bem diferentes da mundial. Segundo dados da ANEEL(2019), sua matriz é composta principalmente por fontes renováveis, uma vez que a maior parte da energia elétrica ge-

rada é produzida a partir de usinas hidrelétricas; seguidas por termoelétricas à biomassa, aerogeradores e a solar FV que, por sua vez, vem ganhando espaço, contribuindo em uma parcela cada vez maior na matriz energética.

Ainda que esta distribuição seja por conta da disponibilidade de recursos hídricos, não se pode ignorar o fato de que estes recursos são finitos e que no futuro o sistema dependerá de diferentes fontes geradoras. Nesse contexto, considerando que se pode produzir energia elétrica de diferentes formas a partir do sol, como por exemplo com usinas solares térmicas que produzem calor para gerar eletricidade, podemos tratar da energia solar como sendo “virtualmente infinita”, fortalecendo o argumento de que a geração de energia elétrica a partir de uma tecnologia que depende do sol como fonte primária, pode ser a solução para o desenvolvimento sustentável entre as alternativas disponíveis.

A Figura 2 demonstra a representatividade significativa das fontes renováveis na matriz elétrica brasileira.

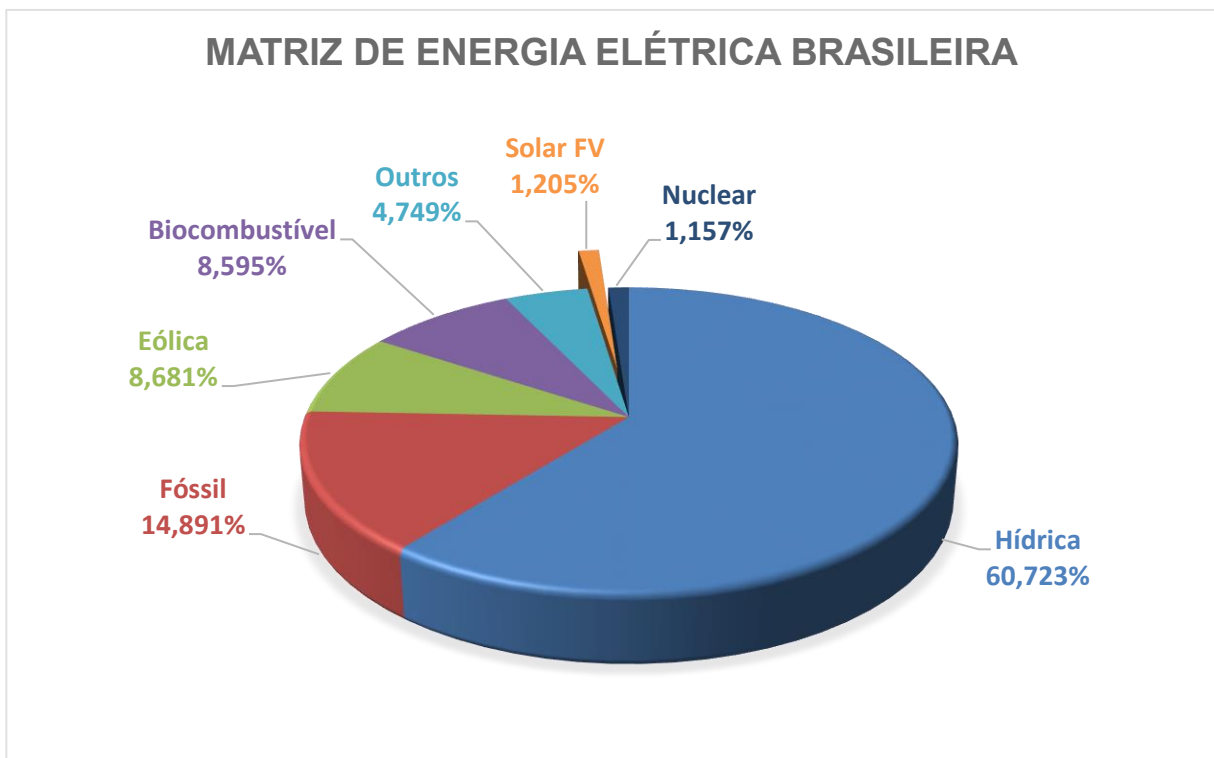


Figura 2 - Matriz brasileira de energia elétrica – 2019.
 Fonte: Adaptado de ANEEL (2019).

No cenário nacional e internacional, a busca por fontes energéticas de natureza renovável está em ascensão. Estima-se que no Brasil a potência instalada a partir de painéis FV, irá representar 4% da matriz energética já em 2024, alcançando 7.000 MW, sem contar com a geração distribuída.

Espera-se que a tecnologia de painéis solares desempenhe um papel essencial nos futuros sistemas de geração de energia, com o propósito de diminuir o consumo de combustíveis fósseis, minimizando o impacto ambiental e contribuindo de forma mais significativa na matriz energética (MME, 2016). “As energias renováveis devem penetrar no sistema energético global mais rapidamente do que qualquer combustível da história” (BP, 2019).

A necessidade de se acompanhar o desenvolvimento, juntamente com a preocupação em diminuir a emissão do CO₂ na atmosfera, vem se mostrando a iniciativa chave para uma possível resolução do problema, justificando cada vez mais a realização de estudos sobre eficiência e sustentabilidade relacionados às tecnologias sustentáveis.

Dentre as fontes renováveis disponíveis, destaca-se a FV, pelo maior e acentuado crescimento nos últimos anos. Atualmente a planta FV mundial representa aproximadamente 400 GW de potência instalada, tendo quadruplicado de sua capacidade nos últimos 5 anos. Este rápido crescimento se dá pela queda nos custos de produção, à medida em que se diminui a curva de aprendizagem relacionada à tecnologia. Para efeito de comparação, destaca-se que a tecnologia FV cresce aproximadamente com um fator correspondente ao dobro do fator de crescimento da eólica, indicando cenários de dominância no futuro (BP, 2019).

De acordo com projeções futuras a respeito da capacidade FV entre os estudos publicados, a alternativa pela tecnologia FV tem sido sugerida como a principal candidata para assumir uma parte mais significativa da demanda global, alcançando níveis de terawatt (TW) em potência instalada até meados do século. Entretanto, existe a preocupação de que este potencial possa ser limitado pela disponibilidade de elementos e materiais químicos específicos para produção em grande escala, uma vez que a tecnologia FV tem uma dependência significativamente maior por metais raros do que as termoelétricas, que dependem principalmente de combustíveis fósseis (DAVIDSSON; HÖÖK, 2017).

Para obter sucesso no desafio de diminuir a emissão de gases nocivos no planeta, bem como suprir a crescente demanda por energia elétrica a partir de fontes que não utilizam combustíveis fósseis, é necessário analisar com bastante cuidado todas as alternativas, avaliando seus impactos a curto, médio e longo prazo, de maneira a garantir que a transição energética seja bem-sucedida. Sendo assim, a escolha que representará a melhor relação entre eficiência e sustentabilidade, depende de

estudos específicos e aprofundados sobre cada uma das alternativas renováveis disponíveis.

Além de ser considerada uma forte candidata para substituir fontes convencionais dentre as alternativas, a escolha em se desenvolver este estudo sobre a tecnologia FV vem da observação do seu crescimento na geração centralizada, bem como a progressiva popularização da tecnologia em residências nos últimos anos.

A Figura 3 ilustra o crescimento ao longo de 26 anos de três fontes renováveis e quantifica a sua representatividade na matriz mundial de energia elétrica, a partir de dados brutos da (IEA, 2018).

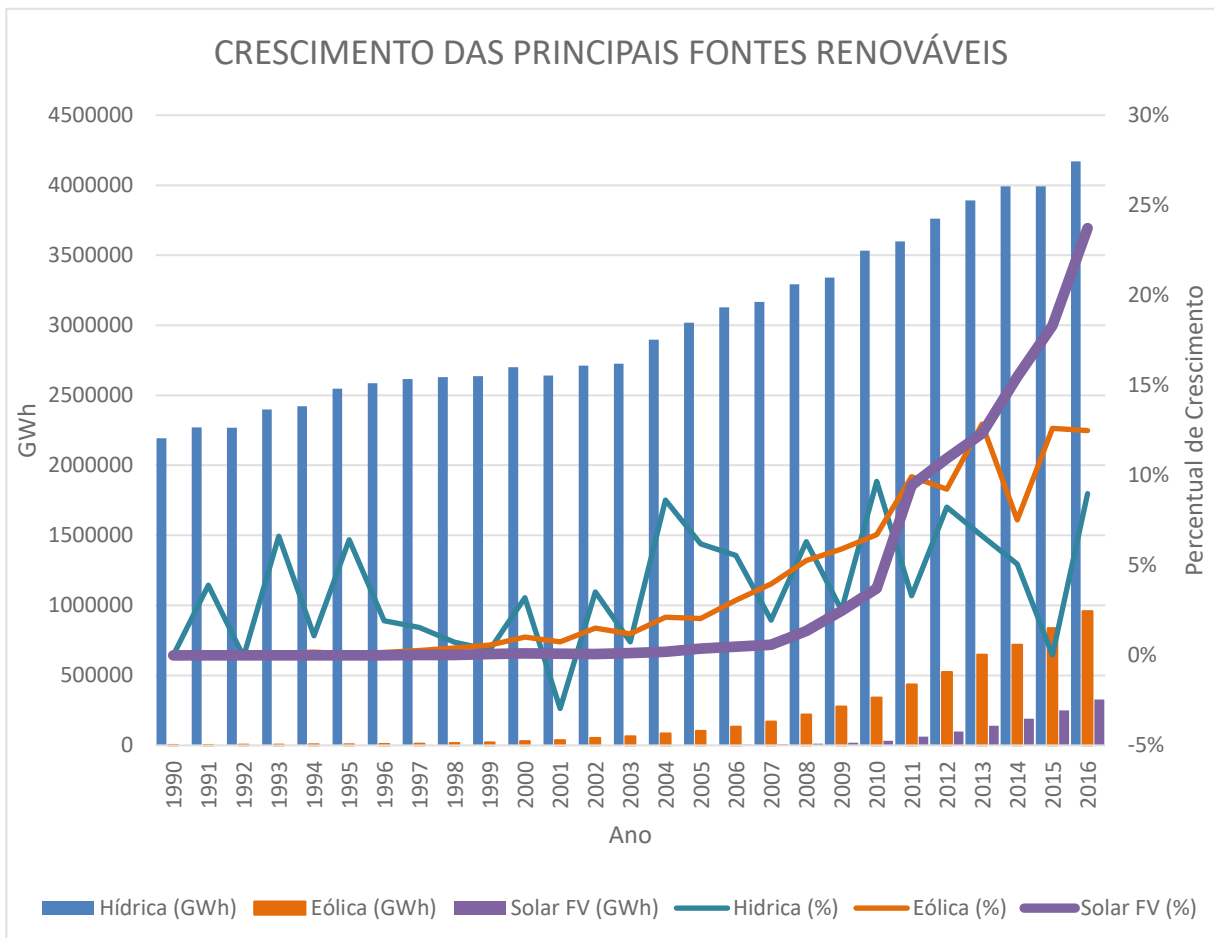


Figura 3 - Crescimento mundial de três fontes renováveis 1990 – 2016.
Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar o crescimento exponencial da geração solar fotovoltaica nos últimos anos, sendo o maior frente à hídrica e à eólica; entretanto, constata-se que, apesar da ascensão acentuada da tecnologia, a mesma representa a menor parcela de geração, em termos de potência, perante as outras fontes.

Incertezas relacionadas à tecnologia FV a respeito de viabilidade, saldo energético e os reais impactos ambientais decorrentes da produção dos painéis fomentam estudos cada vez mais específicos dentro da área. Muito embora os processos de fabricação se tornem cada vez mais eficientes, por se tratar de uma tecnologia que envolve muitos elementos químicos, principalmente metais, a produção dos painéis se torna dependente da extração destes componentes da natureza (ITRPV, 2019).

O silício cristalino, assim como índio, gálio, selênio, telúrio e cádmio para filmes finos, são exemplos dos principais elementos utilizados na produção dos diferentes tipos de painéis fotovoltaicos comercializados atualmente. Entretanto, o estudo tem a finalidade de explorar a tecnologia dos painéis de silício monocristalino e multicristalino, uma vez, que destacam-se pela maior comercialização atual e por se tratar do elemento de maior abundância na natureza entre os materiais requisitados na produção da tecnologia (DAVIDSSON; HÖÖK, 2017).

Atualmente, a principal fonte de energia utilizada na produção do vidro, alumínio, plásticos e silício, que são os principais elementos que compõem uma placa solar, é proveniente de combustíveis fósseis. Sendo assim, além dos gases nocivos emitidos na atmosfera, existe a preocupação de que no futuro a extração da matéria prima poderá gerar um custo energético elevado e crescente, podendo se tornar inviável, uma vez que os elementos se tornam cada vez mais escassos e de difícil acesso (DAVIDSSON; HÖÖK, 2017).

Considerando o cenário energético atual e os indicativos de prosperidade da geração FV, destaca-se não só a relevância em se considerar hipóteses de indisponibilidade de materiais, como também, conhecer mais sobre as particularidades desta tecnologia, a fim de identificar parâmetros fundamentais, que proporcionarão maiores chances de sucesso em tomadas de decisões no que diz respeito à projeções futuras, considerando os custos energéticos decorridos da produção em escala e o potencial de geração que a tecnologia poderá representar.

1.1 OBJETIVOS

Apresentar o objetivo geral definido para a realização do trabalho, assim como, detalhar os objetivos específicos.

1.1.1 Objetivo Geral

Apresentar uma análise do balanço energético de painéis fotovoltaicos que utilizam a tecnologia de silício monocristalino e multicristalino, considerando os custos energéticos envolvidos na produção, manufatura e operação desses dispositivos frente ao potencial de geração ao longo de sua vida útil.

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Especificar tecnologias, materiais, equipamentos e processos envolvidos na produção de sistemas de geração de energia, a partir de painéis solares;
2. Identificar custos energéticos envolvidos na produção de materiais que compõem um painel fotovoltaico de silício cristalino;
3. Identificar os custos energéticos que envolvem o processo de manufatura de painéis fotovoltaicos;
4. Relacionar os custos de energia decorrentes da operação dos painéis fotovoltaicos, identificando o tempo de retorno energético;
5. Especificar o potencial de geração de energia elétrica dos painéis fotovoltaicos, considerando o ciclo de vida do produto;
6. Discutir o potencial de sustentabilidade da geração FV, considerando o saldo energético, e a eficiência de sistemas fotovoltaicos.

1.2 JUSTIFICATIVA

O preço da energia é um fator de fundamental importância no desenvolvimento de países, uma vez que contribui de forma proporcional no seu crescimento econômico. O custo da energia, pode ser uma importante fonte de receita do governo através de tributação ou desenvolvimento de recursos domésticos (SHARMA; TIWARI, 2013).

Estudos relacionados à tecnologia fotovoltaica que analisam sustentabilidade e potencial de geração frente ao cenário energético atual, passam a ter maior relevância à medida em que os processos de produção e manufatura se tornam mais eficientes. Devido a necessidade atual de diminuir a dependência global por combustíveis fósseis, a engenharia tem como desafio, superar algumas desvantagens dos sistemas de geração que exploram a energia solar e que ainda não são capazes de suprir a demanda de energia primária, cujo as principais barreiras são (CUCCHIELLA; DADAMO, 2012):

1. Custos de produção não competitivos se comparados com tecnologias que utilizam combustíveis fósseis;
2. A baixa eficiência do sistema não permite uma significativa produção de eletricidade;
3. A geração intermitente diminui a confiabilidade da produção, essencial em uma rede de distribuição;
4. O prazo relativamente alto para recuperação do investimento atrelado com o tempo de vida útil do sistema.

Embora o sistema fotovoltaico seja amplamente reconhecido como uma tecnologia limpa para geração de eletricidade, alguns estudos argumentam que a energia consumida ao longo do ciclo de vida, particularmente nos processos de produção e manufatura, pode ser maior que a produção em todo ciclo de vida.

A importância de um estudo que descreva e compare o balanço energético da tecnologia FV, lado a outras de natureza renovável, se dá pela necessidade atual de se optar por uma alternativa energética que virá a incrementar e substituir fontes dependentes de combustível fóssil, de modo a minimizar os impactos causados à natureza, com a finalidade de analisar as possibilidades que a geração FV tem para

acompanhar o desenvolvimento tecnológico e econômico no mundo. Logo, com base nas tendências que apontam o crescimento da geração FV, a análise do balanço energético, considerando os custos envolvidos na produção, manufatura e operação dos painéis solares, especificamente os que utilizam o silício como principal matéria prima, contribui para o desenvolvimento no setor de geração de energia elétrica, especificamente dentre as alternativas renováveis.

Além do perfil de incidência solar em uma determinada região, estabelecer parâmetros de custo energético provenientes da extração de recursos naturais utilizados no decorrer do processo de implementação de um sistema fotovoltaico, é de fundamental relevância para amparar conclusões a respeito de sustentabilidade dessas tecnologias, considerando seu potencial de geração energético frente à energia consumida ao longo da cadeia de valor, proveniente de outras fontes, não renováveis.

Com base em estudos e dados presentes na bibliografia científica e em relatórios técnicos da indústria, a obtenção do saldo de energia, traz a possibilidade de estimar o tempo de retorno energético, ou seja, o tempo que o painel precisará ficar em operação para gerar o equivalente a toda energia consumida decorrente de seu processo de produção, manufatura e operação.

Desse modo, os resultados do estudo, tornam possível fazer projeções a respeito da matriz energética, bem como fazer estimativas, de forma quantitativa e qualitativa, sobre a potência de geração futura necessária para a produção dos painéis FV que virão a substituir e assumir a crescente demanda de carga mundial.

Entre as mídias de comunicação, como rádio e televisão, a tecnologia de geração fotovoltaica é apresentada como uma alternativa “limpa” e sustentável, sem considerar os custos energéticos e os fatores impactantes presentes no início de seu processo produtivo. Nesse sentido, o estudo contribui para esclarecer conceitos sobre energia limpa e renovável, assim como estima perspectivas futuras de investimento nesta tecnologia, possibilitando obter indicativos que apontam a direção em que essas tecnologias deverão avançar.

Com tudo, o estudo poder servir de base para informações que virão a preceder investimentos, subsidiando estratégias e políticas tecnológicas direcionadas a implementação da tecnologia solar FV em larga escala.

1.3 ESTRUTURA

O trabalho foi estruturado e dividido em 5 capítulos. No capítulo introdutório foram descritos os objetivos geral e específico, procurando atingir, além da justificativa de sua realização a caracterização do problema.

O capítulo 2 apresenta um estudo sobre as duas principais tecnologias de sistemas FV comercializadas no mundo, bem como, apresenta métodos de análise do ciclo de vida e cálculos para determinar o tempo de retorno energético do produto. Em vista disso, foram detalhados os estágios de produção, manufatura e operação dos módulos fotovoltaicos, descrevendo os processos e identificando os custos energéticos provenientes de cada etapa.

No capítulo 3 é descrito as diretrizes metodológicas utilizadas para a seleção da bibliografia composta de artigos científicos que serviram de referência para realização deste trabalho, bem como as etapas da pesquisa, critérios de seleção, coleta dos trabalhos e análise dos dados.

Os resultados e discussões, bem como a análise bibliométrica, são apresentados no capítulo 4, onde é apresentada a harmonização dos dados coletados através da revisão bibliográfica e discutido a respeito do impacto energético da tecnologia FV, assim como sobre os desafios a serem superados.

Finalmente no capítulo 5 é feita a abordagem das conclusões relacionadas à tecnologia fotovoltaica no âmbito do potencial de geração, tempo de retorno energético, eficiência e sustentabilidade, sugerindo trabalhos futuros relacionados a tecnologias renováveis.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (LCA)

A avaliação do ciclo de vida, do inglês *Life cycle assessment* (LCA) é usada como técnica para comparar e analisar o consumo de energia e os impactos ambientais associados ao desenvolvimento de produtos e serviços necessários durante a vida útil dos painéis FV. As diretrizes metodológicas para o estudo da (LCA) de sistemas fotovoltaicos, podem ser resumidas em três pontos: Características técnicas, modelagem e análise de relatórios da indústria, onde são recolhidos dados de vários fabricantes e comparados com trabalhos apresentados na literatura (PENG; LU; YANG, 2013).

De forma geral a avaliação do ciclo de vida (LCA) é um método abrangente usado para avaliar e analisar o desempenho energético e ambiental durante toda vida útil de um produto, seguindo a abordagem “do berço ao túmulo”, ou seja, a partir da extração mineral, passando pelo transporte, processamento de materiais, manufatura, distribuição, operação, e finalmente a desativação do sistema e destinação dos resíduos (LUDIN et al., 2018a).

Antes de iniciar um estudo de (LCA) é preciso identificar o inventário de uma produção, onde são estabelecidos os parâmetros a serem analisados, bem como os limites do sistema. Por se tratar de uma análise abrangente e complexa, a tecnologia FV pode ser constituída basicamente em processos upstream, midstream e downstream, onde o processo upstream corresponde à mineração de matéria-prima, purificação do silício e corte de *wafers*, enquanto o midstream envolve a produção de células e módulos solares, fechando com o processo downstream, etapa que engloba a integração, construção e operação do sistema até o descarte final (HOU et al., 2016).

As etapas que envolvem o ciclo de vida de sistemas fotovoltaicos podem ser classificadas basicamente em cinco estágios, 1) A produção de matéria-prima através da extração mineral; 2) Processamento e purificação dos materiais; 3) Fabricação dos módulos e componentes do sistema; 4) Instalação e uso do sistema; 5) Descarte ou reciclagem. De acordo com estruturas padronizadas pela ISO 14040 e ISO 14044, a metodologia para avaliação do ciclo de vida (LCA) de um produto ou processo, consiste em quatro passos (LUDIN et al., 2018a):

1. Definição de metas e escopo: Nesta etapa é determinado o objetivo da pesquisa, bem como os limites do sistema, definindo a unidade funcional a ser estudada;
2. Identificação do Inventário do Ciclo de Vida (LCI): A coleta de dados nesta etapa consiste nas entradas que virão a compor toda energia incorporada no produto, como matérias-primas, consumo de energia em cada etapa de fabricação, mediando processos e resultados ao longo do ciclo de vida do produto;
3. Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida: Deve-se interpretar o impacto que o produto representou em termos energéticos e ambientais;
4. Interpretação: Os resultados são resumidos e identificados, analisando os pontos críticos, atribuindo conclusões e recomendações para melhorias futuras.

Durante o estágio de produção, é imprescindível considerar as entradas de energia requisitadas durante as etapas de extração de matérias-primas, fornecimento de energia, fabricação dos painéis, montagem do sistema, levando em consideração cabos, inversores e todos os componentes necessários para produzir eletricidade. Na fase de construção, deve-se considerar o consumo de energia no transporte, construção e instalação, incluindo fundações no solo e estruturas de apoio. Já na etapa de operação são consideradas entradas de energia oriundas de peças auxiliares, limpeza dos painéis, manutenção, reparos, substituições de componentes danificados e finalmente o descarte ou reciclagem (LUDIN et al., 2018a).

Considerar parâmetros que influenciam de forma mais significativa no saldo energético final, bem como estabelecer os objetivos e hipóteses do sistema estudado, é fundamental para obter resultados mais precisos e análises mais claras. Desse modo, para uma realização mais adequada da avaliação do ciclo de vida (LCA) e o cálculo do tempo de retorno de energia, do inglês *Energy playback time* (EPBT) da tecnologia FV, é importante considerar pelo menos doze parâmetros, que estão listados abaixo de acordo com a ordem hierárquica: (LUDIN et al., 2018a):

1. O objetivo do estudo e unidade funcional;
2. Hipóteses para a produção dos principais insumos;
3. Localização da instalação;
4. Irradiação solar anual;
5. Tipo de tecnologia fotovoltaica;
6. Tipo de sistema (Inclinação fixa ou variável);
7. Eficiência e taxa de degradação do módulo;

8. Vida útil do sistema FV e dos componentes do (BOS);
9. Produção anual de eletricidade esperada;
10. Cronograma de dados;
11. Estágios ao longo do ciclo de vida;
12. Abordagem da (LCA) com base no processo.

O nível de especificidade de um sistema FV, assim como a variação de parâmetros na fabricação dos módulos entre os fabricantes, podem causar divergências entre os resultados divulgados pela indústria ou publicados em estudos, devido à ausência de dados ou carência de informações detalhadas e específicas sobre os processos envolvidos e características individuais de uma tecnologia fabricada. Por consequência, para a realização de uma LCA adequada, é fundamental detalhar o máximo de características particulares de uma tecnologia, como exemplificado na Tabela 1, de modo a identificar o tipo específico do sistema FV, a fim de obter resultados cada vez mais precisos. (FU; LIU; YUAN, 2015).

Características de Um Módulo FV Específico	
Item	Descrição
Tamanho do módulo	1482 x 992 x 35 mm
Massa	16,8 Kg
Moldura	Armação de Liga de alumínio
Vidro frontal	Vidro temperado de 3,2 mm
Espessura da folha de EVA	0,5 mm
Espessura do <i>Wafer</i>	200 $\mu\text{m} \pm 20 \mu\text{m}$
Número de células por módulo	54 (6 x 9)
Área da célula	156 x 156 mm ²
Eficiência do Módulo	16%
Vida de operação	25 anos
Irradiação solar anual	4680 MJ/m ² /ano
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	33,4 V
Tensão de operação ideal (V_{mp})	26,2 V
Corrente de curto-circuito (I_{sc})	8,12 A
Corrente operacional ótima (I_{mp})	7,63 A
Potência máxima	200 Wp
Temperatura de operação	-40 °C a +85 °C
Tensão máxima do sistema	1000 V DC
Classificação máxima de fusíveis em série	20 A
Tolerância de potência	$\pm 3\%$

Tabela 1: Relação de características de um módulo PV.
Fonte: Adaptado de (FU; LIU; YUAN, 2015).

O EPBT é parâmetro que representa o tempo que um sistema FV deverá ficar em operação para gerar toda energia que foi demandada na sua produção e implementação. Todavia, se levarmos em consideração o ciclo de vida total de um sistema FV, a especificação adequada do tipo de tecnologia fabricada não é suficiente para obter resultados coerentes de EPBT, também é preciso definir de forma detalhada, todas as entradas de energia que foram requisitadas pelos processos envolvidos na produção dos módulos, e quando somadas representam toda energia incorporada no produto.

2.2 TEMPO DE RETORNO DE ENERGIA (EPBT)

O acelerado crescimento das tecnologias FV no mercado, baseia-se consideravelmente nos indicativos de produção de eletricidade cada vez mais abundantes e de custos mais baixos, tanto financeiro, quanto ambiental, tornando indispensável analisar criteriosamente um de seus principais indicadores de desempenho, o tempo de retorno da energia (EPBT), que é o tempo em que um sistema FV deve operar até produzir a mesma energia que foi gasta para fabricá-lo. Os tempos de retorno da energia de um sistema são determinados através da avaliação do ciclo de vida (LCA) dos sistemas fotovoltaicos, que vai da extração mineral, passa pelos processos de fabricação, instalação, operação e chega até o processo de descarte ou reciclagem no fim da vida útil (MANN et al., 2014).

Ao longo da cadeia de valor de um sistema fotovoltaico, existe um grande consumo de energia, e conseqüentemente, emissões consideráveis de gases do efeito estufa (GEE), principalmente durante os estágios de produção e manufatura. Para resultados mais precisos entre os estudos relacionados ao EPBT de um sistema, é preciso considerar todas as entradas de energia demandadas pelos processos de produção de materiais, fabricação, montagem de módulos, transporte de materiais, instalação, manutenção, operação, descarte ou até mesmo a reciclagem. A análise detalhada dos estágios presentes no o ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos é fundamental para estimar EPBTs de forma mais adequada, bem como suas conseqüentes emissões de gases do efeito estufa (GEE), sendo importantes parâmetros de base, para avaliar o grau de sustentabilidade e desempenho ambiental desta fonte energética (PENG; LU; YANG, 2013).

De modo geral para calcularmos o tempo de retorno de um investimento qualquer, basta dividir o que foi investido pelo que foi retornado em um determinado período de tempo. Em vista disso, de forma simplificada para a tecnologia FV, para obter resultados na unidade de tempo [ano], a divisão é feita entre o parâmetro que representa toda energia consumida ao longo do ciclo de vida do produto e a variável correspondente a toda energia gerada pelo sistema no período de um ano, de acordo com a expressão (1) apresentada.

$$EPBT_{(ano)} = \frac{E_{in}}{E_{out}} \quad (1)$$

Apesar da simplicidade da equação que descreve o tempo de retorno energético de um produto, a determinação dos parâmetros que incorporam as variáveis da expressão, têm significativa abrangência e complexidade para se definir.

O EPBT de um sistema fotovoltaico pode ser determinado de acordo com a sua configuração (montado ou integrado), conectado à rede ou isolado, bem como por vários fatores, como tipo de módulo FV, método de fabricação, local de instalação, tipo de moldura e estrutura de suporte, levando em consideração a relação de desempenho e incluindo todas as perdas associadas. Sendo assim, o EPBT pode ser considerado um forte indicador de avaliação de sustentabilidade, podendo retornar resultados líquidos de energia durante a vida útil da tecnologia, possibilitando uma visão tanto qualitativa quanto quantitativa a respeito de viabilidade e sustentabilidade, podendo ser calculado através da equação simplificada (2) (PENG; LU; YANG, 2013).

$$EPBT_{(ano)} = \frac{E_{input} + E_{components}}{E_{output}} \quad (2)$$

Onde E_{input} é a entrada de energia primária que incorpora o painel fotovoltaico durante o ciclo de vida, considerando os requisitos de energia consumida nas etapas de produção, manufatura, transporte, instalação, operação, manutenção e reciclagem dos módulos; $E_{components}$, é a energia consumida pelos componentes presentes no painel FV, incluindo estruturas de suporte, cabeamentos, componentes eletrônicos, inversores, baterias entre outros; E_{output} , é a geração anual de energia elétrica a partir do sistema FV (PENG; LU; YANG, 2013).

De acordo com a equação (2), toda energia consumida em todos os estágios do ciclo de vida do produto, é representada no numerador da expressão, enquanto o denominador apresenta a energia anual gerada pelo sistema. Entretanto, é preciso estabelecer parâmetros mais específicos, uma vez que é preciso considerar as perdas relacionadas a eficiência dos módulos, degradação natural dos elementos constituintes, parâmetros dimensionais e energia requerida para o gerenciamento e manutenção do sistema.

2.2.1 Demanda Acumulada de Energia (CED)

O parâmetro que representa a demanda acumulada de energia, do inglês *cumulative energy demand (CED)* é utilizado como indicador de energia incorporada, referindo-se à quantidade de energia primária requerida em todo ciclo de vida de um produto, desde a extração de matérias-primas da natureza até o fim da vida útil (LUDIN et al., 2018b).

De acordo com a equação (2) apresentada no tópico anterior, a demanda acumulada de energia (CED) equivale ao parâmetro do numerador, sendo a soma ($E_{input} + E_{components}$), representando toda energia consumida durante o ciclo de vida do produto.

Segundo Lu et al. (2010) o CED é dividido em duas categorias, uma refere-se apenas aos sistemas dos módulos FV e a outra aos componentes responsáveis pelo equilíbrio do sistema, do inglês *balance of system (BOS)*, que compreende todos os componentes de um sistema solar, com exceção dos painéis fotovoltaicos, englobando componentes eletrônicos, inversores, fiações, estruturas entre outros. Dessa forma, a equação (3) representa a categoria que engloba a energia demandada na produção apenas dos sistemas FV, e a unidade utilizada é o [KWh] (apud LUDIN et al., 2018b).

$$E_{system(KWh)} = (E_{mat} + E_{manuf} + E_{trans} + E_{inst} + E_{des}) \quad (3)$$

Onde as variáveis são descritas da seguinte forma:

- $E_{system(KWh)}$ representa a soma de todas as entradas de energia referentes a produção dos sistemas fotovoltaicos;

- E_{mat} é a demanda de energia primária para produzir os materiais que constituem o sistema fotovoltaico, normalmente associada aos processos de processamento e purificação do silício;
- E_{manuf} representa a demanda de energia primária necessária para fabricar os painéis FV, envolvendo o corte dos lingotes, bem como os processos de construção e montagem dos módulos fotovoltaicos;
- E_{trans} refere-se a energia primária requerida para transportar, módulos e materiais até o local fabricação ou instalação;
- E_{inst} é a demanda de energia primária requerida na instalação do sistema;
- E_{des} equivale a demanda de energia primária utilizada no gerenciamento do sistema no final de vida útil, englobando a desmontagem do sistema e a destinação dos materiais.

Dado que os sistemas solares necessitam de estruturas e elementos externos para o seu funcionamento, o fator BOS vem sendo considerado nos estudos mais recentes sobre o assunto. Entretanto, para resultados mais adequados de EPTBs, a variável BOS deve ter um alto o nível de detalhamento e uma descrição completa dos parâmetros de *inputs* de energia associados, uma vez que este fator tem influência significativa nos resultados (GERBINET; BELBOOM; LÉONARD, 2014).

Além dos elementos básicos necessários para a operação de painéis FV, em instalações específicas de maior porte, é preciso considerar a necessidade de construir subestações, preparar o solo, instalar estruturas de suporte, incluir a fiação e outras entradas de energia decorrentes do processo de implementação de um sistema solar (DESIDERI et al., 2012).

Para a categoria (BOS), a equação (4) descreve as variáveis que fazem a composição da energia requerida na produção dos componentes elétricos e mecânicos do sistema.

$$E_{BOS(KWh)} = (E_{electrical} + E_{mechanical}) \quad (4)$$

Onde:

- $E_{BOS(KWh)}$ equivale a toda energia demandada na produção dos elementos, tanto elétricos quanto mecânicos, sendo representada pela unidade [KWh];
- $E_{electrical}$ representa a demanda de energia primária necessária para produzir os componentes elétricos do (BOS);

- $E_{mechanical}$ refere-se a demanda de energia primária dos componentes mecânicos do (BOS).

Com isso, definimos o parâmetro CED, que equivalente a soma das variáveis ($E_{system} + E_{BOS}$). Posto isso, o próximo passo é o cálculo da energia anual de saída (E_{out}), ou seja, a energia elétrica líquida gerada pelo módulo fotovoltaico.

2.2.2 Energia de Saída do Sistema (E_{out})

A eficiência na geração de eletricidade de um sistema fotovoltaico está diretamente ligada à quantidade de irradiação solar incidente nos painéis, que por sua vez, dependem do ângulo de inclinação em relação ao sol. A situação de maior eficiência é quando o ângulo de incidência solar é de 90° com a superfície do módulo, portando, para maximizar a geração de saída, aumentando a eficiência do sistema, é de fundamental importância, que os painéis FV assumam inclinações otimizadas, a fim de assegurar um melhor rendimento na geração de eletricidade (SUMPER et al., 2011).

A energia de saída de um sistema fotovoltaico, representa toda energia líquida gerada em um determinado período de tempo, ou seja, descontando todas as perdas inerentes a um sistema real. Posto isso, seguindo o desenvolvimento do modelo matemático, e estabelecendo parâmetros para resultados anuais, temos que a expressão (5) apresenta a forma geral da equação que descreve o EPBT de um sistema FV até o momento.

$$EPBT_{(ano)} = \frac{(E_{system} + E_{BOS})}{(E_{out} - E_{op})} \quad (5)$$

Onde:

- $EPBT_{(ano)}$ é o tempo de retorno energético de um sistema de geração fotovoltaico;
- $(E_{system} + E_{BOS})$ equivalem à toda demanda acumulada de energia (CED), durante o ciclo de vida do produto.
- E_{out} representa a energia anual gerada pelo sistema FV;
- E_{op} é a demanda de energia necessária para operação do sistema, englobando limpeza, manutenção e substituição e de elementos.

Adotando o KWh como unidade de energia e considerando as perdas inerentes a eficiência de um sistema, bem como fatores de desempenho e de conversão de energia, o parâmetro (E_{out}) da equação, representado pela energia gerada no período de um ano, pode ser calculado através do produto das variáveis I_{sol} , A_{sup} , n_{conv} e PR , como apresentado na equação (6) a seguir: (LALEMAN; ALBRECHT; DEWULF, 2011).

$$E_{out(KWh)} = (I_{sol} \cdot A_{sup} \cdot n_{conv} \cdot PR) \quad (6)$$

Onde:

- $E_{out(KWh)}$ é a energia gerada por um sistema FV, no período de um ano, sendo medida pela unidade [KWh];
- I_{sol} é a irradiação solar média anual da região onde o sistema está em operação e sua unidade é o [KWh/m²/ano];
- A_{sup} representa a área em [m²] da superfície ativa de um sistema FV;
- n_{conv} é o percentual [%] de eficiência do módulo FV, na produção de energia elétrica a partir da energia solar incidente;
- PR corresponde ao fator de desempenho do sistema, podendo ser obtido pela relação (Saída de energia Real / Saída máxima teórica), medida em percentual [%].

O fator (PR) é expresso em porcentagem, tal que um fator de desempenho de 75% significa que 25% da geração teórica de energia é perdida devido fatores como, ineficiência de inversores e efeitos causados pelas variações climáticas da região.

Entre as variáveis relacionadas aos *outputs* de energia de um sistema, (PR) e (I_{sol}), são as que têm maior influência nos resultados de EPBT. A média anual de irradiação solar em uma determinada região, representa a incidência de energia solar por unidade de área por ano [KWh/m²/ano], enquanto (PR) é a razão entre produção real de energia e a teórica. A variável (PR) consiste no desempenho de um sistema, considerando todas as influências na produção real de eletricidade, incluindo os efeitos das variações de radiação solar, variação de temperatura dos módulos, sombreamento, cobertura de sujeira e ineficiências de modo geral (BHANDARI et al., 2015).

Normalmente entre os trabalhos, a energia de entrada (E_{in}) é expressa como energia primária, representada pela unidade megajoule-primário [MJ_{prim}]. Sendo

assim, é preciso fazer a conversão para unidades elétricas de energia [MJ_{el}], multiplicando a energia primária por um fator de conversão medido em [MJ_{el}/MJ_{prim}], que representa a eficiência de geração de eletricidade da região, e seus valores mais comuns são apresentados pela Tabela 2 abaixo (CUCCHIELLA; DADAMO, 2012).

Fatores de Eficiência Regionais		
C_{rede} [MJ_{el}/MJ_{prim}]	Área Geográfica	Fonte
0,31	Europa Ocidental	FTHENAKIS et.al (2011)
0,35	Não Especificado	LAMEMAN et.al (2011)
0,38	Não Especificado	TIWARI et.al (2009)
0,40	Itália	GOVERNO ITALIANO (2006)

Tabela 2: Fatores de conversão para unidades de energia elétrica.
Fonte: Adaptado de Cucchiella; Dadamo (2012).

Apesar de não ser considerado em cálculos de EPBT de muitos trabalhos sobre tema, (C_{rede}) indica à eficiência da conversão na geração de eletricidade em uma determinada região. Sendo assim, para melhores resultados de EPTBs, o parâmetro deve ser multiplicado pela razão (E_{in} / E_{out}), sendo representado de forma genérica pela expressão (7) em seguida (LALEMAN; ALBRECHT; DEWULF, 2011).

$$EPBT_{(ano)} = \frac{E_{in}}{E_{out}} * C_{rede} \quad (7)$$

Onde valor atribuído para (C_{rede}) na grande maioria dos estudos é de 0,35 [MJ_{el}/MJ_{prim}], resultando em valores de EPBTs aproximadamente três vezes menores, se comparados com resultados onde este parâmetro não é considerado.

Estabelecido os parâmetros de maior influência nos resultados, finalmente podemos definir de forma detalhada equação geral, utilizada para obter o parâmetro EPBT de um sistema foto FV qualquer, descrita pela expressão (8) abaixo:

$$EPBT_{(ano)} = \frac{(E_{system} + E_{BOS})}{(I_{sol} \cdot A_{sup} \cdot n_{conv} \cdot PR)} * C_{rede} \quad (8)$$

Onde os parâmetros apresentados na equação podem ser atribuídos de acordo com as características específicas dos diferentes processos e regiões onde o sistema FV é instalado.

2.3 SALDO ENERGÉTICO DA TECNOLOGIA (E_{LIQ})

Por não se portar de forma linear, os índices de degradação em sistemas fotovoltaicos, não são triviais de serem determinados, uma vez que as taxas de desgaste, dependem do tempo de operação dos módulos, atrelado às características climáticas de cada região. Esse desgaste, implica em reduções gradativas de eficiência, sendo mais significantes a longo prazo, quando os painéis estão próximos do fim da sua vida útil. No entanto, para sistemas de silício cristalino, em geral, adota-se um decréscimo de eficiência de 0,5 % a cada ano de operação (PENG; LU; YANG, 2013).

De forma simplificada, desconsiderando as taxas de degradação, a expressão que deve retornar o saldo líquido aproximado da energia produzida por um sistema fotovoltaico (E_{liq}), considerando o total da vida útil do produto, pode ser obtida inicialmente, multiplicando o tempo que o sistema permaneceu gerando eletricidade, pelo denominador da equação (8), referente ao EPBT de um sistema FV. Em seguida, deve-se subtrair os *inputs* de energia (CED) e (E_{op}), que representam os valores de toda energia demandada durante os processos de produção e operação respectivamente, sendo o cálculo de forma geral, representado através da equação (9) descrita abaixo.

$$E_{liq(KWh)} = ((I_{sol} \cdot A_{sup} \cdot n_{conv} \cdot PR) * (V_{útil})) - (CED + E_{op}) \quad (9)$$

Onde:

- $E_{liq(KWh)}$ representa a energia líquida gerada pelo sistema FV, ao longo de sua vida útil, também representado pelo saldo energético final medido em [KWh];
- $V_{útil}$ equivale ao tempo medido em [ano], que um sistema FV permaneceu em operação, gerando eletricidade;

Os fatores de eficiência, que são parâmetros de importante influência nos resultados de EPBTs, também causam variações relevantes no saldo energético final. No entanto, pelo fato dos painéis fotovoltaicos estarem expostos continuamente em meio as alterações climáticas, esses fatores naturais influenciam de forma significativa nos resultados dos cálculos de $E_{liq(KWh)}$, uma vez que, são responsáveis por alterações periódicas e significativas, relacionadas principalmente a temperatura e umidade, fatores estes, que podem acelerar o processo de degradação dos painéis, implicando na redução do saldo positivo final da tecnologia.

2.3.1 Saldo Ambiental da Tecnologia e Emissões de (GEE)

Embora o gás do efeito estufa mais conhecido seja o dióxido de carbono (CO₂), gases como SO₂, NO_x, CH₄ entre outros, são emitidos durante o ciclo de vida de um sistema fotovoltaico. De modo geral, para identificar o impacto ambiental de um gás específico, o mesmo é definido pelo seu potencial de aquecimento global, relativo ao CO₂, do inglês, *global warming potential* (GWP). Desse modo, a soma dos gases emitidos pela tecnologia, podem ser expressos como quantidades equivalentes de CO₂, a fim de facilitar cálculos e simplificar análises (PENG; LU; YANG, 2013).

Tomando a China como exemplo, os impactos ambientais a cada KWh gerado por um sistema FV, durante o ciclo de vida do produto, se mostraram bastante inferiores ao de uma usina a carvão, tecnologia dominante no país. Em geral, sistemas de geração a carvão, exigem valores de energia primária semelhantes aos fotovoltaicos, entretanto causam um impacto ambiental significativamente maior durante o ciclo de vida, principalmente na fase de operação (FU; LIU; YUAN, 2015).

De forma simplificada, para sistemas de geração de energia FV, a taxa de emissão de GEE, pode ser expressa como o total de emissões equivalente, dividido pela quantidade de eletricidade gerada durante o ciclo de vida do produto, onde o cálculo pode ser demonstrado através da equação (10) descrita abaixo (PENG; LU; YANG, 2013).

$$GEE_{taxa} = \frac{Gee_{total}}{E_{total}} \quad (10)$$

Onde:

- GEE_{taxa} representa a taxa de emissão dos gases do efeito estufa (GEE) por unidade de potência gerada, medida geralmente em [g CO₂-eq./KWh];
- Gee_{total} é a quantidade total de emissões de GEE ao longo do ciclo de vida do produto, sendo medida em [g CO₂-eq.];
- E_{total} é medida em [KWh] e equivale à energia elétrica total gerada pelo sistema durante o ciclo de vida.

Além dos fatores climáticos e de desempenho, a taxa de emissão de GEE de um sistema FV, varia de acordo com os tipos de processos utilizados nas etapas

de fabricação, sendo diretamente proporcional à energia demandada, principalmente no estágio de manufatura dos painéis.

A fabricação de módulos FV com a tecnologia mono-Si, por requisitar uma quantidade maior de energia no processo de cristalização do silício, apresenta taxas de emissão de GEE, mais elevadas do que na produção de sistemas multi-Si, variando na faixa de 29 a 45 [g CO₂-eq./KWh] gerado. Muito embora a manufatura de células mono-Si, seja a que demande a maior quantidade de energia entre as tecnologias de silício cristalino, de modo geral, a taxa de emissão de GEE é cerca de uma ordem de grandeza menor do que a eletricidade baseada em fontes não renováveis (PENG; LU; YANG, 2013).

Ainda que a geração de eletricidade a partir de combustíveis fósseis tragam maiores benefícios do ponto de vista energético, é preciso considerar o impacto negativo no bem-estar das futuras gerações. Conforme as perspectivas estudadas, os sistemas FV, se apresentaram como uma alternativa melhor do que plantas a gás ou a carvão, uma vez que, os impactos ambientais de 1 KWh de eletricidade fotovoltaica gerada, mostrou-se relativamente menor que a maioria das fontes não renováveis, principalmente se considerarmos perspectivas a longo prazo (LALEMAN; ALBRECHT; DEWULF, 2011).

2.4 ESTÁGIOS E PROCESSOS PRODUTIVOS DA TECNOLOGIA

O silício é o metaloide mais abundante no planeta, sendo o elemento fundamental para produção de tecnologias de energia solar fotovoltaica. Em consequência da grande disponibilidade deste semicondutor na natureza, os sistemas que utilizam o metaloide, tornaram-se maioria na matriz energética fotovoltaica. Até o ano de 2016, as células solares de silício alcançaram a marca de 93% dos sistemas de geração FV no mercado global, e segundo o Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL), com eficiências de 25,8% e 22,3% para o silício monocristalino (mono-Si) e multicristalino (multi-Si) respectivamente (LUDIN et al., 2018a).

Quanto maior for o percentual de conversão da energia solar incidente em um painel fotovoltaico para energia elétrica, maior é a eficiência da tecnologia empregada no sistema, ou seja, se uma área menor consegue produzir a mesma quantidade

de energia elétrica que outro sistema de área maior, então o sistema de área menor tem maior eficiência na produção de eletricidade.

O estudo tem enfoque específico nas tecnologias de Silício monocristalino (mono-Si) e Silício multicristalino (multi-Si). Estas tecnologias diferem basicamente pelo tipo de estrutura cristalina do silício presente no painel FV, podendo também apresentar diferenças quanto ao nível de pureza. O tipo mono-Si apresenta maior eficiência, entretanto, conseqüentemente consome uma energia significativamente maior na etapa de manufatura do que o tipo multi-Si, uma vez que o processo necessita de um tempo maior para a extração dos cristais únicos crescentes na caldeira, enquanto o multi-Si, por apresentar um arranjo estrutural mais simples, pode ser produzido mais rapidamente, consumindo assim, uma quantidade menor energia no processo (PENG; LU; YANG, 2013).

Tendo em vista, o resumo de caráter introdutório, desenvolvido no sentido de apresentar um panorama de forma geral, a respeito dos tipos de tecnologia que serão estudadas neste trabalho, onde através da apresentação de alguns dados foi possível identificar a representatividade da tecnologia no mercado das fotovoltaicas, bem como diferenciar os dois tipos, quanto aos arranjos cristalinos, eficiência, nível de pureza e energia demandada nos processos de produção. Posto isso, o próximo passo é o desenvolvimento da análise, com o intuito de investigar os processos envolvidos na produção da tecnologia, bem como os parâmetros custos energéticos associados.

Com o propósito de realizar uma análise mais detalhada a respeito dos processos envolvidos no ciclo de vida da tecnologia, a análise será dividida em três tópicos: Produção de Matéria-prima; Manufatura; e Operação, representando os 3 principais estágios envolvidos no processo produtivo como um todo.

2.4.1 Produção de Matéria-Prima

A utilização de combustíveis fósseis na extração de minérios para a produção de tecnologias renováveis como a fotovoltaica, ainda é imprescindível no cenário energético atual, e essa energia gasta, nesta que pode ser considerada a etapa inicial do processo produtivo, deve ser considerada como a primeira entrada de energia a compor o parâmetro CED do sistema, durante o ciclo de vida.

Além da extração do silício que é elemento principal presente na maioria dos sistemas FV atuais, para implementação das tecnologias, mono-Si e multi-Si, são necessários metais como ferro, cobre, alumínio e prata. Ainda que a maioria dos metais captados através de extração mineral podem ser considerados recicláveis, os sistemas FV causam um impacto significativo na depleção destes minerais. Por exemplo, estima-se que cerca de 2g de minério de ferro e 1,5g de minério de alumínio são necessários para produção de 1 KWh de eletricidade gerada a partir de um sistema fotovoltaico (LALEMAN; ALBRECHT; DEWULF, 2011).

De acordo com o tipo de instalação de um sistema FV, variam os requisitos de matéria prima para produção e implementação da tecnologia. Assim, os requisitos de materiais em gramas [g], para instalação e produção de células, por metro quadrado, podem ser demonstrados através da Tabela 3, onde estão classificados conforme a estrutura de montagem específica (GOE; GAUSTAD, 2014).

Composição de Metais em Sistemas FV

Descrição	Alumínio [g/m ²]	Ferro [g/m ²]	Cobre [g/m ²]
Suporte inclinado para telhado e interconexões	1708	197	27,8
Montagem no solo e interconexões	1708	2029 - 7682	27,8
Apenas a moldura	1500	-	-

Tabela 3: Requisitos de metais por tipo de instalação.
Fonte: Adaptado de Goe; Gaustad (2014).

O peso médio de um módulo fotovoltaico é de 16 Kg/m² e o peso do sistema de suporte com inversor e componentes do BOS é de pelo menos 25 Kg/m², desconsiderando o peso do concreto, podendo variar conforme as necessidades requeridas no local de instalação (FERRONI; HOPKIRK, 2016).

A produção começa com a mineração das matérias-primas, e considerando o silício, a areia de quartzo é extraída da natureza e parte para o processamento e purificação. O processo industrial mais utilizado atualmente para purificação e cristalização de silício é o processo Siemens, onde o quartzo é reduzido em um forno de arco para silício metalúrgico (MG-Si), que deve ser purificado ainda mais para silício de grau eletrônico (EG-Si) ou silício de grau solar (SoG-Si) (FTHENAKIS; KIM, 2011).

Os processos de mineração das matérias-primas para a produção dos metais que constituem um sistema FV, é análogo a extração de quartzo para a produção

de silício, bem como a areia para produção do vidro e os subprodutos do petróleo, como o EVA adicionado na etapa de montagem dos módulos FV.

A Figura 4 apresenta a imagem de uma mina de quartzo brasileira, utilizada para produção de silício fotovoltaico localizada no estado de Minas Gerais.



Figura 4: Mina de quartzo para produção de silício fotovoltaico.
Fonte: Mina Silício (2019).

Toda matéria-prima extraída deve ser transportada aos locais específicos para manufatura, onde serão processados e fabricados para compor o módulo fotovoltaico. Sendo assim, todos os custos energéticos relacionados a mineração e transporte devem ser contabilizados nesta etapa.

2.4.2 Manufatura

Considerando o ciclo de vida do produto, o estágio de fabricação dos módulos FV é o que demanda a maior quantidade de energia, pois estão inclusos no processo a mineração de quartzo, cristalização do silício, produção de lingotes, corte de *wafers*, fabricação de células, módulos, vidro, EVA e outros elementos elétricos necessários na composição de um sistema (HOU et al., 2016).

De forma resumida, a partir do silício de grau eletrônico são extraídos lentamente os cristais mono-Si, crescentes na caldeira, enquanto os cristais multi-Si, são extraídos de forma mais rápida, e portando consomem menores quantidades de energia. Em seguida, os lingotes de silício são fatiados em *wafers* por serras-fita ou serras-

fi, produzindo assim, as células que são unidas e emolduradas, formando o módulo solar. Em seguida são adicionados os componentes eletrônicos e como apresentado pela Figura 5, através do fluxograma que detalha as etapas, finalmente temos o sistema fotovoltaico montado (FTHENAKIS; KIM, 2011).

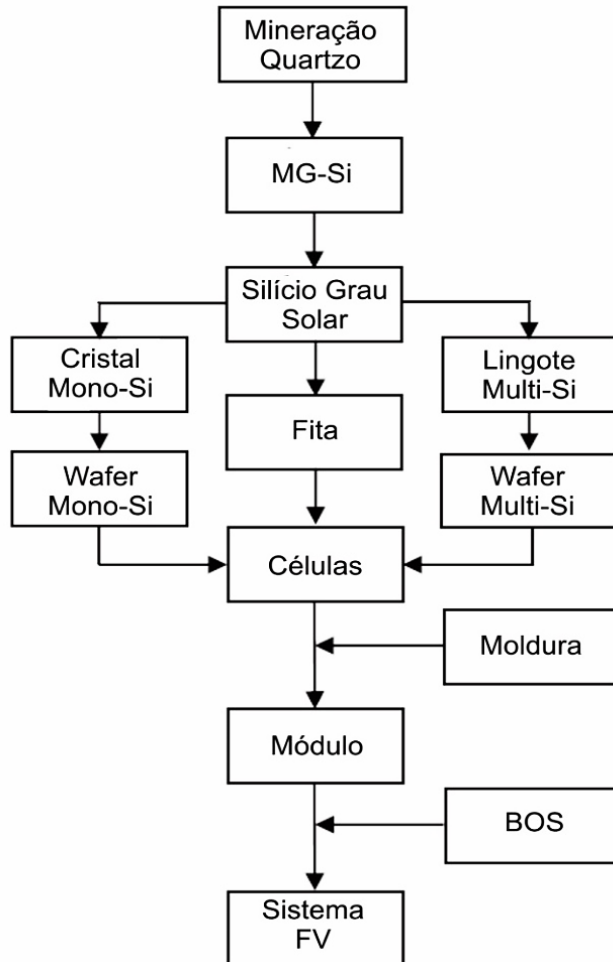


Figura 5: Fluxograma de produção de painéis FV (mono-Si) e (multi-Si).
 Fonte: Adaptado de Fthenakis; Kim (2011).

A principal desvantagem do processo da Siemens, é que o mesmo consome uma grande quantidade de energia, devido à necessidade de adquirir altas temperaturas na câmara de reação.

Os métodos e processos utilizados em cada estágio de manufatura, variam conforme o tipo de tecnologia e nível de purificação do silício a serem alcançados. Conseqüentemente, de acordo com as características do sistema a ser fabricado, o consumo energético varia entre as etapas.

2.4.2.2 Etapas e Processos

À medida que tecnologia nos processos de manufatura dos painéis fotovoltaicos avança, o custo energético investido na fabricação diminui, indicando gradativamente cenários de maior sustentabilidade. Sendo assim, novos processos de cristalização que consomem menos energia, juntamente com o aumento na eficiência dos processos de fatiamento do lingote de silício, possibilitam reduzir a espessura do *wafers* e conseqüentemente, as perdas. Além disso, a reciclagem torna possível a reutilização do silício, que contribui para redução de energia consumida na etapa de fabricação, indicando um futuro promissor para a tecnologia.

Os processos Siemens e Siemens Modificado de fabricação de painéis FV são amplamente utilizados na indústria, sendo os processos industriais dominantes no estágio de purificação do silício. De forma simplificada, a areia de quartzo através deste processo, é colocada em um forno de arco para reduzir e obter silício com pureza de grau metalúrgico (MG-Si), e então o silício-MG precisa ser mais purificado para silício de grau eletrônico (EG-Si), resultando assim, nos lingotes de silício cristalino (PENG; LU; YANG, 2013).

No início de um processo de cristalização, a redução da areia de quartzo, tem como resultado o silício MG-Si, com pelo menos 98% de pureza, entretanto, para tecnologia FV, o silício resultante precisa ser ainda mais purificado, alcançando em média níveis de pureza de 99,99999999% para o silício de grau eletrônico (EG-Si) ou 99,9999% para o silício de grau solar (SoG-Si). Essa purificação pode ser realizada através de vários métodos, tais como o processo Siemens, Siemens modificado, Czochralski ou processo Schumacher, dependendo da pureza do silício que se deseja alcançar (WONG; ROYAPOOR; CHAN, 2016).

Embora a fabricação de painéis PV, apresentem uma demanda decrescente de energia na última década, a potência de saída dos módulos também aumentou ao longo dos anos. Portanto, é preciso realizar estudos criteriosos, de tal maneira, que possam identificar a real influência da eficiência nas taxas de aprendizagem da tecnologia, bem como na energia incorporada do produto (GÖRIG; BREYER, 2016).

2.4.2.3 Purificação e Cristalização do Silício

As duas tecnologias, mono-Si e multi-Si diferem principalmente pela estrutura cristalina do *wafers* de silício, uma vez que podem assumir níveis equivalentes de pureza do silício EG-Si ou do silício SoG-Si. De modo geral, os níveis de pureza variam de acordo com o número de casas decimais depois da vírgula, assumindo valores comuns de 99,99%; 99,9999%; 99,999999%; 99,99999999% e assim por diante (PENG; LU; YANG, 2013).

A purificação do silício, utilizando o processo Siemens, ocorre em um forno de arco no qual os gases triclorosilano (SiHCl_3) e hidrogênio (H_2) são aquecidos entre 1100 e 1200 °C para reação, enquanto no processo Siemens modificado os gases silano (SiH_4) e o hidrogênio (H_2) só precisam ser aquecidos a 800 °C aproximadamente, economizando uma quantidade significativa de energia no processo. Sendo assim, a matéria-prima fundida e moldada para indústria fotovoltaica de hoje, é composta basicamente pela mistura de silício EG-Si, silício off-grade e silício SoG-Si. Os *wafers* de multi-Si podem ser diretamente produzidos a partir desses blocos multicristalinos, enquanto que para a produção de *wafers* mono-Si, é necessário que se extraia lentamente o cristal crescente na caldeira, uma vez que a formação de um arranjo de monocristais, demanda um tempo significativamente maior que a formação de uma estrutura multicristalina, consumindo assim, uma quantidade elevada de energia no processo (PENG; LU; YANG, 2013).

A Figura 6 abaixo apresenta as diferenças quanto aos arranjos de cristais, especificando cada tipo de estrutura cristalina, referente aos dois tipos de tecnologia estudadas neste trabalho.

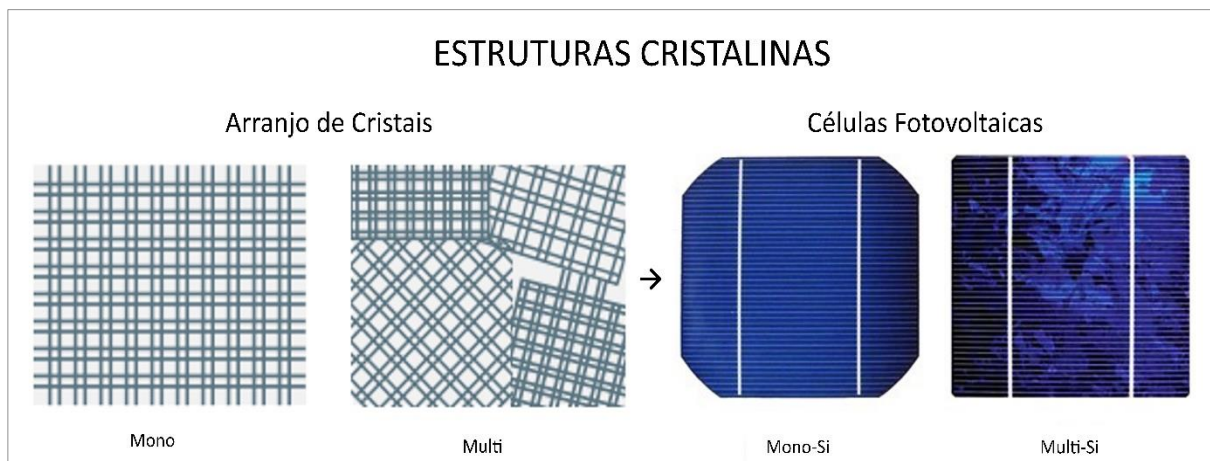


Figura 6: Estruturas cristalinas em células de silício.

Fonte : Adaptado de Sunflower (2019) e Eletricista Consciente (2017).

A energia demandada na fabricação dos lingotes de silício, variam de acordo com o nível de pureza e estrutura cristalina adotada. Sendo assim, quanto maior à pureza adquirida no silício fotovoltaico, maior é o consumo energético na fabricação do lingote, podendo ter ainda, custos mais elevados se o modelo adotado for do tipo mono-Si, pois como vimos, além da energia demandada no processo de purificação do silício, este tipo de tecnologia precisa obter a partir do silício já purificado, um arranjo estrutural monocristalino, passando por etapas adicionais e de custo energético elevado.

Os processos de purificação e cristalização, resultam em lingotes de silício purificado, podendo conter arranjos mono ou multicristalinos, que por sua vez, avançam para a fase de corte de *wafers*, para produção das células solares.

2.4.2.4 Corte de Lingotes e Produção de Células Solares

Com relação à quantidade, a indústria chinesa apresentou dados, relacionando as proporções de quartzo para produção de painéis de silício, onde os relatos descreviam a necessidade de extrair 2,0 Kg de quartzo para produzir 1 Kg de silício MG-Si, 1,35 Kg de MG-Si é necessário para produzir 1,0 Kg de silício SoG-Si, e finalmente, temos que 1,1 Kg de SoG-Si é usado para produzir 1,0 Kg de lingote multi-Si. Estes lingotes, podem ser fatiados em pelo menos 46 *wafers* quadrados, medindo 156 mm de lado e com eficiência média de 17.5%, tendo uma potência de 4.26 Wp por *wafers*, totalizando 196 Wp por lingote Multi-Si produzido (HOU et al., 2016).

Os lingotes de silício são cortados por serras fita ou serras fio. Normalmente, as colunas de mono-Si são serradas em *wafers* quadrados com seção transversal de 156 mm², ou seja, aproximadamente 0,0243 m², e uma espessura entre 180-270 µm e 180-240 µm para as colunas multi-Si. Com os *wafers* prontos o próximo passo é a produção de células fotovoltaicas, passando pelas seguintes etapas descritas (PENG; LU; YANG, 2013):

1. **Gravação:** Os *wafers* são banhados quimicamente para remover irregularidades microscópicas e resíduos remanescentes da etapa de serra.

2. **Dopagem:** Após a gravação deve ser realizado o processo de dopagem nos *wafers*, a fim de criar a junção PN fotoativa, sendo mais comum a dopagem por fósforo.
3. **Serigrafia:** Para coleta de elétrons é necessário fazer uma impressão metálica dos dois lados do *wafer*.
4. **Revestimento:** Para aumentar a irradiação e melhorar a eficiência um revestimento antirreflexo é pintado na parte frontal.
5. **Verificação:** A célula acabada deve ser verificada quanto às características e eficiência.

As etapas desde o silício purificado até o painel fotovoltaico, podem ser observadas de forma simplificada através da Figura 7, que apresenta os cinco principais estágios.



Figura 7: Processos do silício para produção de painéis FV.
Fonte: Portal Solar (2019).

Com a conclusão das etapas de fabricação de células, bem como o tratamento dos materiais, revestimentos e verificações, o próximo passo é a montagem do módulo fotovoltaico.

2.4.2.5 Montagem

Após a fabricação de todos os elementos que constituem um painel fotovoltaico, o próximo passo é a montagem dos módulos, onde a energia demandada nesse processo varia de acordo como o tipo de sistema a ser implementado. Dessa forma, para montagem de um sistema FV de grande escala, a quantidade de alumínio necessária para as molduras é bastante reduzida, se comparado à sistemas menores.

Considerando todos os elementos na etapa de montagem dos módulos, as células são ligadas com fios de contatos de prata na frente e atrás, depois as células solares são incorporadas em duas camadas de etil-vinil acetato (EVA) uma em cada lado, para proteger mecanicamente o painel durante a operação. Contudo, é adicionado como tampa frontal uma chapa de vidro com baixo teor de ferro de 1 a 3 mm de espessura e um filme é usado como tampa na parte traseira, constituindo o painel como mostrado na Figura 8 (PENG; LU; YANG, 2013).

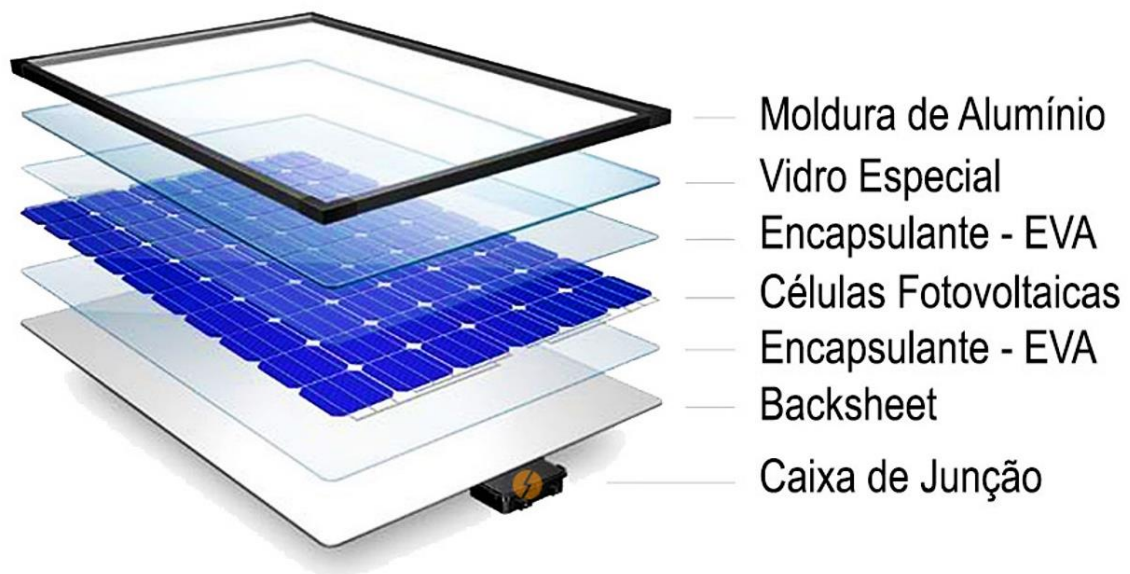


Figura 8: Representação das camadas de um painel fotovoltaico.
Fonte: Portal Solar (2019).

O painel “sanduiche” é então moldado por uma máquina através de pressão e calor, as bordas são corrigidas e as conexões isoladas. Por fim, é necessário adicionar a moldura de alumínio, que fortalece a placa solar e facilita a montagem, ficando pronta para ser testada e embalada.

2.4.3 Operação

A avaliação na etapa de operação deve levar em conta o perfil solar da região, assim como o tempo em que o sistema ficará em operação, a fim de estimar toda energia gerada ao longo da vida útil, bem como a energia consumida, considerando principalmente os reparos e a limpeza dos painéis.

Fatores como inclinação dos módulos fotovoltaicos, Irradiação solar, rendimento de inversores e componentes, influenciam significativamente na eficiência do sistema. Além disso, essa eficiência é bastante prejudicada quando há acúmulo de sujeira sobre as placas, tornando a limpeza periódica fundamental para manter níveis adequados de geração.

De acordo com Kannan et.al (2006), os fatores relacionados à orientação operacional, temperatura dos painéis e perdas decorrentes da eficiência dos inversores, são os parâmetros que têm maior influência no rendimento de um sistema fotovoltaico, em que o aumento da temperatura diminui a eficiência de conversão da energia solar para energia elétrica. Dessa forma, para adquirir eficiências adequadas é preciso implementar sistemas otimizados, de modo que o ângulo de inclinação dos painéis proporcione uma incidência da luz solar com os módulos FV, o mais próximo da perpendicular quanto possível (apud WONG; ROYAPOOR; CHAN, 2016).

O nível de irradiação solar é característico de cada região, interferindo diretamente no tempo de retorno energético (EPBT) de qualquer tecnologia fotovoltaica. Além da eficiência por m^2 de um sistema fotovoltaico, deve-se considerar o nível de irradiação solar da região onde a planta está instalada, que pode ser medida em $[KWh/m^2/ano]$, sendo considerados os valores médios de 950, 1350 e 1750 $KWh/m^2/ano$ como baixa, moderada e alta irradiação solar respectivamente (LALEMAN; ALBRECHT; DEWULF, 2011).

A Figura 9 mostra o perfil de radiação solar da Espanha representada pelo gradiente de cores, onde cada intensidade representa um nível específico de incidência solar:

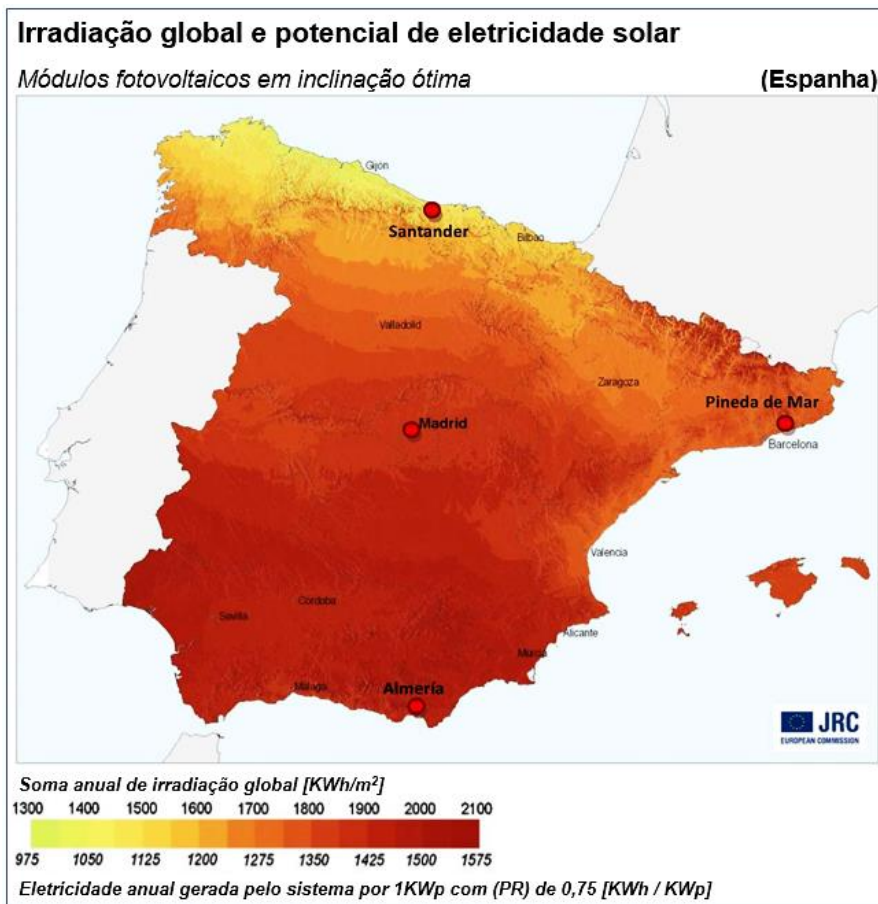


Figura 9: Perfil de irradiação solar na Espanha.
 Fonte: Adaptado de Sumper et al. (2011).

De fato, o cálculo da energia demandada durante a operação do sistema (E_{op}), não segue parâmetros médios, uma vez que depende principalmente do clima e das características ambientais do local onde os módulos estão instalados. Em vista disso, para evitar reduções drásticas de potência causadas pelo acúmulo de poeira, folhas ou qualquer matéria característica de uma região, é preciso fazer a limpeza periódica dos painéis, e a frequência desta atividade é dependente dessas características regionais (YU et al., 2017).

De região para região, além da frequência que será feita a limpeza dos módulos, também variam as técnicas, ferramentas, maquinário e os produtos utilizados nesta atividade, portanto, conseqüentemente os custos energéticos associados, também variam consideravelmente.

Para Guofu et.al (2016), os parâmetros que influenciam de forma mais significativa no resultado da energia consumida (E_{op}) durante a etapa de operação, são

decorrentes da limpeza dos painéis, manutenção ou substituição de equipamentos. Considerando que a vida útil de um inversor, dispositivo necessário para converter a corrente contínua (CC) gerada, em alternada (CA) para consumo, está entre 10 e 15 anos, logo podemos inferir que um sistema com uma expectativa de vida útil variando de 25 a 30 anos, precisará de pelo menos uma substituição de inversor (apud YU et al., 2017).

Usinas de grande porte estão sendo construídas em desertos, onde os níveis de irradiação solar são bastante elevados, aumentando significativamente a eficiência do sistema. No entanto, devido as frequentes tempestades de areia, os painéis podem ficar cobertos, causando uma diminuição drástica na potência de saída (KAWAMOTO; SHIBATA, 2015).

O nível de irradiação solar no Deserto do Saara alcança o valor de 2685 KWh/m²/ano, quase o dobro de um perfil de irradiação considerado alto em locais não desérticos. As taxas de deposição de poeira na superfície dos painéis, variam aproximadamente de 0,17 a 0,5 g/m²/dia, podendo se alterar de acordo o local e a época do ano (MAZUMDER et al., 2013).

Para remover uma partícula de poeira sem a utilização de água, a soma da força eletrostática e qualquer outra força externa, como a força do vento, deve ser maior que a soma da força gravitacional e da força de adesão entre as partículas e a superfície de vidro. Não é possível manipular a força gravitacional, porque o peso específico das partículas de poeira e a inclinação da placa a ser limpa é determinada pelo local onde a usina solar está instalada. Portanto, estes parâmetros servem de base para dimensionar os sistemas de repulsão de poeira através da impulsos elétricos específicos (KAWAMOTO; GUO, 2018).

O uso da eletrostática vem sendo utilizado como técnica na remoção de areia e poeira acumulada sobre os sistemas de grande escala, especificamente nas plantas localizadas em desertos, onde a água é indisponível. Telas transparentes, consistidas de filamentos de eletrodos paralelos transparentes e embutidos em um filme dielétrico, são ativados por tensão em fase, e com isso, as partículas de poeira presentes na superfície, ficam eletrostaticamente carregadas, e acabam sendo repelidas pela onda pulsante, gerada pelo campo elétrico aplicado (MAZUMDER et al., 2013).

Já a limpeza dos painéis utilizando água é feita em regiões que apresentam disponibilidade viável do elemento. Para se ter uma ideia, segundo Chen et.al (2012), o consumo médio de água é de 0,5 Kg/m² de painel higienizado, e a energia gasta

varia de acordo com o equipamento utilizado na realização da limpeza. Além disso, em regiões com escassez de água, bem como em desertos onde o líquido não está disponível, os custos variam de forma ainda mais acentuada (apud YU et al., 2017).

Como vimos, a determinação do valor referente a energia consumida durante o estágio de operação de um sistema FV, tem relativa complexidade, dado que os tipos de estruturas (móvel ou fixa), bem como os parâmetros envolvidos no cálculo variam consideravelmente entre as regiões analisadas. Por conta disso, essa variável é desconsiderada em quase todos os trabalhos realizados sobre estudos de LCA de sistemas fotovoltaicos, sendo raramente apresentada de forma superficial em algumas obras.

2.5 ENERGIA INCORPORADA NO PRODUTO

O cálculo da energia incorporada do produto durante o ciclo de vida, é dependente da soma de vários parâmetros distintos, como a energia demandada na extração de matéria-prima, purificação do silício, corte do lingote, fabricação do módulo FV, manufatura do BOS, transporte, desativação e descarte dos materiais. Entretanto, nesta etapa serão considerados apenas as variáveis correspondentes à produção de silício e fabricação dos módulos como um todo, considerando o tipo de processo e método utilizado.

A qualidade dos dados de um estudo sobre a energia incorporada em um produto, é diretamente proporcional ao nível de detalhamento de todos os processos diretos e indiretos, envolvidos na produção, manufatura, operação e descarte dos módulos FV. O sistema de manufatura é complexo, pois evolui tecnologicamente, fazendo com que os *inputs* de energia variem de acordo com a geografia local, devido a variações de energia de entrada nos processos, configurações tecnológicas específicas e distâncias de transporte (KOPPELAAR, 2017).

Tomando como exemplo os custos energéticos por unidade e os processos envolvidos na fabricação da tecnologia mono-Si, temos que, na etapa de purificação e processamento do silício, são necessários de 20 KWh pra produzir 1 Kg de MG-Si. A partir do silício metalúrgico é produzido o EG-Si, que demanda uma energia de 100 KWh/Kg no processo. O próximo passo consiste em derreter o silício de grau eletrô-

nico em um extrator de cristais Czochralski, onde é fabricado o lingote mono-Si, demandando uma energia de 290 KWh para cada Kg produzido (CUCCHIELLA; DADAMO, 2012).

Como em qualquer meio na indústria, a fabricação em larga escala de um produto, reflete em custos mais baixos de produção. Além do volume de produção, os fatores responsáveis pelas variações nos resultados dos estudos analisados, são dados pelos diferentes métodos e processos utilizados, bem como pela logística e características de disponibilidade de recursos de cada região. Desse modo, a redução da energia incorporada na manufatura dos painéis FV, depende principalmente de quatro fatores listados abaixo, que podem ou não serem adotados pelas empresas que fabricam (WONG; ROYAPOOR; CHAN, 2016).

1. Aumento da eficiência no processamento do silício, incluindo menor espessura do *wafer* FV, que conseqüentemente reduz a quantidade necessária de material no processo de produção;
2. Fabricação de silício com níveis de pureza mais baixos, substituindo processos que demandam quantidade elevadas de energia;
3. Utilização de melhores processos de cristalização, como o Siemens modificado, que consome menos energia para produção de silício monocristalino;
4. Redução, reutilização e reciclagem de materiais.

Considerando as características climáticas, bem como dados fornecidos pela indústria chinesa, relacionados a fabricação de módulos FV em larga escala e para geração distribuída, é possível resumir e observar a diferença dos parâmetros da LCA, que permitem prever o quanto as indústrias podem maximizar o potencial de energia, e conseqüentemente reduzir a emissão de gases do efeito estufa (GEE), como listados na Tabela 4 abaixo (HOU et al., 2016).

EPBTs (China 2014)				
	Sistemas em Larga Escala		Sistemas Distribuídos	
	<i>Multi-Si</i>	<i>Mono-Si</i>	<i>Multi-Si</i>	<i>Mono-Si</i>
EPBT [Ano]	1,6	1,7	2,1	2,3

Tabela 4: EPBTs de sistemas em larga escala e distribuídos.
 Fonte: Adaptado de Hou et al. (2016).

Uma outra alternativa para reduzir a energia incorporada do produto na etapa de fabricação, é a reciclagem dos sistemas FV que chegaram ao final de sua vida útil. No entanto, é preciso tratar os resíduos de forma adequada, a fim de garantir que os custos de produção dos módulos a partir de matéria-prima reciclada não excedam os custos da manufatura tradicional. Sendo assim, para uma produção mais sustentável, é fundamental começar pelos materiais que requerem menos energia na reciclagem, como esquadrias de alumínio, suporte de aço inoxidável, cabos e inversores (HOU et al., 2016).

A Tabela 5 abaixo, relaciona os custos em KWh por módulo produzido, de acordo com Garraín et al. (2015), onde é feita a comparação entre os custos de produção de *wafer* novo e fabricado a partir de material reciclado:

Consumo Energético na Produção de Wafers Novos e Reciclados		
Processos	Módulo Novo	Módulo Reciclado
Produção de <i>Wafer</i>	355	-
Processo de Reciclagem	-	92
Processamento de Células	66	66
Montagem do Módulo	38	38
Total	459	196

Tabela 5: Comparação de custos utilizando a reciclagem.
Fonte: Adaptado de Garraín et al. (2015) apud Wong et al. (2016)

De acordo com Müller et al. (2005), a rota de reciclagem tem um impacto ambiental muito menor se comparado com outros métodos de gestão de resíduos. A produção de novos *wafers* de silício a partir da extração mineral demanda um elevado consumo de energia, enquanto isso, se a fabricação partisse de silício reciclado, 70% da energia acumulada poderia ser recuperada, refletindo na diminuição de um EPBT em aproximadamente 50% (apud WONG; ROYAPOOR; CHAN, 2016).

A demanda inicial de energia no processamento e purificação do silício, bem como nos processos de produção de *wafer*, células e montagem dos módulos, é praticamente a mesma para as duas tecnologias, tanto do silício mono-Si quanto do multi-Si. Entretanto, a principal diferença está na etapa de cristalização, onde o lingote purificado é fundido para extração do silício em estrutura monocristalina, demandando um tempo maior e conseqüentemente maiores quantidade de energia (WONG; ROYAPOOR; CHAN, 2016).

De acordo com Alsema et al. (2000), a Tabela 6 lista os custos em [MJ/m²] de seis processos diferentes relacionados a etapa de manufatura, onde são classificados por tipo de tecnologia fabricada.

Demanda de Energia nas Etapas de Manufatura		
Processo	Energia em [MJ/m ²]	
	(multi-Si)	(mono-Si)
Produção de (MG-Si)	450	450
Purificação do Silício	1800	1800
Cristalização e Contorno	750	2300
Produção de <i>Wafers</i>	250	250
Processamento das Células	600	550
Montagem dos Módulos	350	350
<i>Total (sem moldura)</i>	4200	5700

Tabela 6: Energia demanda por etapa de fabricação.
Fonte: Adaptado de Alsema et al. (2000) apud Wong et al. (2016).

Muitos estudos de (LCA) para as tecnologias de silício monocristalino e multicristalino, são apresentados na literatura, entretanto com um número menos expressivo de obras publicadas antes do ano 2000, quando a tecnologia tinha um menor destaque entre as renováveis. Ainda assim, reunindo e fazendo a comparação destes estudos realizados ao longo dos anos, é possível observar o quanto a tecnologia tem avançado, constatando os resultados que indicam um futuro cada vez mais sustentável (LUDIN et al., 2018b).

Na maioria dos estudos a energia demandada nas fases de mineração de matéria-prima e processamento do silício, são tratados como parâmetro único, variando de acordo com o tipo de estrutura cristalina fabricada. Desse modo, para manufatura de módulos mono-Si, esses parâmetros podem ser classificados de acordo com energia consumida na produção de matéria-prima, produção do silício metalúrgico MG-Si, cristalização pelo processo Czochralski (Cz), produção de *wafers*, produção das células, montagem e moldura.

A energia demandada para fabricação de painéis multicristalinos é menor, uma vez que os módulos podem ser produzidos a partir dos lingotes de silícios de grau eletrônico EG-Si, evitando o elevado consumo de energia do processo Czochralski (Cz), utilizado para obter o silício de estrutura cristalina única.

Dessa forma, estudos referentes à energia incorporada do produto de diferentes regiões são apresentados pela bibliografia, incluindo revisões que através de algum método, tentam sintetizar e fazer a harmonização dos dados extraídos.

Referentes à energia incorporada do produto em cada processo de fabricação de módulos mono-Si, a Tabela 7 relaciona resultados publicados por diferentes autores ao longo dos anos, tendo como unidade de medida o [MJ/m²].

Energia Demandada na Manufatura de Módulos Mono-Si									
Autor	Ano	Mat. Prim. [MJ/m ²]	Prod. (MG-Si) [MJ/m ²]	Processo (CZ) [MJ/m ²]	Prod. Wafer [MJ/m ²]	Prod. Células [MJ/m ²]	Montagem [MJ/m ²]	Moldura [MJ/m ²]	Total (CED) [MJ/m ²]
Yue et al.	2014	1231,6	-	1436,8	307	308,8	615,8	-	3900
Fthenakis et al.	2012	-	446	1841	581	643	772	379	4662
Laleman et al.	2011	-	2397	432	-	-	684	-	3513
Lu and Yang	2010	-	162	1119	432	-	684	Sim	2397
De Wild – Scholten	2009	-	728	1266	-	389	477	Não	2860
Jungbluth et al.	2009	888	141	1208	562	595	466	Sim	3860
Alsema and De Wild-Scholten	2005	-	1759	2391	-	473	394	236	5253
Knapp and Jester	2001	-	3950	4100	-	-	-	-	8050
Alsema	2000	1800	450	2300	250	550	350	Não	5700
Alsema et al.	1998	1900	500	2400	250	600	350	Não	6000
Kato et al.	1998	797	298	9808	-	261	509	-	11673

Tabela 7: Custos por etapa na manufatura de módulos (mono-Si).
Fonte: Adaptado de Wong; Royapoor; Chan (2016).

Da mesma forma, apenas adequando os parâmetros para o segundo tipo de tecnologia, a Tabela 8 faz a relação dos custos energéticos medidos em [MJ/m²] referentes a cada estágio de manufatura de módulos multi-Si.

Energia Demandada na Manufatura de Módulos Multi-Si								
Autor	Ano	Mat. Prim. [MJ/m ²]	Prod. Wafer [MJ/m ²]	Prod. Células [MJ/m ²]	Montagem [MJ/m ²]	Moldura [MJ/m ²]	Outros [MJ/m ²]	Total (CED) [MJ/m ²]
Yue et al.	2014	1222,8	658,4	339	790	-	-	3010
Zhai and William	2010	1260	420	550	350	150	-	2730
Jungbluth et al.	2009	1030	968	544	523	Sim	-	3065
De Wild – Scholten	2009	1110	744	378	467	Não	-	2699
Alsema and De Wild-Scholten	2007	1400	550	400	500	270	-	3120
Pacca et al.	2007	-	3247	-	-	-	-	4322
Alsema and De Wild-Scholten	2005	1759	1078	473	276	236	118	3940
Battisti and Corrado	2005	3904	535,6	113,3	556,2	-	36	5150
Alsema and Nieuwlaar	2000	2200	1000	300	200	400	500	4600
Alsema et al.	1998	2250	1000	600	350	Não	-	4200
Kato et al.	1998	1562	717	353	709	-	39	3380

Tabela 8: Custos por etapa na manufatura de módulos (multi-Si).
Fonte: Adaptado de Wong; Royapoor; Chan (2016).

Local de instalação, tipo de montagem (telhado ou no solo), taxa de desempenho, eficiência, vida útil e energia demandada, são alguns dos parâmetros analisados na maioria dos estudos apresentados. Desse modo, ao reunir os trabalhos e realizar a sintetização dos dados, é possível obter um levantamento temporal de informações referentes aos sistemas FV, sendo os estudos de alguns dos principais autores apresentados na Tabela 9, referente à tecnologias mono-Si (LUDIN et al., 2018b).

Resultados da Revisão para Mono-Si								
Autores	Ano	Mont. do Sist.	Irradiação Solar (KWh/m²/ano)	(PR)	n_{conv} (%)	V. Útil (Ano)	CED (MJ/m²)	EPBT (Ano)
Kreith et al.	1990	Solo	N/D	N/D	8,5	30	6300 KWh/m ²	N/D
Wilson and Young	1996	Telh.	573–1253	0,8	12 - 14	20	4387 - 4970 KWh/m ²	7,4 - 12,1
Kato et al.	1998	Telh.	1427	0,81	12,2	20	3534	11,8
Dones and Frischknecht	1998	Telh.	1117	N/D	16,5	30	11,060 KWh/m ²	N/D
Alsema et al.	1998	Solo	1700	0,82	12,7	25	6000 - 13,900	4 - 8
Alsema	2000	Telh.	1700	0,8	14	30	5700	2,5 - 3,0
Knapp and Jester	2001	N/D	1800	0,8	N/D	30	8050	4,1
Jungbluth et al.	2005	Telh.	1117	N/D	165	30	N/D	3,0 - 6,0
Kannan et al.	2006	Telh.	1635	N/D	11,86	25	2,94 MJ/KWh	6,74
Alsema and Fthenakis V.	2006	Telh.	1700	0,75	N/D	30	N/D	2,7
Alsema and de Wild-Scholten	2006	Telh.	1700	0,75	14	30	5200	2,1
Alsema et al.	2006	Telh.	1700 e 1000	0,75	14	30	N/D	2,1 - 3,6
Jungbluth et al.	2007	Telh.	1117	0,75	14	30	N/D	3,3
Fthenakis et al.	2008	Solo	1700	0,8	14	30	N/D	N/D
Alsema et al.	2008	Telh.	1700	0,75	N/D	N/D	N/D	2,0
de Wild-Scholten	2009	Telhado	1700	0,8	14	30	2860	1,80
Ito et al.	2010	Solo	1702	0,8	N/D	30	41,947 GJ/MW	2,5
L.Lu and Yang	2010	Telh.	1600	N/D	13,3	20 - 30	2397	7,3
Ito et al.	2011	Solo	1725	N/D	14,3	30	3986	3,8
Fthenakis et al.	2012	Solo	1800	0,8	20,1	30	4662	1,4
Kim et al.	2014	Solo	1301,35	0,8	15,96	30	0,56 MJ/KWh	4,65
Chen et al.	2015	N/D	1139-2453	N/D	15,7	25	653,22	0,42 - 0,91
Hou G. et al.	2016	Solo	1600	0,75	17	25	1186,47	1,7
		Solo	1200	0,7	17	25	1123,11	2,3

Tabela 9: Resultados de EPBT para (mono-Si).
Fonte: Adaptado de Ludin et al. (2018)

Embora alguns autores listados na tabela acima, não tenham realizado o mesmo estudo referente a tecnologia multi-Si, resultados publicados por outros foram listados para substituir e compor o estudo desta tecnologia.

A Tabela 10 lista os resultados referentes a tecnologia (multi-Si), com o intuito de fazer a comparação entre as tecnologias:

Resultados da Revisão para Multi-Si								
Autores	Ano	Mont. do sist.	Irradiação Solar (KWh/m ² /ano)	(PR)	η_{conv} (%)	V. Útil (Ano)	CED (MJ/m ²)	EPBT (Ano)
Phylipsen and Alsema	1995	Telh.	1700	0,75	13	25	1145 KWh/m ²	2,7
Kato et al.	1998	Telh.	1427	0,81	12,8	20	1643	2,4
Dones and Frischnecht	1998	Solo	1117	N/D	14	30	18,770 KWh/m ²	N/D
Alsema et al.	1998	Solo	1700	0,87	12,1	25	4200 - 11,600	3,4
Alsema and Nieuwlaar	2000	Telh.	1700	0,75	15	30	4600	1,7
Alsema	2000	Solo	1700	0,75	13,2	30	4200	3,2
Ito et al.	2003	Solo	1702	0,78	12,8	30	3300	1,7
Battisti and Corrado	2005	Telh.	1530	0,8	10,7	30	5150	3,3
Hondo	2005	Telh.	1314	0,77	10	30	N/D	N/D
Fthenakis and Alsema	2006	Telh.	1700	0,75	N/D	30	N/D	1,7
Alsema and de Wild-Scholten	2006	Telh.	1700	0,75	13,2	30	4000	1,9
Alsema, Fthenakis and de Wild-Scholten	2006	Telh.	1700 e 1000	0,75	13,2	30	3200	1,7
Pacca et al.	2007	N/D	1359	N/D	12,9	20	4322	7,5
Raugei et al.	2007	Telh.	1700	0,75	14	20	N/D	2,4
Jungbluth et al.	2007	Telh.	1117	0,75	13,2	30	N/D	2,9
Alsema et al.	2008	Telh.	1700	0,75	N/D	N/D	N/D	1,7
Stoppato	2008	Telh.	1552	N/D	16	28	N/D	3,7
Glockner et al.	2008	Solo	1700	0,75	14,3	30	306 MJ/Kg	0,8
Ito et al.	2008	Telh.	2017	0,78	15,8	30	31,333 GJ/MW	1,9
De Wild-Scholten	2009	Solo	1700	0,75	13,2	30	2699	1,8
Nishimura et al.	2010	Solo	1701	0,78	N/D	30	2420	1,73
Ito et al.	2010	Solo	1702	0,78	N/D	30	33,068 GJ/MW	2
Ito et al.	2011	Solo	1725	N/D	13,9	30	2737	N/D
Desideri et al.	2012	Telh.	1552	0,8	14,4	25	N/D	4,17
N. Stylos et al.	2013	Solo	1797	0,67	14	30	9045 GJ com BOS	N/D
Yue et al.	2014	Solo	1700	0,75	13,2	30	3010	1,6
Kim et al.	2014	Solo	1310	0,8	14,9	30	0,44 MJ/KWh	3,68
Y. Fu et al.	2015	Solo	1263,6	0,8	16	25	2522	2,52 - 6,05
Hou G. et al.	2016	Solo	1600	0,75	17,5	25	1094,31	1,6
			1200	0,7	17,5	25	1034,41	2,1
Peishu Wu et al.	2017	Solo	2017	0,835	17,5	30	2927,04	2,3
Tan Y. S. et al.	2018	Telh.	1580	0,785	15,9 - 16,7	30	1037,6	1,01 - 1,11

Tabela 10: Resultados de EPBT para (multi-Si).
Fonte: Adaptado de Ludin et al. (2018).

A variação dos resultados entre os estudos apresentados é devido ao grande número de variáveis envolvidas nos cálculos realizados por cada autor, onde parâmetros são considerados por alguns e não por outros, bem como a irradiação solar e as características energéticas e ambientais de cada região.

3. METODOLOGIA DA PESQUISA

Este capítulo apresenta o método empregado na realização da pesquisa, bem como na construção do trabalho dentro das diretrizes da metodologia sistemática da revisão bibliográfica.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa é de natureza aplicada e de finalidade exploratória. Quanto aos procedimentos, enquadra-se como pesquisa bibliográfica de abordagem mista, ou seja, quantitativa e qualitativa.

A abordagem qualitativa foi feita a partir da definição dos métodos de avaliação, tipos de materiais, processos e parâmetros a serem considerados ao longo da vida útil do produto; enquanto a quantitativa, parte do levantamento de dados energéticos constituídos em todo processo.

Dados tanto quantitativos como qualitativos relacionados à matriz energética do planeta, e informações que foram relevantes para construção do trabalho, decorrem de análise bibliográfica e documental, através de fontes como:

- Ministério de Minas e Energia (MME);
- Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS);
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL);
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE);
- International Energy Agency (IEA);
- British Petroleum (BP);
- International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV);

O procedimento técnico utilizado para o desenvolvimento do trabalho, foi revisão sistemática da literatura, englobando, como principais fontes, artigos científicos, relatórios institucionais e corporativos, bem como, o acervo legal sobre o tema.

3.2 ETAPAS ADOTADAS PARA A ELABORAÇÃO DA PESQUISA

A busca pelo referencial teórico transcorreu de acordo com as seguintes etapas:

1. Identificação de bases de dados científicas; IEEE xplora; Scopus e Web of Science;
2. Localização de publicações;
3. Pesquisa de dados quantitativos;
4. Processo de filtragem e classificação do material encontrado, considerando o foco desta pesquisa;
5. Análise e classificação das publicações selecionadas.

A organização geral da pesquisa é representada através das tabelas e fluxogramas, que expressa as etapas de execução, cuja descrição é detalhada em sequência.

3.2.1 Revisão Sistemática da Literatura

O andamento da revisão foi realizado respeitando uma estrutura dividida em três principais fases: Planejamento; condução e publicação dos resultados. Com essa estrutura, na fase de planejamento foram discutidos parâmetros para identificar as necessidades e motivações que justificariam a realização do trabalho, definindo seus objetivos, estratégias de busca, base de dados e critérios para delimitar o tema, a fim de aumentar a especificidade do trabalho.

Na fase de condução, o conteúdo estudado foi construído, identificando os dados de acordo com os critérios e estratégias definidas na fase anterior, com o propósito de fazer a coleta e harmonização dos dados. Sendo assim, a publicação dos resultados, foi descrita contendo a análise e a avaliação dos dados publicados.

3.2.2 Definição de Eixos e Palavras-Chave

Por se tratar de um tema bastante abrangente, foram definidos cinco eixos para a classificação de vinte e duas palavras-chave, como apresentadas na Tabela 11, onde são divididas e classificadas de acordo com a sua categoria.

Eixos Definidos na Pesquisa					
	Eixo: 1 Energia	Eixo: 2 Produção	Eixo: 3 Manufatura	Eixo: 4 Operação	Eixo: 5 Balanço
Palavras-chave	Solar energy; Photovoltaic; Solar Panel.	Extraction; Critical material; Mining; Resource.	(Waste anage- ment Life cycle); Manufacturing; Modules; Processes; Recycling; Technology.	Life cycle; End-of-life; Cleaning ; Maintenance; Operation.	Embedded energy; Embodied energy; (Energy return on energy invested); Energy payback time.

Tabela 11: Classificação de eixos e palavras-chave.
Fonte: Autoria própria.

3.2.3 Combinações Entre Eixos e Palavras-Chave

As combinações das palavras-chave, foram realizadas entre os eixos 1,2,5; 1,3,5 e 1,4,5, ou seja, todas as palavras do eixo 1 foram combinadas individualmente com todas as palavras dos eixos 2 e 5 , 3 e 5 e finalmente com os eixos 4 e 5, pelo operador booleano “AND”, concluindo assim as buscas em cada base de dados.

3.2.4 Busca nas Bases de Dados

Foram analisadas e definidas três bases de dados, IEEE explore por se tratar de uma base de dados específicos ligados as engenharias, bem como as bases Scopus e Web of Science por conterem o maior acervo bibliográfico de periódicos. Sendo assim, os artigos retornados foram classificados e filtrados conforme o fluxograma da Figura 10, que apresenta resultados quantitativos e qualitativos individualmente por base de dados:

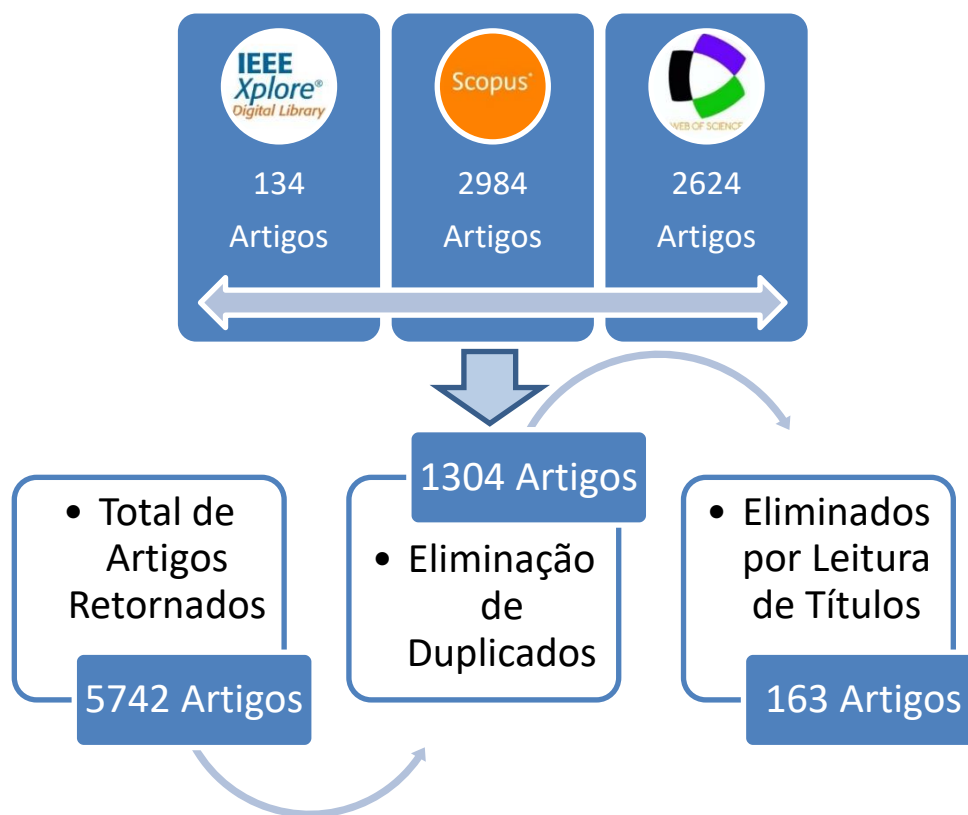


Figura 10: Resultados e classificação dos artigos retornados.
 Fonte: Autoria própria.

Com base nos resultados das buscas, um total de 5742 artigos foram retornados, sendo que através da ferramenta Mendeley, foram excluídas as obras repetidas, restando 1304 trabalhos, que tiveram seus títulos lidos, a fim de eliminar estudos que não se relacionavam com tema a ser estudado. Após a leitura de títulos, restaram 163 obras, que por sua vez, passaram por outros processos de filtragem.

3.2.5 Seleção dos Artigos

Após o processo de eliminação de artigos por leitura de títulos, que resultaram em 163 artigos, os mesmos, foram classificados e listados em ordem decrescente conforme a sua representatividade, ou seja, a partir do artigo com o maior número de citações no Google Scholar.

Para o próximo filtro, estipulou-se um corte em 95% do total de citações, resultando em 98 artigos, que por sua vez, passaram pelo filtro de leitura de resumos, restando 41 artigos que passaram pelo processo de leitura integral, em que foram eliminados 18 artigos, resultando em um portfólio de 23 obras. O processo de seleção e classificação dos artigos são apresentados através da Figura 11, correspondente ao fluxograma das etapas realizadas.

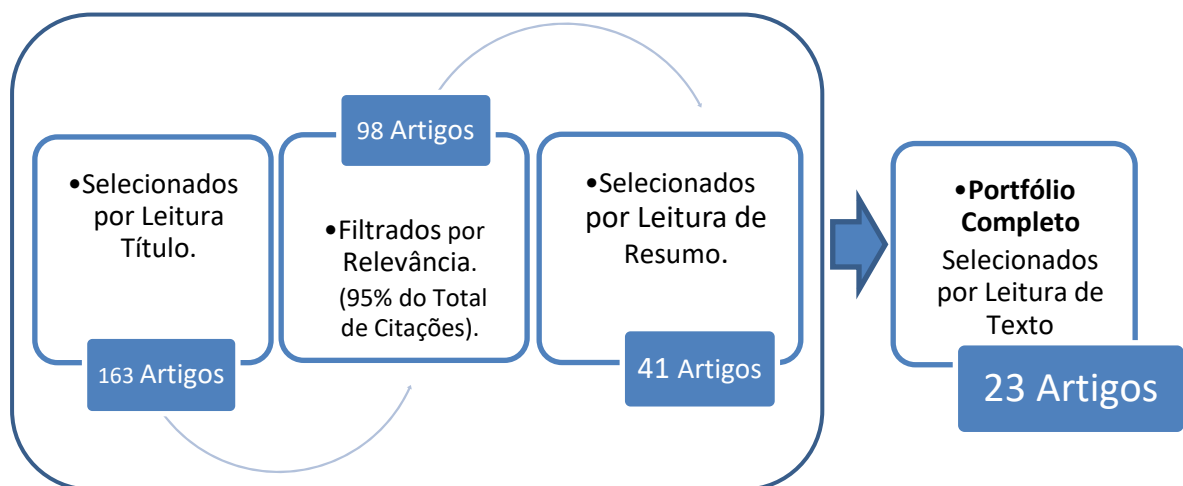


Figura 11: Fluxograma de classificação do portfólio integral.
Fonte: Autoria própria.

Com o portfólio integral definido, foi estabelecido um código para identificação de cada artigo individualmente. Dessa forma, as obras foram listadas e classificadas quanto a relevância, representada pelo número de citações na plataforma Google Scholar, ano de publicação e seus respectivos autores.

A Tabela 12 lista os autores das obras selecionadas do portfólio integral, classificados por código e número de citações correspondente:

Artigos do Portfólio Integral		
Cód. Artigo	Autor(es) / Ano	Nº de Citações no Google Scholar
1	(PENG; LU; YANG, 2013)	397
2	(FTHENAKIS; KIM, 2011)	364
3	(BHANDARI et al., 2015)	187
4	(LALEMAN; ALBRECHT; DEWULF, 2011)	117
5	(CUCCHIELLA; DADAMO, 2012)	96
6	(GERBINET; BELBOOM; LÉONARD, 2014)	80
7	(SUMPER et al., 2011)	80
8	(FU; LIU; YUAN, 2015)	79
9	(HOU et al., 2016)	76
10	(DESIDERI et al., 2012)	74
11	(KAWAMOTO; SHIBATA, 2015)	69
12	(MANN et al., 2014)	68
13	(MAZUMDER et al., 2013)	67
14	(GOE; GAUSTAD, 2014)	67
15	(FERRONI; HOPKIRK, 2016)	53
16	(KOPPELAAR, 2017)	36
17	(GÖRIG; BREYER, 2016)	31
18	(WONG; ROYAPOOR; CHAN, 2016)	29
19	(LUO et al., 2018)	24
20	(KAWAMOTO; GUO, 2018)	19
21	(SHARMA; TIWARI, 2013)	17
22	(YU et al., 2017)	16
23	(LUDIN et al., 2018)	16

Tabela 12: Descrição dos artigos do portfólio integral.
Fonte: Autoria própria.

3.3 INSTRUMENTOS DE COLETA E ANÁLISE DE DADOS

A revisão sistemática de literatura foi desenvolvida com base no método ProKnow-C (ENSSLIN et al., 2010) para a coleta, filtragem e seleção de referências, consultando-se, para isso, bases de dados científicos indexados no portal Periódicos Capes. Sendo assim, a pesquisa foi realizada por meio de acesso remoto, realizando os devidos procedimentos para autenticação, a fim de obter acesso ao acervo bibliográfico livre e exclusivo, disponível apenas para vinculados à instituição.

Como ferramenta, para a realização da análise, filtragem, classificação e organização das obras retornadas na etapa de pesquisa, foi utilizado o software Mendeley, que por sua vez, foi de fundamental importância no gerenciamento de referências, documentando todo processo de pesquisa, bem como, auxiliando na construção do trabalho como um todo. Conseqüentemente, a ferramenta simplificou a realização do trabalho de forma significativa, tanto no desenvolvimento dos processos envolvidos na definição do portfólio, quanto na realização da análise bibliométrica das obras.

3.3.1 Discussão do Portfólio

Através de tabelas construídas com base nos dados analisados e extraídos dos 23 artigos selecionados, foram listados alguns parâmetros retirados de estudos que foram publicados por diferentes autores, levando em consideração o ano de publicação e os respectivos parâmetros associados. A apresentação dos dados neste formato, simplifica a análise e possibilita fazer comparações entre os estudos, permitindo identificar o nível de convergência entre os resultados publicados por cada autor.

Sendo assim, a discussão do portfólio realizada neste trabalho, foi constituída de modo a estabelecer perfis de eficiência e sustentabilidade frente ao potencial de geração de eletricidade a partir de sistemas fotovoltaicos de silício cristalino. Desse modo, a análise busca identificar os limites que os sistemas fotovoltaicos podem alcançar no cenário tecnológico atual, de modo a estabelecer parâmetros que possibilitem avaliar a tecnologia, tanto do ponto de vista energético como do ambiental, fazendo breves comparações com outras fontes de energia renovável e de natureza fóssil.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados da pesquisa bibliográfica, apresentando a análise bibliométrica do portfólio, incluindo os dados que classificam os artigos de forma qualitativa e quantitativa de acordo com a relevância e representatividade da bibliografia selecionada.

Através da harmonização e sintetização dos dados extraídos das obras que constituem o portfólio de referência, neste item, também é feita a discussão de acordo com os objetivos do trabalho.

4.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Com o propósito de atribuir parâmetros quantitativos e qualitativos ao portfólio de referência, evidenciando as obras de acordo com a sua representatividade, a análise bibliométrica tem a função de classificar as obras, indicando fatores que servem de base para determinar a relevância de um trabalho, possibilitado avaliar níveis de confiabilidade de dados presentes em uma obra específica.

De posse dos vinte e três (23) artigos integrantes do portfólio de referência para realização deste trabalho, foi feita a análise e classificação bibliométrica das obras adotadas.

Uma das premissas para a realização da pesquisa, refere-se ao ano de publicação dos artigos científicos, em que foi estipulado um intervalo de 10 anos, ou seja, de 2009 até 2019, a fim de coletar uma bibliografia mais atualizada.

4.1.1 Classificação de Artigos por Número de Citações

Os dados a respeito do número de citações de cada trabalho, foram coletados na plataforma *Google Scholar*, listados de acordo com o código definido para cada artigo e classificados em ordem decrescente por número de citações, sendo representados através do gráfico de colunas apresentado pela Figura 12:

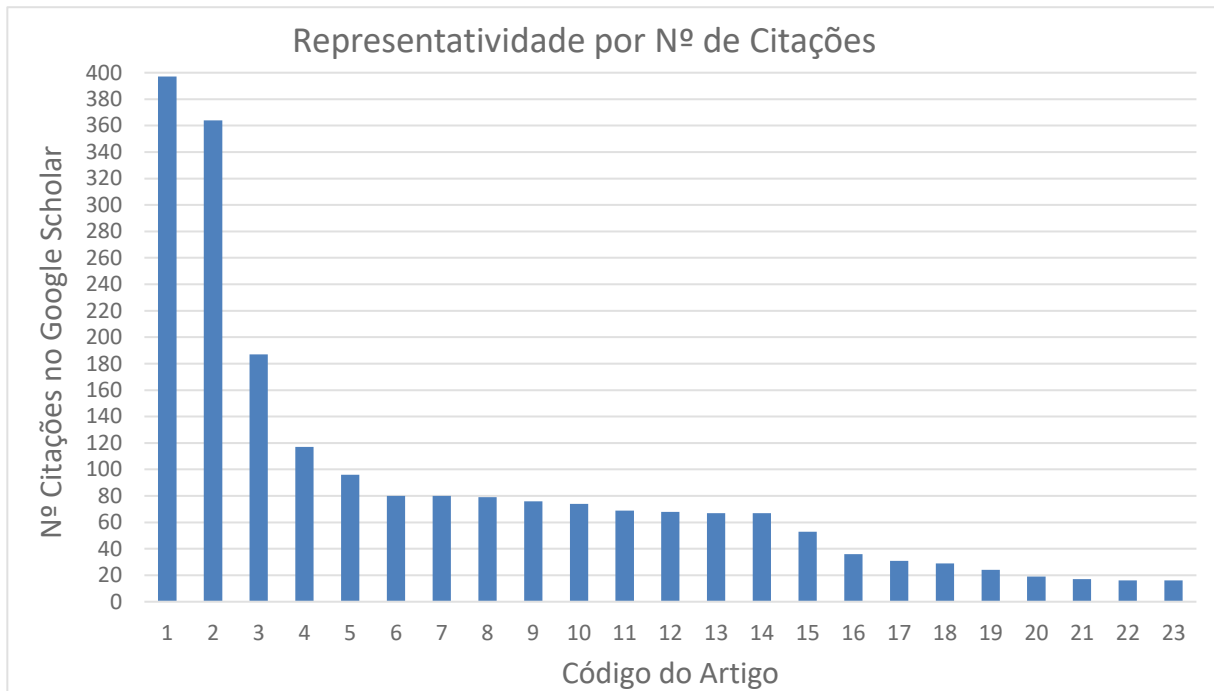


Figura 12: Representatividade dos artigos por número de citações.
Fonte: Autoria própria.

Com base nos resultados apresentados pelo gráfico acima, e levando em consideração o número de citações na plataforma *Google Scholar*, foram selecionados artigos com bastante representatividade, variando de trabalhos mais recentes com 16 citações, até obras publicadas a mais tempo, com 397 citações.

4.1.2 Representatividade nos Periódicos

Visando identificar o periódico que retornou o maior número de trabalhos relacionados a tema específico, outra classificação importante a ser realizada, diz respeito à representatividade em cada periódico. Dessa forma, com base nos 10 periódicos que forneceram a bibliografia de referência para a realização do trabalho, foi identificado e contabilizado o número de artigos encontrados em cada um deles, sendo representados através do gráfico de barras apresentado pela Figura 13.

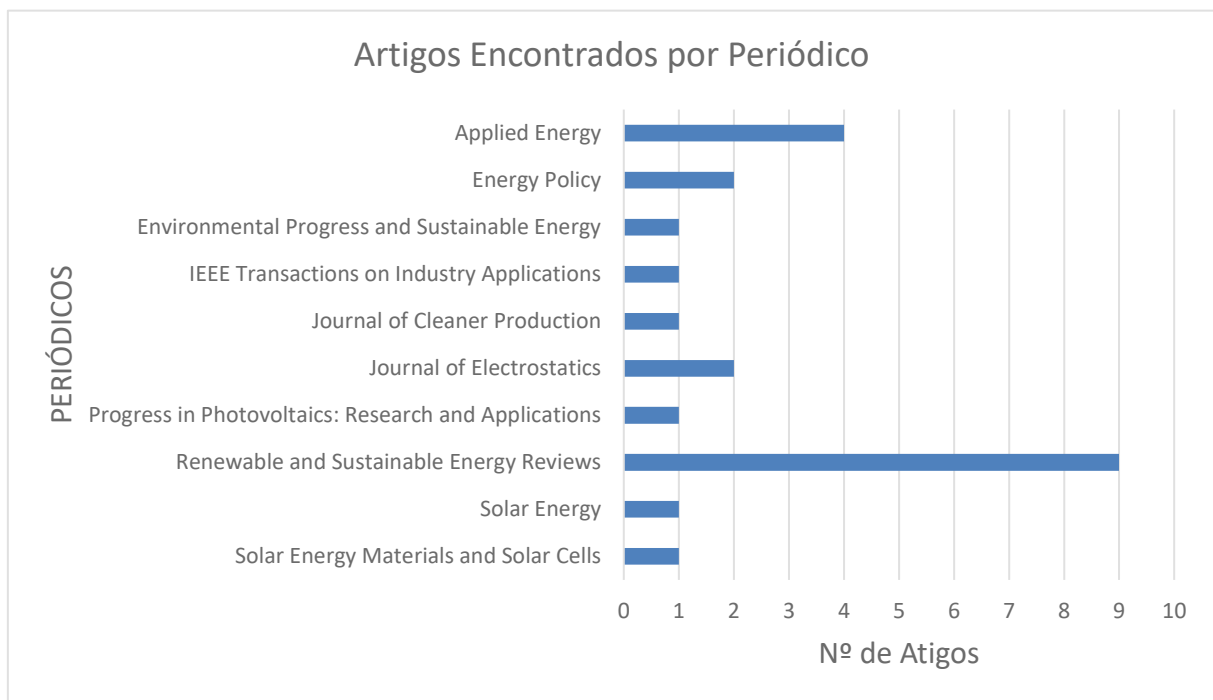


Figura 13: Representatividade dos periódicos por número de artigos.
Fonte: Autoria própria.

Os dados do gráfico de barras, revelam que 6 periódicos retornaram apenas um trabalho cada, enquanto o *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, retornou 9 dos 23 artigos do portfólio de referência, sendo o de maior representatividade, seguido pelo *Applied Energy* com 4 trabalhos, e por fim, com duas obras cada um, os periódicos *Energy Policy* e *Journal of Electrostatics*.

4.1.3 Autores de Maior Relevância

Os autores somados de todos os artigos pertencentes ao portfólio integral, totalizam 91 (noventa e um), sendo classificados por representatividade na participação de autoria entre os trabalhos.

A Tabela 13 relaciona os autores, classificando-os pelo número de participações nas autorias das obras integrantes do portfólio base, com o propósito de dar destaque aos responsáveis que tiveram maior relevância na produção do conteúdo relacionado ao tema do trabalho.

Autores	Nº de Obras
<i>Vasilis M. Fthenakis</i>	2
<i>Kawamoto, H</i>	2
<i>Peng, J; Lu, L; Yang, H; Kim, H C; Bhandari, Khagendra P; Collier, Jennifer M; Ellingson, Randy J; Apul, Defne S; Laleman, R; Albrecht, J; Dewulf, J; Cucchiella, F; Dadamo, I; Gerbinet, S; Belboom, S; Léonard, A; Sumper, A; Robledo-García, M; Villafáfila-Robles, R; Bergas-Jané, J; Andrés-Peiró, J; Fu, Y; Liu, X; Yuan, Z; Hou, G; Sun, H; Jiang, Z; Pan, Z; Wang, Y; Zhang, X; Zhao, Y; Yao, Q; Desideri, U; Proietti, S; Zepparelli, F; Sdringola, P; Bini, S; Shibata, T; Sander A. Mann; Mariska J. de Wild-Scholten; Wilfried G.J.H.M. van Sark; Wim C. Sinke; Mazumder, M; Horenstein, M N; Stark, J W; Girouard, P; Sumner, R; Henderson, B; Sadder, O; Hidetaka, I; Biris, A S; Sharma, R; Goe, M; Gaustad, G; Ferroni, F; Hopkirk, R J; Koppelaar, R.H.E.M; Goerig, Marzella; Breyer, Christian; Wong, J H; Royapoor, M; Chan, C W; Luo, W; Khoo, Y S; Kumar, A; Low, J S C; Li, Y; Tan, Y S; Wang, Y; Aberle, A G; Ramakrishna, S; Guo, B; Sharma, Rakhi; Tiwari, G N; Yu, Z; Ma, W; Xie, K; Lv, G; Chen, Z; Wu, J; Yu, J; Ludin, N A; Mustafa, N I; Hanafiah, M M; Ibrahim, M A; Asri Mat Teridi, M; Sepeai, S; Zaharim, A; Sopian, K.</i>	1

Tabela 13: Classificação dos autores por relevância.
Fonte: Autoria própria.

De acordo com os resultados da Tabela 13, é possível verificar que dois autores ficaram em destaque, por participarem de duas obras cada um, entre os trabalhos do portfólio base.

4.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Estatísticas indicam uma dominância futura da geração solar, devido a comparação de dados de crescimento entre as tecnologias renováveis. Levando em consideração o intervalo do ano 2000 a 2018, os sistemas de geração solar fotovoltaicos tiveram um aumento expressivo frente às outras de natureza renovável. Ainda que os sistemas de geração FV representem uma fatia relativamente pequena da matriz elétrica mundial, os níveis de crescimento podem indicar um futuro promissor da tecnologia, podendo ser observado através do gráfico representado pela Figura 14 abaixo (IEA, 2019).

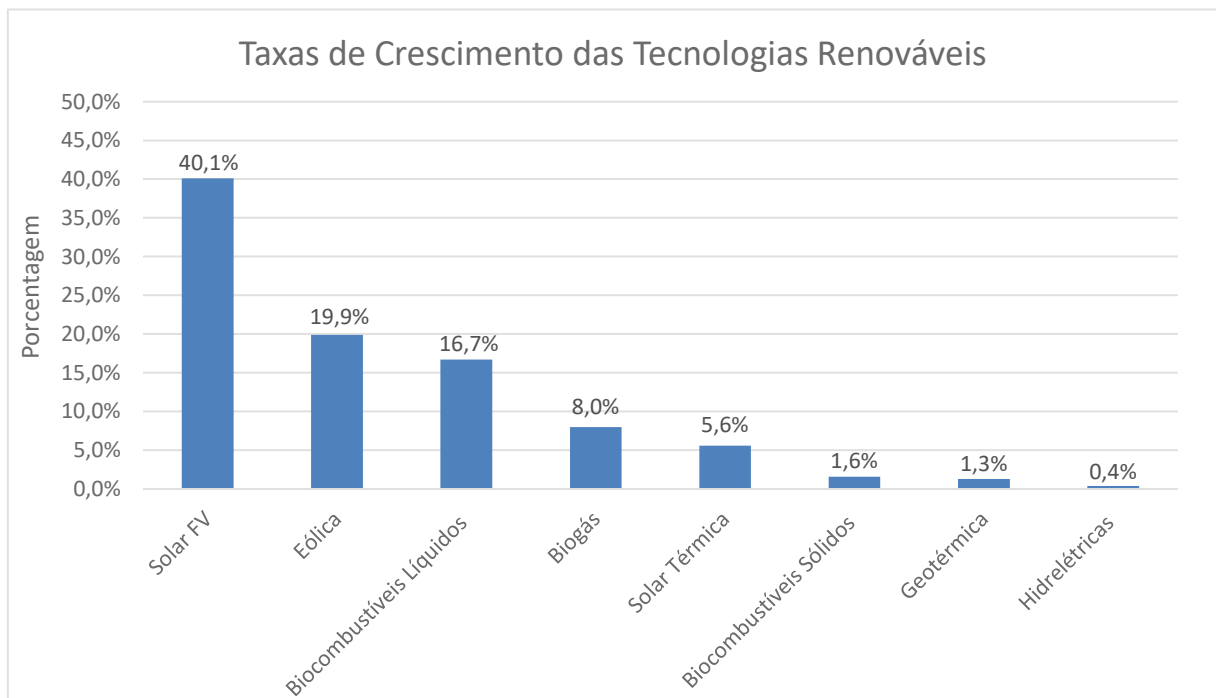


Figura 14: Crescimento médio das tecnologias renováveis, 2000 – 2018.
Fonte: Adaptado de (IEA, 2019).

Ao compararmos com tecnologias geradoras de natureza não renovável, os sistemas FV apresentam desvantagens no custo de produção e eficiência do sistema, uma vez que, para gerar uma potência instantânea equivalente a de um sistema térmico a base de carvão por exemplo, é preciso dispor de uma área significativamente elevada, bem como a consequente produção de muitos módulos solares. Entretanto, o custo de operação de um sistema térmico e o impacto ambiental causado, pode ser bastante elevado de acordo com o tipo de combustível fóssil utilizado.

Unidades geradoras a base de carvão, têm um custo de operação relativamente baixo se comparadas com as que utilizam derivados do petróleo, mas, por sua

vez, o dano causado ao meio ambiente é relativamente maior entre as fósseis. Muito embora as diferentes tecnologias tenham características que as diferenciam claramente, é preciso considerar o índice de confiabilidade de um sistema, levando em consideração o tempo diário em que um sistema permanece gerando energia elétrica.

Ao comparar um sistema FV com diferentes tecnologias e potências instaladas semelhantes, deve-se considerar a desvantagem da geração intermitente dos módulos solares. Sendo assim, para análise, discussão e comparação dos resultados, com a produção vinda de outras fontes, renováveis ou de natureza fóssil, é preciso estabelecer alguns parâmetros que diferenciam uma tecnologia da outra.

Embora a unidade de energia [KWp], utilizada na tecnologia fotovoltaica, seja representada pelo potencial de geração no melhor caso, ou seja, com parâmetros ótimos de irradiação solar e inclinação dos módulos, é possível fazer a comparação com diferentes unidades geradoras, considerando a potência instalada do sistema.

A indústria fotovoltaica vem crescendo exponencialmente, considerando a última década, alcançando uma potência instalada global de 50 GW em 2015. Com o contínuo avanço da tecnologia, os custos se tornam cada vez mais competitivos em comparação com outras fontes energéticas. Estima-se que, até 2050, a geração de energia FV atinja uma capacidade cumulativa de cerca de 4,7 TW, com uma representatividade de 16% na matriz global de eletricidade (LUO et al., 2018).

Com relação ao potencial de geração, a capacidade global de produção de células de silício cristalino e módulos fotovoltaicos, teve aumento estimado de 150 GWp no ano de 2018, totalizando 95% do mercado. Podendo ser comparado a nível de potência instalada, com aproximadamente uma usina hidrelétrica como a Itaipu Binacional e 75.0000 turbinas eólicas de 2 MW cada. Desse modo, considerando uma potência média de 300 Wp por módulo de 2 m² cada, o estimado aumento de produção mundial equivaleria a 50 milhões de painéis, que se fossem instalados juntos, cobriam uma área 350 Km², sendo equivalente a 80% da cidade de Curitiba - PR (ITRPV, 2019).

Dado ao potencial crescente de geração de eletricidade deduzido pelas estatísticas apresentadas, a revisão de estudos específicos sobre fontes de energia renovável, contribui com detalhamentos de parâmetros envolvidos em todo processo de implementação de uma tecnologia, podendo subsidiar políticas energéticas referentes a eficiência e sustentabilidade.

Com a reunião dos trabalhos e a sintetização dos dados de vários autores ao longo dos anos, as revisões mais recentes publicadas no ano de 2016 e 2018, presentes no portfólio, mostraram uma pequena diferença nos resultados de EPBT entre as tecnologias mono-Si e multi-Si. Muito embora, a fabricação de módulos mono-Si demande uma quantidade de energia maior, em contrapartida sua eficiência de conversão é maior, implicando tais resultados semelhantes, para os dois tipos de painéis fotovoltaicos.

Comparando as duas tecnologias, em algumas regiões os resultados de EPBT, para multi-Si mostrou-se maior que a mono-Si, já em outras, os dados apresentam valores menores. Essa variação, deve ao fato de a geração de eletricidade depender não só da eficiência do módulo como também do perfil local de irradiação solar.

A fabricação de módulos FV mono-Si, demandam uma energia significativamente maior, e mesmo com eficiência superior, de acordo com a irradiação solar característica da região de instalação, o sistema pode se tornar subutilizado. Em contrapartida, em lugares onde a irradiação solar é considerada alta, o rendimento do sistema pode ser compensado pela alta incidência solar nos painéis, o que também poderia servir de parâmetro na decisão de optar por uma tecnologia mais econômica.

De acordo com estudos publicados entre 2009 e 2014, Tabela 14 abaixo, apresenta um resumo de valores médios, relacionados a importantes parâmetros da LCA, fazendo a diferenciação entre as tecnologias mono-Si e multi-Si.

Valores Médios de Parâmetros da LCA		
Atributos	Mono-Si	Multi-Si
Eficiência	15,84%	14,11%
EPBT (ano)	3,52	2,33
Processo	Siemens e Czochralski	Siemens
<i>Wafers</i> Produzidos	56	52
Energia Incorporada	3532 [MJ/m ²]	2876 [MJ/m ²]
Espessura do <i>Wafer</i> [μm]	155	200

Tabela 14: Parâmetros médios da LCA, publicados entre 2009 e 2014.
Fonte: Adaptado de Wong; Royapoor; Chan (2016).

Uma das principais dificuldades em medir as entradas de energia (*inputs*), está no fato de haver diversas minas e fabricantes espalhados pelo mundo, tal que os diferentes parâmetros de logísticas, processos e perfis de recursos disponíveis em cada região, acaba resultando na variação dos resultados analisados.

Para que um sistema FV funcione e produza eletricidade, é necessário incluir inversores de frequência, que por sua vez, convertem corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA) para consumo. Sendo assim, entre os elementos de balanço do sistema (BOS), o inversor pode ou não estar adicionado como *imput* de energia incorporada, fazendo com que os dados tenham um nível maior de divergência.

De fato, optar por um tipo de tecnologia a ser empregada em uma determinada região não é trivial, pois como vimos ao longo do trabalho, a escolha que refletirá a melhor eficiência depende de muitas variáveis, começando pelo consumo energético requerido nas etapas de fabricação dos módulos. Desse modo, a utilização de métodos e processos de manufatura mais econômicos, bem como a reutilização e reciclagem de alguns materiais, podem diminuir significativamente a energia incorporada no produto, refletindo em EPBTs mais baixos.

Contudo é possível analisar com otimismo o perfil de sustentabilidade da tecnologia frente ao seu potencial de geração, mesmo que a representatividade em termos de potência seja ainda pequena comparada as tecnologias que utilizam combustíveis fósil, o crescente desenvolvimento em eficiência da tecnologia, bem como nos processos produtivos, podem indicar um futuro cada vez mais sustentável.

Tendo em vista o atual avanço no desenvolvimento de processos produtivos mais eficientes, acarretando em custos de manufatura cada vez mais baixos, para resultados de EPBTs mais próximos da realidade, é preciso considerar os estudos mais recentes, uma vez que, os mesmos têm uma probabilidade maior de conter dados e parâmetros mais atualizados de acordo com as tendências da indústria.

A Tabela 15 apresenta resultados de EPBT, relacionados à tecnologia mono-Si, relacionando com os respectivos parâmetros de produção sistemas em larga escala (LE) e distribuídos, seguidos pelos fatores de eficiência e tipo de instalação.

EPBTs para Mono-Si (2014 – 2018)							
Autor (es)	Ano	Sistema Tipo/Local	Irradiação Solar [KWh/m²/ano]	n_{conv} [%]	(PR)	EPBT [Ano]	Referências
Hou et al.	2014	LE	1600	17	0,75	1,7	(HOU et al., 2016)
Hou et al.	2014	Dist.	1200	17	0,70	2,3	(HOU et al., 2016)
Yue et al.	2014	Telh.	1700	14	0,75	2,4	(YU et al., 2017)
Chen et al.	2015	N/D	1139	15,7	N/D	0,91	(LUDIN et al., 2018b)
Hou G. et al.	2016	Solo	1600	17	0,75	1,7	(LUDIN et al., 2018b)
Hou G. et al.	2016	Solo	1200	17	0,70	2.3	(LUDIN et al., 2018b)

Tabela 15: Parâmetros de EPBT para tecnologia Mono-Si.
Fonte: Autoria própria.

Um dos motivos pelos quais a tecnologia mono-Si tem menor representatividade no mercado de painéis FV de silício cristalino, frente aos sistemas multi-Si, é pelo fato de requerer uma energia significativamente maior no estágio de fabricação. Isso acaba implicando, em um menor número de estudos sobre a estrutura única de cristais. Em contra partida, os sistemas FV multi-Si, são mais baratos de se produzir, sendo mais populares e contendo uma bibliografia com número relativamente maior de estudos publicados.

A Tabela 16 descreve os valores de EPBT atrelados com os parâmetros de escala de produção e tipo de instalação, seguido pelas variáveis que representam a irradiação solar, eficiência do módulo e rendimento do sistema para a tecnologia multi-Si.

EPBTs para Multi-Si (2014 - 2018)							
Autor (es)	Ano	Sistema Tipo/Local	Irradiação Solar [KWh/m²/ano]	n_{conv} [%]	(PR)	EPBT [Ano]	Referências
Hou et al.	2014	LE	1600	15	0,75	1,6	(HOU et al., 2016)
Hou et al.	2014	Dist.	1200	15	0,70	2,1	(HOU et al., 2016)
Yue et al.	2014	Telh.	1700	13,2	0,75	1,6	(WONG; ROYAPOOR; CHAN, 2016)
Y. Fu et al.	2015	Solo	1263,6	16	0,80	2,52	(LUDIN et al., 2018b)
Hou G. et al.	2016	Solo	1600	17,5	0,75	1,6	(LUDIN et al., 2018b)
Hou G. et al.	2016	Solo	1200	17,5	0,70	2,1	(LUDIN et al., 2018b)
Peishu Wu et al.	2017	Solo	2017	17,5	0,835	2,3	(LUDIN et al., 2018b)
Tan Y. S. et al.	2018	Telh.	1580	16,7	0,785	1,01	(LUDIN et al., 2018b)

Tabela 16: Parâmetros de EPBT para tecnologia Multi-Si.
Fonte: Autoria própria.

Considerando os resultados dos estudos publicados a partir de 2014, como apresentados nas tabelas 15 e 16, é possível observar que os valores de EPBT variaram entre 0,91 e 2,4 anos para os sistemas mono-Si, enquanto para tecnologia multi-Si, os tempos de retorno energético tiveram uma variação de 1,01 até 2,52 anos. Entretanto, apesar do melhor resultado na variação de EPBT dos sistemas monocristalinos, se levarmos em consideração a maioria dos estudos publicados, analisando de forma individual cada caso específico, esses valores não servem de parâmetros para escolha de uma tecnologia que refletirá a melhor eficiência.

De acordo com a maioria das obras analisadas, o custo energético adicional e relativamente elevado na fabricação de sistemas mono-Si, a fim de adquirir maior eficiência na geração de eletricidade, não reflete em melhores resultados de EPBT, uma vez que o parâmetro de energia embutida no produto, tem maior influência do

que eventuais ganhos de eficiência nos módulos fotovoltaicos (BHANDARI et al., 2015).

Embora exista algumas divergências entre os estudos analisados, a tecnologia de sistemas solares mostram indicativos de grandes melhorias futuras, tendo em vista o atual crescimento de eficiência, tanto na geração de eletricidade, como nos processos de fabricação de módulos fotovoltaicos. Por conseguinte, estima-se para o ano de 2020, que o EPBT de sistemas de silício cristalino pode ser reduzido para até 0,5 anos ou 0,7 anos, quando incluído os parâmetros de energia demandada pelo BOS do sistema (MANN et al., 2014).

5. CONCLUSÃO

De modo geral, mesmo com um número significativo de obras publicadas sobre a AVC de sistemas PV, esta revisão apresenta algumas incertezas, devido a carência de detalhes publicados nos estudos, a respeito da metodologia e *inputs* de energia considerados nos cálculos.

Os valores publicados a respeito do requisito de energia primária e EPBT de diferentes sistemas FV, variam significativamente de estudo para estudo, devido a variações de fatores, como tipo de célula solar, tipo de módulo, processos de fabricação, perfis climáticos de cada região, métodos utilizados para estimas entre outros.

Entre as obras mais recentes, nenhuma apresentou o tempo de retorno de energia (EPBT), superior ao tempo de vida útil do produto, que variou entre 25 e 30 anos. Entre estudos de 2014 a 2018, os resultados de EPBT não passaram de 2,52 anos, sendo o pior caso identificado em um estudo de 2015, referente a tecnologia multicristalina.

As consequentes emissões de gases do efeito estufa, provenientes dos processos produtivos, tornam os estágios de produção e manufatura de módulos FV, responsáveis pela parcela que contribui de forma mais significativa no parâmetro que representa o potencial de aquecimento global da tecnologia. Mesmo que a fabricação de painéis solares acarretem impactos negativos para o planeta, no contexto ambiental, as tecnologias FV estudadas, se mostraram sustentáveis e favoráveis em relação as taxas de (GEE) emitidas por unidade de potência gerada, uma vez que, de modo geral, causam um impacto significativamente menor, se comparadas com a maioria das fontes de natureza fóssil.

Além da utilização de processos mais econômicos de produção, que minimizam os impactos ambientais, a indústria tem feito avanços no sentido de aumentar a eficiência de manufatura da tecnologia, reduzindo a espessura do *wafers* de silício, diminuindo as perdas no corte, reutilizando e reciclando alguns materiais. Muito embora os estudos apresentem indicativos que rumam para uma maior sustentabilidade, os mesmos carecem ainda de muitas informações de forma detalhada a respeito de técnicas e processos, bem como de parâmetros de custo energético correspondentes a cada etapa de fabricação.

Embora a maioria das obras estudadas apresentem equações e diferentes formas de se calcular os parâmetros de energia, a fim de obter resultados de EPBT

mais próximos da realidade, nem sempre todos esses parâmetros são considerados. Por consequência, o nível de complexidade da análise e comparação das tecnologias estudadas entre os trabalhos do portfólio, mostrou-se relativamente elevado.

Enquanto alguns trabalhos consideram o parâmetro BOS, somado à energia de entrada na produção dos módulos, outros desprezam. Além do parâmetro BOS, os *inputs* que correspondem a energia demandada na operação, bem como fatores de conversões, são inclusos ou não nos cálculos entre as obras analisadas. Em vista disso, a carência de estudos realizados de forma semelhante, considerando os mesmos parâmetros e apresentando o mesmo nível de detalhamento dos processos, dificultou algumas conclusões, devido à complexidade exigida na harmonização e síntese dos dados.

Entre os artigos do portfólio que foram publicados mais recentemente, todos os autores consideraram pelo menos 20 anos de vida útil para sistemas fotovoltaicos. Sendo assim, podemos concluir que de fato, a tecnologia FV, trata-se de uma fonte renovável de eletricidade e com índices crescentes de sustentabilidade.

Apesar de requerer uma quantidade relativamente elevada de minério de ferro e alumínio por KWh gerado, em geral, as características dos sistemas solares, se mostraram bastante interessantes do ponto de vista ambiental, uma vez que, através de um processo adequado de reciclagem, estes materiais podem voltar a compor os sistemas fotovoltaicos de geração.

A análise do estudo como um todo, revelou uma elevada abrangência de parâmetros e processos envolvidos no ciclo de vida de um sistema fotovoltaico, cabendo como sugestão, a realização de estudos específicos e relacionados a cada etapa de produção e manufatura dos módulos, tal que, de forma individual, apresentem análises mais detalhadas e resultados mais precisos. Além disso, os resultados obtidos através desta análise, identificou a importância de se realizar estudos complementares sobre reciclagem de materiais e gases do efeito estufa (GEE), inerentes aos processos produtivos da tecnologia fotovoltaica.

REFERÊNCIAS

ANEEL. Matriz de Energia Elétrica. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 2019. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: Abril 2019.

BP. Demand and supply of fuels. **British Petroleum**, 2019. Disponível em: <<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook/demand-by-fuel.html>>. Acesso em: Abril 2019.

BP. Renewable energy. **British Petroleum**, 2019. Disponível em: <<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/renewable-energy.html>>. Acesso em: Abril 2019.

BP. Renewables. **British Petroleum**, 2019. Disponível em: <<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook/demand-by-fuel/renewables.html>>. Acesso em: Abril 2019.

ELETRICISTA CONSCIENTE. Tipos e características de células fotovoltaicas. **Eletricista Consciente**, 2017. Disponível em: <www.eletricistaconsciente.com.br/pontue/fasciculos/2-celulas-e-modulos-fotovoltaicos/geracao-tipos-e-caracteristicas-de-celulas-fotovoltaicas/>. Acesso em: 22 Outubro 2019.

IEA. Statistics. **International Energy Agency**, 2018. Disponível em: <<https://www.iea.org/statistics/?country=WORLD&year=2016&category=Electricity&indicator=ElecConsPerCapita&mode=chart&dataTable=INDICATORS>>. Acesso em: Abril 2019.

IEA. Statistics. **International Energy Agency**, 2019. Disponível em: <www.iea.org/statistics/renewables/>. Acesso em: 05 Novembro 2019.

ITRPV. **International Technology Roadmap for Photovoltaic**. [S.l.]. 2019.

MINASILICIO. Fotos. **MinaSilicio**, 2019. Disponível em: <www.minasilicio.com.br/fotos.asp>. Acesso em: 22 Outubro 2019.

MME. Publicações e Indicadores. **Ministério de Minas e Energia**, 2016. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial?p_p_id=3&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&_3_struts_action=%2Fsearch%2Fsearch&_3_redirect=%2F&_3_keywords=solar&_3_groupId=0>. Acesso em: Abril 2019.

PORTAL SOLAR. Como Funciona o Painel Solar Fotovoltaico – Placas Fotovoltaicas. **Portal Solar**, 2019. Disponível em: <www.portalsolar.com.br/como-funciona-o-painel-solar-fotovoltaico.html>. Acesso em: 22 Outubro 2019.

SUNFLOWER. Painel solar. **SUNFLOWER RENEWABLE ENERGY**, 2019. Disponível em: <www.sunflower-solar.com/index_pt.php?act=content&scheduler_id=2029>. Acesso em: 22 Outubro 2019.

BHANDARI, K. P. et al. Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: A systematic review and meta-analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, p. 133–141, 2015.

CUCCHIELLA, F.; DADAMO, I. Estimation of the energetic and environmental impacts of a roof-mounted building-integrated photovoltaic systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 7, p. 5245–5259, 2012.

DAVIDSSON, S.; HÖÖK, M. Material requirements and availability for multi-terawatt deployment of photovoltaics. **Energy Policy**, v. 108, n. December 2016, p. 574–582, 2017.

DESIDERI, U. et al. Life Cycle Assessment of a ground-mounted 1778kWp photovoltaic plant and comparison with traditional energy production systems. **Applied Energy**, v. 97, p. 930–943, 2012.

FERRONI, F.; HOPKIRK, R. J. Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation. **Energy Policy**, v. 94, p. 336–344, 2016.

FTHENAKIS, V. M.; KIM, H. C. Photovoltaics: Life-cycle analyses. **Solar Energy**, v. 85, n. 8, p. 1609–1628, 2011.

FU, Y.; LIU, X.; YUAN, Z. Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 86, p. 180–190, 2015.

GERBINET, S.; BELBOOM, S.; LÉONARD, A. Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 747–753, 2014.

GOE, M.; GAUSTAD, G. Strengthening the case for recycling photovoltaics: An energy payback analysis. **Applied Energy**, v. 120, p. 41–48, 2014.

GÖRIG, M.; BREYER, C. Energy learning curves of PV systems. **Environmental Progress and Sustainable Energy**, v. 35, n. 3, p. 914–923, 2016.

HOU, G. et al. Life cycle assessment of grid-connected photovoltaic power generation from crystalline silicon solar modules in China. **Applied Energy**, v. 164, p. 882–890, 2016.

KAWAMOTO, H.; GUO, B. Improvement of an electrostatic cleaning system for removal of dust from solar panels. **Journal of Electrostatics**, v. 91, p. 28–33, 2018.

KAWAMOTO, H.; SHIBATA, T. Electrostatic cleaning system for removal of sand from solar panels. **Journal of Electrostatics**, v. 73, p. 65–70, 2015.

KOPPELAAR, R. H. E. M. Solar-PV energy payback and net energy: Meta-assessment of study quality, reproducibility, and results harmonization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 1241–1255, 2017.

- LALEMAN, R.; ALBRECHT, J.; DEWULF, J. Life cycle analysis to estimate the environmental impact of residential photovoltaic systems in regions with a low solar irradiation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 1, p. 267–281, 2011.
- LUDIN, N. A. et al. Prospects of life cycle assessment of renewable energy from solar photovoltaic technologies: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 96, n. July, p. 11–28, 2018a.
- LUDIN, N. A. et al. Prospects of life cycle assessment of renewable energy from solar photovoltaic technologies: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 96, p. 11–28, 2018b.
- LUO, W. et al. A comparative life-cycle assessment of photovoltaic electricity generation in Singapore by multicrystalline silicon technologies. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 174, n. January 2017, p. 157–162, 2018.
- MANN, S. A. et al. The energy payback time of advanced crystalline silicon PV modules in 2020: A prospective study. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 22, n. 11, p. 1180–1194, 2014.
- MAZUMDER, M. et al. Characterization of Electrodynamic Screen Performance for Dust Removal from Solar Panels and Solar Hydrogen Generators. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 49, n. 4, p. 1793–1800, 2013.
- PENG, J.; LU, L.; YANG, H. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 255–274, 2013.
- SHARMA, R.; TIWARI, G. N. Life cycle assessment of stand-alone photovoltaic (SAPV) system under on-field conditions of New Delhi, India. **ENERGY POLICY**, v. 63, p. 272–282, 2013.
- SUMPER, A. et al. Life-cycle assessment of a photovoltaic system in Catalonia (Spain). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 8, p. 3888–3896, 2011.
- WONG, J. H.; ROYAPOOR, M.; CHAN, C. W. Review of life cycle analyses and embodied energy requirements of single-crystalline and multi-crystalline silicon photovoltaic systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 608–618, 2016.
- YU, Z. et al. Life cycle assessment of grid-connected power generation from metallurgical route multi-crystalline silicon photovoltaic system in China. **Applied Energy**, v. 185, p. 68–81, 2017.