

BRUNO LA VALLE

**ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DE PAINÉIS SOLARES EM SILÍCIO
MONOCRISTALINO**

SÃO PAULO

2019

BRUNO LA VALLE

**ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DE PAINÉIS SOLARES EM SILÍCIO
MONOCRISTALINO**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Engenheiro de
Materiais

Área de Concentração:
Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Cesar Roberto de Farias
Azevedo

SÃO PAULO

2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na publicação

La Valle, Bruno

Análise de Ciclo de Vida de Painéis Solares em Silício Monocristalino /
B. La Valle -- São Paulo, 2019.

61 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Análise de Ciclo de Vida 2.Painel Fotovoltáico 3.Silício Monocristalino
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, que me concedeu inúmeros momentos de aprendizado e crescimento, tanto pessoal quanto profissional. Sou grato em especial ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais e a seus docentes e funcionários, por proporcionarem uma experiência acadêmica sem igual e sempre me acolherem de braços, corações e mentes abertas.

Agradeço aos meus colegas de classe e aos membros participantes do Centro Moraes Rêgo, por estarem sempre ao meu lado, fosse nos momentos incríveis ou nos desagradáveis e, principalmente, por tornarem essa jornada um pouco menos difícil.

Agradeço ao Prof. César, por desde o início mostrar interesse neste trabalho, estando sempre disposto a me aconselhar e guiar. Sou grato pela paciência e compreensão que ele demonstrou ao me orientar nesses últimos dois semestres.

Agradeço à Anna Carolina, por me dar forças nos momentos mais difíceis, sempre com o coração cheio de amor, paciência e muito carinho. Obrigado por ser minha companheira de aventuras e me motivar sempre, independentemente da situação.

Agradeço à minha mãe Daniele, por ser a pessoa mais batalhadora e inteligente que já tive o privilégio de conhecer. Sou extremamente grato por todo amor e apoio que me deu. Tenho consciência do quanto trabalhou e lutou para me dar as oportunidades que tive, e por isso sou eternamente grato. Espero, do fundo do meu coração, que um dia possa te fazer orgulhosa.

“O futuro pertence àqueles que acreditam na beleza de seus sonhos”

Eleanor Roosevelt

RESUMO

Métodos limpos de geração de eletricidade cresceram consideravelmente nos últimos anos, levantando questões sobre como essas energias renováveis mitigam a emissão de CO₂. Este trabalho analisou o ciclo de vida de um painel solar fotovoltaico de silício monocristalino para entender e quantificar os impactos da geração de energia solar no Brasil, Austrália, Alemanha e Canadá. A avaliação do ciclo de vida (ACV) do painel solar foi realizada usando a ferramenta Eco-Audit do software Cambridge Engineering Selector. A composição do painel fotovoltaico utilizado para a ACV foi fornecida pela Agência Internacional de Energia Renovável. Foram obtidos os tempos de retorno da energia e de mitigação de CO₂ da energia solar, e os resultados foram discutidos em termos do mix de energia e do nível médio de insolação de cada país. Os resultados mostraram que, independentemente do mix de energia e dos níveis de insolação, o painel monocristalino de silício retorna a energia consumida durante sua produção em no máximo 3 anos e mitiga todo o CO₂ produzido em 6,6 anos no máximo. No Brasil, a mitigação de CO₂ ocorre mais lentamente que a média do mundial, mas, independentemente, painéis solares são uma opção muito mais limpa quando comparada à energia termoelétrica.

Palavras-chave: análise de ciclo de vida; painel fotovoltaico, silício monocristalino; *on-grid*; matriz energética; mitigação de CO₂, tempo de retorno energético.

ABSTRACT

Clean methods of electricity generation have grown considerably in recent years, raising questions concerning how these renewable energies mitigate the emission of CO₂. This work analyzed the life cycle of a monocrystalline silicon photovoltaic solar panel to understand and quantify the impacts of solar energy generation in Brazil, Australia, Germany and Canada. Life cycle assessment (LCA) of the solar panel was conducted using the Eco-Audit tool of the Cambridge Engineering Selector software. The composition of the photovoltaic panel used for the LCA was provided by the International Renewable Energy Agency. The energy payback and CO₂ mitigation times of solar energy were obtained, and the results were discussed in terms of the energy mix and average insolation level of each country. The results showed that, regardless of the energy mix and insolation levels, the monocrystalline silicon panel returns the energy consumed during its production in a maximum of 3 years and mitigates all the CO₂ produced in a maximum of 6.6 years. In Brazil, CO₂ mitigation occurs more slowly than the globe's average, but regardless, solar panels are a much cleaner option when compared to thermoelectric energy.

Keywords: life cycle analysis; photovoltaic panel; monocrystalline silicon; on-grid; energy mix; CO₂ mitigation; energy payback time.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Geração elétrica por fonte, entre os anos de 1973 e 2017	6
Figura 2: Produção de eletricidade solar fotovoltaica, entre 2005 e 2017, em TWh ...	7
Figura 3: Preço médio, em R\$/Wp, de geração elétrica fotovoltaica, dividida por sistemas, entre 2013 e 2017	8
Figura 4: Visualização de uma impureza doadora (fósforo) e outra aceitadora (boro)	12
Figura 5: Difusão de átomos de Cobre e Níquel	13
Figura 6: Geração da Zona de Carga Especial e do Campo Elétrico Interno.....	14
Figura 7: Geração de Condutores de carga em semicondutores do tipo P e N	17
Figura 8: Diagrama de Energia de uma junção p-n.....	18
Figura 9: Estrutura básica de uma célula fotovoltaica em silício	19
Figura 10: Esquema básico de um sistema gerador <i>on-grid</i>	22
Figura 11: Visualização das fases de uma ACV e a interdependência entre elas.....	25
Figura 12: Fluxo do processo de produção de sistemas baseados em silício, utilizado durante a análise de inventário na ACV	28
Figura 13: Tempos de retorno energético para painéis solares em silício policristalino em diversos países	30
Figura 14: Tela inicial do CES Edupack 2016	31
Figura 15: Tela principal do <i>Eco Audit</i> e suas principais entradas de dados	32
Figura 16: Diagrama Ternário de matrizes energéticas de alguns países	34
Figura 17: Esquematização do processo de produção de um painel fotovoltaico genérico	37
Figura 18: Lista de Materiais utilizados como entrada no <i>software</i> , baseado na composição da Irena (2016).....	39
Figura 19: Consumo de energia por fase	42
Figura 20: Geração de CO ₂ por fase do ciclo de vida	43
Figura 21: Contribuição de cada operação para a emissão de CO ₂ , como porcentagem de GWP = 80kg CO ₂ /painel.....	49
Figura 22: resultados de tempo de retorno e emissão de CO ₂ para sistema de silício monocristalino em localidades com diferentes irradiações	50
Figura 23: Emissões de ciclo de vida provenientes de geração de eletricidade, em gCO ₂ /kWh.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Pegada de CO ₂ e Radiação Solar Global.....	40
Tabela 2: Resultados de consumo de energia e pegada de CO ₂ do CES Edupack 2016	41
Tabela 3: Consumo de energia por material	42
Tabela 4: Pegada de CO ₂ , Energia Consumida e CO ₂ gerado por país.....	43
Tabela 5: Geração de CO ₂ por material	44
Tabela 6: Pegada de CO ₂ Total, por país.....	44
Tabela 7: Pegada de CO ₂ Total e Energia consumida, por país	45
Tabela 8: Radiação Solar Global Anual nas respectivas cidades	46
Tabela 9: Tempo de retorno energético e ERF para cada cidade.....	47
Tabela 10: quilogramas de CO ₂ mitigados por ano e tempo de mitigação de CO ₂ para cada cidade	47
Tabela 11: Custo de 1 MW de potência instalada por fonte, em dólares	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV / LCA	Análise de Ciclo de Vida / <i>Life Cycle Analysis</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CES	<i>Cambridge Engineering Selector</i>
EPBT	<i>Energy Payback Time</i>
ERF	<i>Energy Return Factor</i>
EVA	Espuma Vinílica Acetílica
IEA	<i>Internacional Energy Agency</i>
IRENA	<i>Internacional Renewable Energy Agency</i>
ISO	<i>Internacional Organization for Standardization</i>
LG	<i>Life's Good</i>
OECD	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
PECVD	Deposição Química de Vapor por Plasma

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Histórico e Cenário atual	4
3.2. Tipos de Sistema e Comercialização	9
3.3. Princípios de Funcionamento de uma Célula Fotovoltaica.....	10
3.4. Componentes de um sistema gerador contendo painéis solares	18
3.5. Princípios Básicos da Análise de Ciclo de Vida	23
3.6. Análise Ciclo de Vida de Painéis Fotovoltaicos.....	26
4. METODOLOGIA	31
4.1. CES Edupack 2016.....	31
4.2. ACV: Objetivo e escopo de trabalho	35
4.3. ACV: Inventário de Ciclo de Vida	36
4.4. ACV: Avaliação de Impacto Ambiental.....	40
4.5. ACV: Interpretação.....	40
5. RESULTADOS	41
5.1. Avaliação de impacto ambiental.....	41
5.2. Análise dos resultados	45
5.3. Tempo de retorno energético e mitigação de CO ₂	45
6. DISCUSSÃO.....	48
6.1. ACV, EPBT e Mitigação de CO ₂	48
6.2. Substituições na Matriz Energética Brasileira	50
6.3. Avaliação da Metodologia	52
7. CONCLUSÕES.....	54
8. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	56
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

1. INTRODUÇÃO

No cenário mundial atual está em andamento uma transformação de costumes. No cotidiano, milhares de ações que afetam o ecossistema e costumavam passar despercebidas agora são analisadas e quantificadas. Isso pois cada dia mais se têm uma maior consciência de como a atividade humana impacta o ambiente no qual se vive e o quão danosa essa atividade é (Leiserowitz, et al., 2019) (NORC, 2018).

Essa transformação de costumes engloba muitos aspectos do dia a dia: transporte, alimentação, vestimentas, e consumo, para nomear alguns. O aspecto mais importante e com maior potencial de impacto positivo desta transformação é o energético. Mudar a forma como geramos e armazenamos energia é não só importante como absolutamente necessário para fomentar a real transformação de costumes. Sabendo que manter um estilo de vida e prosseguir com as mais variadas atividades humanas sem energia disponível é extremamente complicado, chegar à tal conclusão é simples.

Esta conclusão embasa todos os esforços que vêm ocorrendo nas últimas décadas de repensar e renovar a matriz energética mundial (IEA, 2004). Inúmeras opções já existem e estes métodos de geração energética passam por importantes melhorias e avanços tecnológicos periodicamente (Benson, et al., 2014). É pensando neste desenvolvimento e no melhor entendimento de uma dessas tecnologias que este trabalho é desenvolvido.

Energia solar constitui uma das mais populares formas renováveis de geração de energia elétrica na atualidade. Esta tecnologia é relativamente recente, já que a invenção do painel fotovoltaico em silício data de 1954 (Richardson, 2018) e cresceu em importância com rapidez, se tornando uma importante fonte de geração de energia limpa, totalizando cerca de 350 TWh de energia elétrica produzida no ano de 2016 (IEA, 2019) graças à importantes avanços em pesquisa. No Brasil, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em 2016, 85 GWh foram gerados através da utilização de painéis solares, um crescimento de 531% em relação ao ano de 2014. Apesar destes crescimentos no mundo e no Brasil, a geração de energia elétrica através da energia solar ainda apresenta muito potencial para crescimento. Em 2017, 437 TWh foram produzidos mundialmente utilizando energia solar, contabilizando

apenas 7% de toda a energia gerada no planeta através de fontes renováveis. (IRENA, 2019).

Para realmente entender os impactos mais abrangentes de uma tecnologia, é necessário analisá-la não somente durante o seu tempo de utilização, mas também levar em conta todas as etapas antes e depois disso. Este trabalho analisará o ciclo de vida de um painel solar fotovoltaico fabricado em silício monocristalino, utilizado em sistema *on-grid* (eCycle, 2017) e usará pegada de CO₂ como unidade de medida (tensor ambiental).

Em um primeiro momento, será realizada uma revisão bibliográfica da literatura relevante ao tema. A revisão bibliográfica será dividida nos importantes assuntos abordados na literatura e, dentro de cada tópico, serão realizadas comparações e expostas as informações das mais diversas fontes, afim de obter o resultado mais rico possível. A visão dos autores não é de qualquer forma alterada ou comprometida, somente exposta de forma clara e objetiva, com a intenção de enriquecer a revisão.

A revisão bibliográfica abordará a contextualização do problema em questão, de forma que fique claro o cenário brasileiro e internacional no qual o trabalho se insere e como ele se relaciona com estas perspectivas. Em seguida, o funcionamento de uma célula fotovoltaica será detalhado, exemplificando todos os principais fenômenos que regem a tecnologia de geração de energia solar. Isto é importante para o trabalho pois constrói uma base didática na qual algumas hipóteses serão feitas e condições de contorno estabelecidas.

Ainda na revisão, será realizado o detalhamento de todos os materiais que compõem um painel solar, afim de compreender a estrutura do mesmo e identificar quais partes são críticas na geração de CO₂ e consumo de energia. Por fim, uma visão do que é um ACV, quais suas principais etapas e a importância de cada uma delas encerra a revisão bibliográfica.

Encerrado este momento de análise da literatura, a segunda parte do trabalho foca na execução da ACV para um painel solar de silício monocristalino e obtenção dos dados de geração de CO₂ e consumo de energia elétrica. Para tornar a coleta de análise de dados o mais compreensível e coerente possível, o objetivo e a metodologia do trabalho serão detalhados. Os dados serão então recalculados para

algumas diferentes localizações com matrizes energéticas distintas e comparados, com a intenção de compreender como as diferentes matrizes afetam o tempo de retorno do painel solar. Finalmente, paralelos serão traçados entre as conclusões obtidas neste trabalho com aquelas encontradas na literatura, a fim de enriquecer a discussão dos resultados obtidos.

2. OBJETIVOS

Este estudo tem por objetivos principais:

- Obter a massa de CO₂ emitida durante o ciclo de vida do painel fotovoltaico solar de silício monocristalino utilizado.
- Comparar a massa de CO₂ 'economizada' devido à substituição da geração elétrica dada pela composição da matriz energética de cada país (Alemanha, Austrália, Brasil e Canadá) por energia elétrica solar.
- Comparar a massa de CO₂ 'economizada' devido à substituição de geração termoelétrica por energia elétrica solar no Brasil.
- Comparar o tempo de retorno energético e de volume de CO₂ do painel fotovoltaico nos diferentes países.
- Analisar os gargalos do setor de energia solar no Brasil.

Será realizada a análise de ciclo de vida de um painel solar em silício monocristalino e, por meio deste estudo, serão obtidos dados sobre geração de CO₂ e consumo de energia durante seu ciclo de vida em quatro países (Alemanha, Austrália, Brasil e Canadá) com matrizes energéticas distintas e níveis médios de insolação variados.

Com estes dados, será possível entender como as características de geração de energia de um país afetam o tempo de retorno de um painel solar de silício monocristalino, tanto em questão energética como em produção de CO₂.

Finalmente serão identificados e discutidos os gargalos e desafios para a expansão da indústria de painéis solares no Brasil, através da comparação com outras formas de geração de energia predominantes.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Histórico e Cenário atual

É importante que possamos entender o porquê de um estudo ou análise ser realizado, quais as motivações dos autores, o histórico do tema, as lições aprendidas com o tempo e o contexto nos quais estes estudos estão inseridos. O descobrimento do efeito fotovoltaico data de 1839 (EERE, 2002) quando o cientista francês Edmond Becquerel fazia experimentos com uma célula eletrolítica exposta à luz. Outras importantes descobertas relacionadas ainda ocorreriam durante século XIX (Fraas, 2014), como a observação do efeito fotovoltaico em selênio por W.G. Adams e R.E. Days (Adams, et al., 1877), mas o real entendimento teórico destas descobertas somente seria solidificado durante o século XX, com pesquisas como a de Einstein (Einstein, 1917) e A.H. Wilson (Wilson, 1931). Já em 1954 nos laboratórios Bell, o primeiro painel de silício monocristalino foi anunciado (Chapin, et al., 1954) com uma eficiência de 6% e em 1957 o produto foi patenteado (Chapin, et al., 1957). A partir daquele momento, com um uso prático e viável já existente, o incentivo à pesquisa na área fotovoltaica cresceu e novos aparatos foram desenvolvidos (EERE, 2002). No início do século XXI, com o aumento de preocupações com emissões de CO₂, uma nova fase de incentivos a utilização de painéis fotovoltaicos inicia (Fraas, 2014) e, em 2013, o total das instalações solares no mundo vai para 100GW (IEA, 2014). Atualmente, a eficiência média de painéis solares fica entre 15 e 18%, com alguns painéis de alta eficiência chegando a 23%.

No cenário atual, segundo Stoppato (2006), com o crescimento populacional e avanços econômicos, os problemas relacionados à produção de energia têm se tornado cada vez mais importantes e envolvem, entre outros aspectos, o uso racional de recursos e o consumo de combustíveis não renováveis. Em relação à sistemas energéticos, muitos projetos estão sendo desenvolvidos com objetivos de mitigar estas situações, ao mesmo tempo que obedecem a leis cada vez mais restritivas. Estes projetos englobam o uso de combustíveis não tradicionais e fontes renováveis de energia. Neste último contexto, a energia solar é comumente considerada uma

ótima solução para produção de energia, seja em fazendas solares, painéis residenciais *on* ou *off-grid* ou outras aplicações mais modestas como aquecimento de água. Muitos países como Brasil, Irlanda e França têm aplicado políticas que promovem a utilização de tal tecnologia (Abdmouleh, et al., 2015) afim de seguir as metas do protocolo de Kyoto (Kyoto Protocol, 1998).

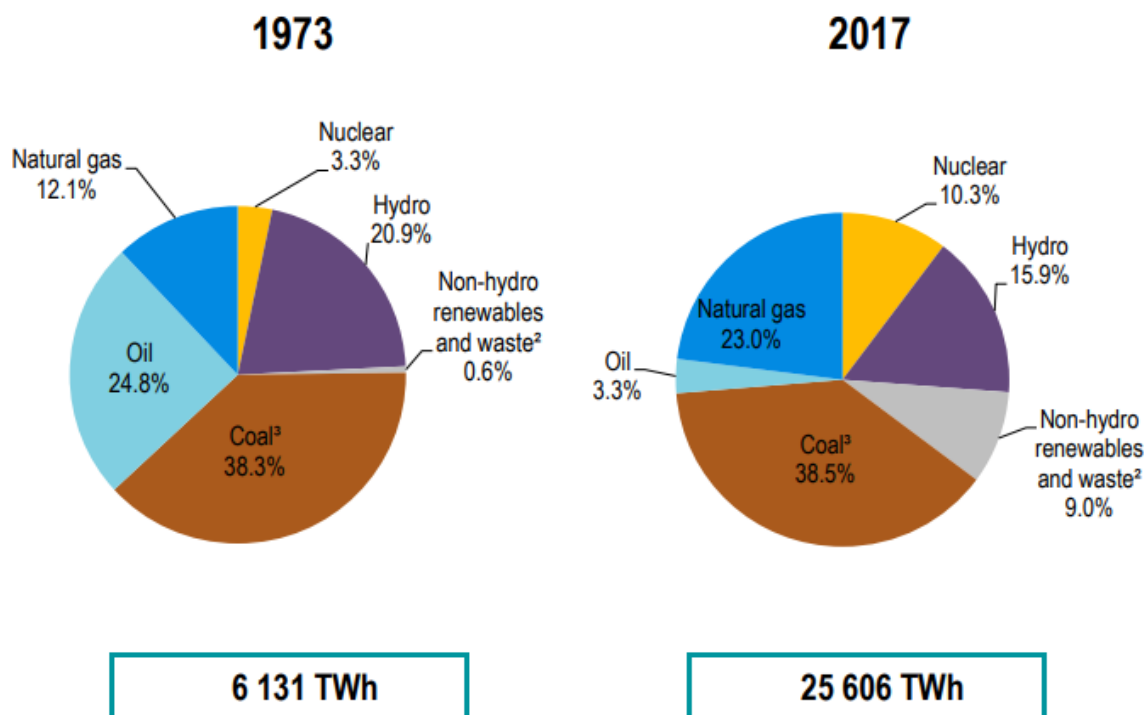
Por estas razões, Stoppato (2006) diz que a capacidade de plantas solares cresceu consideravelmente no cenário mundial: entre 2003 e 2004, houve um crescimento de 44,5% da capacidade produtiva de energia solar. Dessa forma, é de extrema importância que seja avaliado o impacto ambiental de painéis solares usando como sensores ambientais a energia (diferença entre energia gerada e consumida) e a emissão de CO₂ (diferença entre CO₂ gerada e a economia na emissão de CO₂) durante a vida operacional dos painéis.

Peng et al. (2012) diz que, afim de criar um ambiente que melhor sustente o crescimento humano e os avanços tecnológicos, será necessário um nível cada vez maior de energia e a tendência é que esta necessidade cresça com o aumento populacional e melhores padrões de vida. Porém, combustíveis fósseis não são uma opção adequada já que podem causar sérios problemas ambientais, como mudanças climáticas, aquecimento global, poluição do ar e chuvas ácidas. Logo, Peng et al. (2012) conclui que existe uma necessidade urgente de desenvolver tecnologias de energia renovável, afim de lidar com a alta demanda energética sem abrir mão do meio ambiente.

Na Error! Reference source not found., é possível comparar o fornecimento mundial de energia primária entre os anos de 1973 e 2017. Em *Non-hydro renewables and waste* estão inclusas energia solar, eólica, geotérmica, ondas/marés, biocombustíveis e outras fontes. Em 1973, esta categoria produziu aproximadamente 37 TWh, sendo superada por todas as outras categorias energéticas. Já em 2017, a produção energética na categoria *Non-hydro renewables and waste* totalizou 2304 TWh produzidos, um avanço percentual de mais de 6000% em relação à geração de 1973. Para comparação, a geração de eletricidade através de hidrelétricas cresceu de 1281 TWh em 1973 para 4071 TWh em 2017: um aumento percentual de 217%. Já a geração de eletricidade total cresceu em 317% durante o mesmo período, mostrando

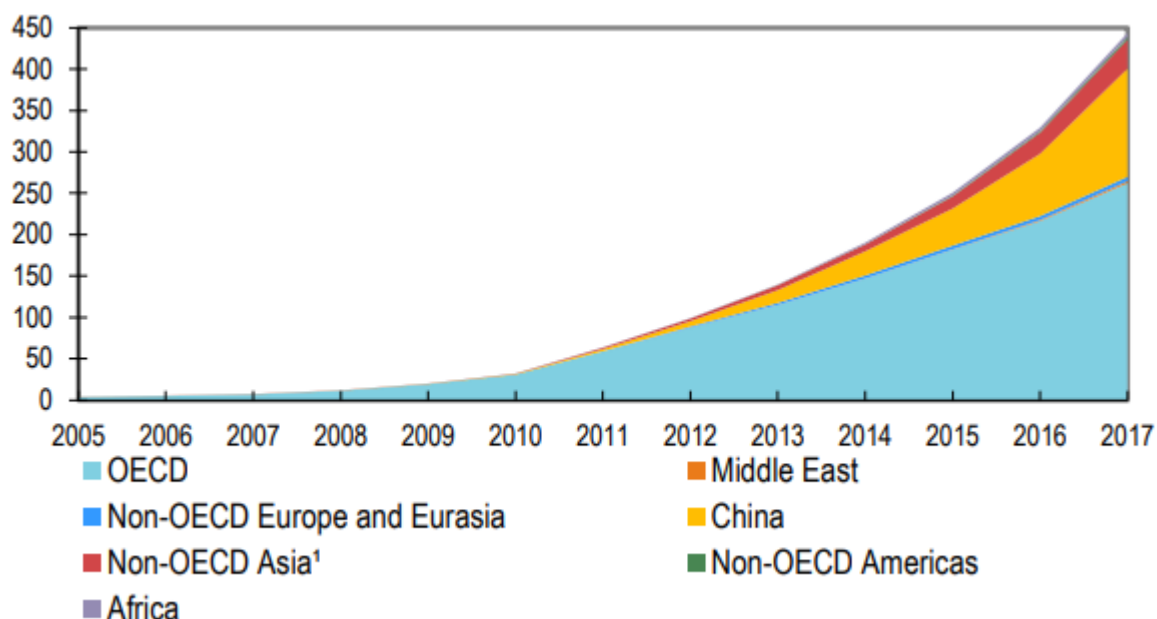
que o interesse e investimentos em energias renováveis (além de hidroelétricas) aumentaram significativamente em relação às outras categorias.

Figura 1: Geração elétrica por fonte, entre os anos de 1973 e 2017 (Fonte: (IEA, 2019))



Para as mudanças ocorridas em energia solar, a Error! Reference source not found. exibe a produção mundial de eletricidade solar fotovoltaica entre 2005 e 2017, em TWh, dividida por regiões, onde *OECD* corresponde aos países membros da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD). Em 2005, 4 TWh foram gerados utilizando energia solar e, em 2017, 444 TWh, demonstrando um crescimento percentual de 11000% em somente 12 anos. Para o ano de 2017, a produção mundial anual de eletricidade solar fotovoltaica de 444 TWh corresponde à somente 1,7% da geração elétrica mundial anual total. Assim, apesar de um crescimento bastante expressivo, ainda existe bastante espaço para crescimento da energia solar no mix energético global.

Figura 2: Produção de eletricidade solar fotovoltaica, entre 2005 e 2017, em TWh (Fonte: (IEA, 2019))

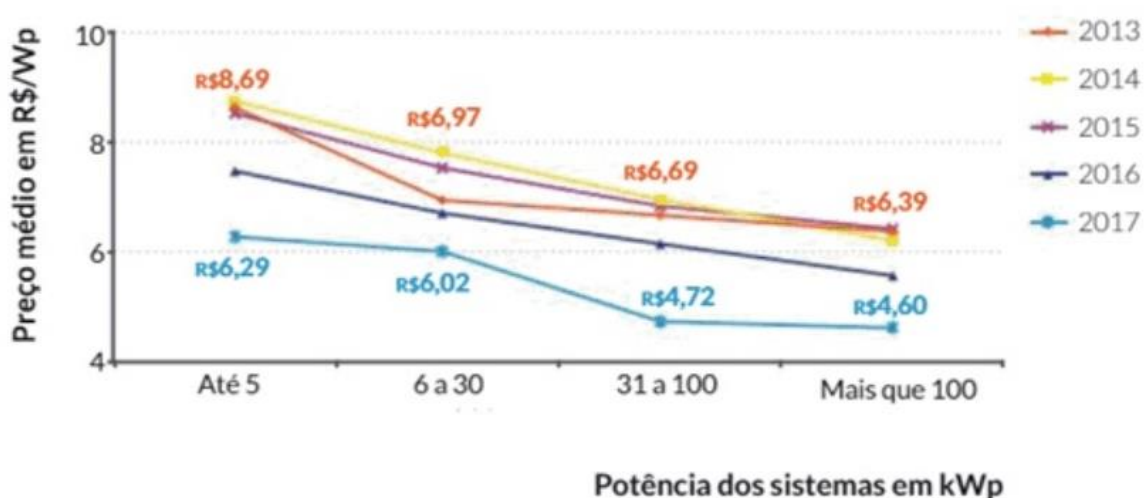


Estes crescimentos na participação da energia solar na matriz energética internacional são liderados por alguns países. Como a Error! Reference source not found. mostra, a participação chinesa na produção de eletricidade proveniente de energia solar é considerável. Segundo o *Key World Energy Statistics* de 2019 (IEA, 2019), em 2017, a China foi o país com maior produção de eletricidade solar fotovoltaica, totalizando 131 TWh, seguida de Estados Unidos da América com 67 TWh e Japão com 55 TWh. Estes três países em conjunto representaram 57% de toda a eletricidade gerada com energia solar. Apesar disso, tecnologias fotovoltaicas ainda representam uma pequena porção de toda a eletricidade gerada nestes países: 5,2 para o Japão, 2% para a China e 1,6% para os EUA. A Itália é o país com maior representatividade de energia solar em sua matriz, com 8,2% (IEA, 2019). O aumento da demanda energética tem realmente levado muitos países a buscar novas formas de geração elétrica.

Já no Brasil, segundo a ANEEL no ano de 2018 a capacidade total instalada de geradores de eletricidade solar fotovoltaica era de 1,3 GW, valor correspondente à 0,8% de toda a eletricidade produzida no país na mesma época (ANEEL, 2019). Deste valor, cerca de 307 MW originavam de geração distribuída. Em comparação, para o durante o mês de Junho de 2019, a ANEEL publicou notícia afirmando que a geração distribuída no Brasil havia superado 1 GW (ANEEL, 2019) e um valor correspondente

à 1,4% de toda a eletricidade produzida no país (ANEEL, 2019) considerando todas as formas de geração fotovoltaica. Como a **Figura 3** mostra, a queda nos preços de implantação de energia solar no Brasil caíram consideravelmente entre 2013 e 2017 (BNDES, 2018), popularizando a tecnologia, sendo um dos motivos pelo seu grande crescimento em anos recentes.

Figura 3: Preço médio, em R\$/Wp, de geração elétrica fotovoltaica, dividida por sistemas, entre 2013 e 2017 (Fonte: (IDEAL, 2019))



Para comparações em âmbito nacional com outras fontes não renováveis, segundo a ANEEL, usinas hidrelétricas compõem 60,3% da potencial em operação total no Brasil, enquanto usinas termoelétricas somam 24,4% e centrais geradoras solares fotovoltaicas, 1,4% (ANEEL, 2019). Porém, em questões de investimento e empreendimentos ainda não iniciados, está prevista a adição de 5,13 GW em capacidade somente de energia solar, a capacidade prevista de usinas hidrelétricas a ser somado futuramente é de somente 0,8 GW. A previsão para usinas termoelétricas e maior que ambas, totalizando 8,5 GW (ANEEL, 2019). Já comparando com energia eólica, que corresponde à 9,1% da matriz energética brasileira, o crescimento previsto é de 6,3 GW na capacidade nacional (ANEEL, 2019). Este maior investimento em eólica pode ser explicado por dois motivos principais:

- Investimento inicial menor. Fazendas eólicas necessitam de um investimento médio de US\$4.446.000/MW e usinas solares pedem US\$ 4.847.000/MW (Escolhas, 2016).

- Uma maior eficiência energética. Geração eólica apresentando uma eficiência total de 47,11% e geração solar fotovoltaica, 40,21%. (Dematte, et al., 2016).

3.2. Tipos de Sistema e Comercialização

Existem três tipos de sistemas fotovoltaicos mais comumente utilizados: *off-grid*, *on-grid* e sistemas híbridos (Newkirk, 2014). Alguns equipamentos são necessários para a utilização de qualquer um dos sistemas mencionados, como por exemplo os inversores solares. Painéis solares geram corrente contínua, a qual será transformada pelo inversor em corrente alternada para que assim seja possível sua utilização em residências ou negócios (Newkirk, 2014).

O sistema *off-grid* é independente e não é conectado à rede elétrica, logo esta configuração necessita de uma bateria para armazenar a eletricidade em excesso gerada pelos painéis instalados (Newkirk, 2014). São projetos ótimos para regiões isoladas ou com difícil acesso à rede elétrica. A energia armazenada pode ser utilizada em momentos de intermitência da energia solar, como durante a noite ou períodos de tempo com baixa insolação (eCycle, 2017). Por estes motivos, o projeto *off-grid* necessita de um *design* mais cuidadoso, levando em conta as necessidades de consumo diárias e os eventuais momentos de baixa geração elétrica. Além disso, devido à necessidade de baterias, este sistema é consideravelmente mais caro que a opção *on-grid*.

Sistemas *on-grid* são muito mais usuais que o *off-grid* (Newkirk, 2014). Estes utilizam somente os inversores solares comuns e são ligados na rede elétrica, de forma que toda eletricidade gerada em excesso é transferida para a rede pública, gerando certas vantagens fiscais ou créditos. Este conceito é conhecido como geração distribuída (ANEEL, 2018) e no Brasil é gerido segundo a resolução nº 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica, de 17 de abril de 2012 (ANEEL, 2012). É possível adicionar uma bateria ao sistema *on-grid*, obtendo um sistema híbrido, capaz de armazenar parte da energia em excesso produzida ou transmiti-la para a rede elétrica. O sistema híbrido une o melhor dos dois mundos podendo utilizar durante a

noite a eletricidade excedente gerada durante dia e, caso não seja produzida energia o suficiente, a rede elétrica pública pode ser utilizada como segurança.

Segundo a ANEEL, qualquer fonte renovável pode ser utilizada como geração distribuída, e sistemas com potência menor ou igual à 75 kW são denominados 'microgeração distribuída' e sistemas com potência maior que 75 kW e menor ou igual à 5 MW são denominados 'minigeração distribuída', sendo ambos elegíveis para o crédito de energia. Durante um certo período, se a energia gerada pelo sistema de geração distribuída for maior que a energia consumida nesse mesmo período, créditos ficam disponíveis para o consumidor, os quais podem diminuir as faturas energéticas de meses seguintes (ANEEL, 2018).

3.3. Princípios de Funcionamento de uma Célula Fotovoltaica

Os painéis solares utilizados hoje em dia, em particular aqueles de silício monocristalino e policristalino, nada mais são que diversas células fotovoltaicas conectadas e em conjunto. Estas células (ou módulos) são compostos de materiais semicondutores, os quais possuem propriedades que permitem transformar a luz solar em eletricidade. Segundo Aldous (2000), o máximo que uma célula simples pode absorver da luz é de cerca de 25%, com faixas entre 15-14% sendo mais comuns.

Os painéis são compostos de diversos outros componentes os quais serão analisados mais detalhadamente em outra sessão, mas para exemplificar seu funcionamento e os mecanismos envolvidos, o foco será a célula fotovoltaica, sua composição e funcionamento (Svarc, 2018).

O funcionamento de uma célula fotovoltaica se baseia em um efeito conhecido como efeito fotovoltaico. De forma geral, o efeito fotovoltaico, como o próprio nome já indica, transforma fótons (provenientes da radiação solar) em elétrons. De uma forma bastante simplificada, este efeito pode ser definido como a geração de potencial elétrico quando energia, nesse caso radiação solar, atinge a superfície de um semicondutor (Aldous, et al., 2000).

Uma porção da radiação que atinge a superfície do semicondutor é absorvida e utilizada como energia para ionizar o material semicondutor. A ionização, porém,

deve ocorrer em ou próxima de uma região do semicondutor com barreira de potencial, ou seja, próxima de uma região onde existe um campo eletromagnético para que os elétrons que se libertarem devido à ionização possam ser organizados em uma dada direção, gerando assim a corrente elétrica (Aldous, et al., 2000).

Existem alguns métodos diferentes para criar esta barreira potencial em um semicondutor. A mais utilizada é a formação de uma junção p-n, que é a ligação entre um semicondutor do tipo p com outro do tipo n. Ambos os tipos de semicondutores serão definidos e todo seu funcionamento explicado, incluindo como a junção p-n funciona, como é gerada barreira potencial interna e explicar como o efeito fotovoltaico se inicia quando fótons excitam uma junção p-n de semicondutores (Aldous, et al., 2000).

Semicondutores do tipo p são aqueles dopados com certas impurezas de forma que sobrem lacunas na rede cristalina e, dessa forma, a condução elétrica se dá pelo movimento relativo das lacunas. O semicondutor é denominado 'P' pois a condução é dada através da falta de um elétron, que é negativo, logo o 'P' faz alusão à 'Positivo'. Vale lembrar que, assim como o semicondutor intrínseco (impurezas não intencionais com teor não maior que 1ppb), o de tipo 'P' continua sendo eletricamente neutro (Aldous, et al., 2000).

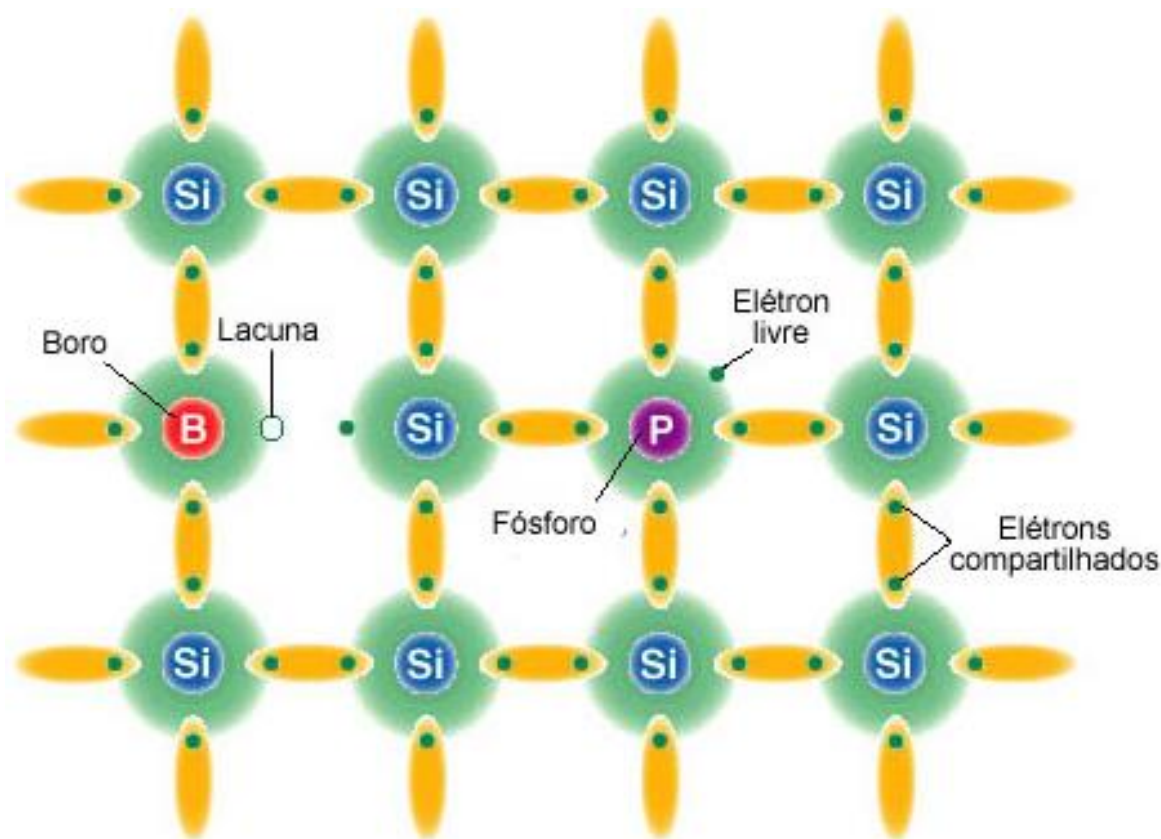
Podemos tomar um semicondutor de silício como exemplo e partir do pressuposto que o mesmo é puro. Silício possui 4 elétrons em sua camada de valência (Palanna, 2009) logo se o semicondutor for dopado com átomos de Índio, por exemplo, que é um elemento trivalente (3 elétrons em sua camada de valência) (Dias), haverá um 'déficit' de 1 elétron, que nada mais é que uma lacuna. Este buraco torna mais fácil a movimentação de elétrons dentro da estrutura cristalina do semicondutor. Este tipo de dopante é chamado de impureza aceitadora, já que aceita elétrons de seus átomos vizinhos (Aldous, et al., 2000).

Já um semicondutor do tipo 'N' possui impurezas que fazem com que exista um saldo positivo, ou seja, uma sobra de elétrons na estrutura cristalina, facilitando a geração de corrente. Dessa forma, o semicondutor é denominado 'N' pois sua condução é dada por elétrons, fazendo alusão à 'negativo', sendo este também eletricamente neutro. Tomando o mesmo exemplo de um semicondutor intrínseco de silício, porém desta vez adicionando arsênio como impureza, que é um átomo

pentavalente (5 elétrons em sua camada de valência) (Dias), haverá 1 elétron à mais na estrutura. Este elétron possui maior facilidade de movimentação dentro da estrutura cristalina do semiconductor pois não faz parte de uma ligação covalente, já que todos os 'espaços' foram tomados. Este tipo de dopante é denominado de impureza doadora, já que doa seus elétrons sobranes (Aldous, et al., 2000).

A **Figura 4** ilustra na mesma rede cristalina o funcionamento de um dopante doador e um aceitador. Na estrutura de silício (tetravalente), o átomo de boro atua como impureza aceitadora, gerando uma lacuna para onde átomos podem migrar facilmente (Dias). Pode-se observar também a presença de um átomo de fósforo (pentavalente), o qual atua como um átomo doador, evidenciado pela presença de um elétron livre na rede (Aldous, et al., 2000).

Figura 4: Visualização de uma impureza doadora (fósforo) e outra aceitadora (boro) (Fonte: (CircuitoAmigo))

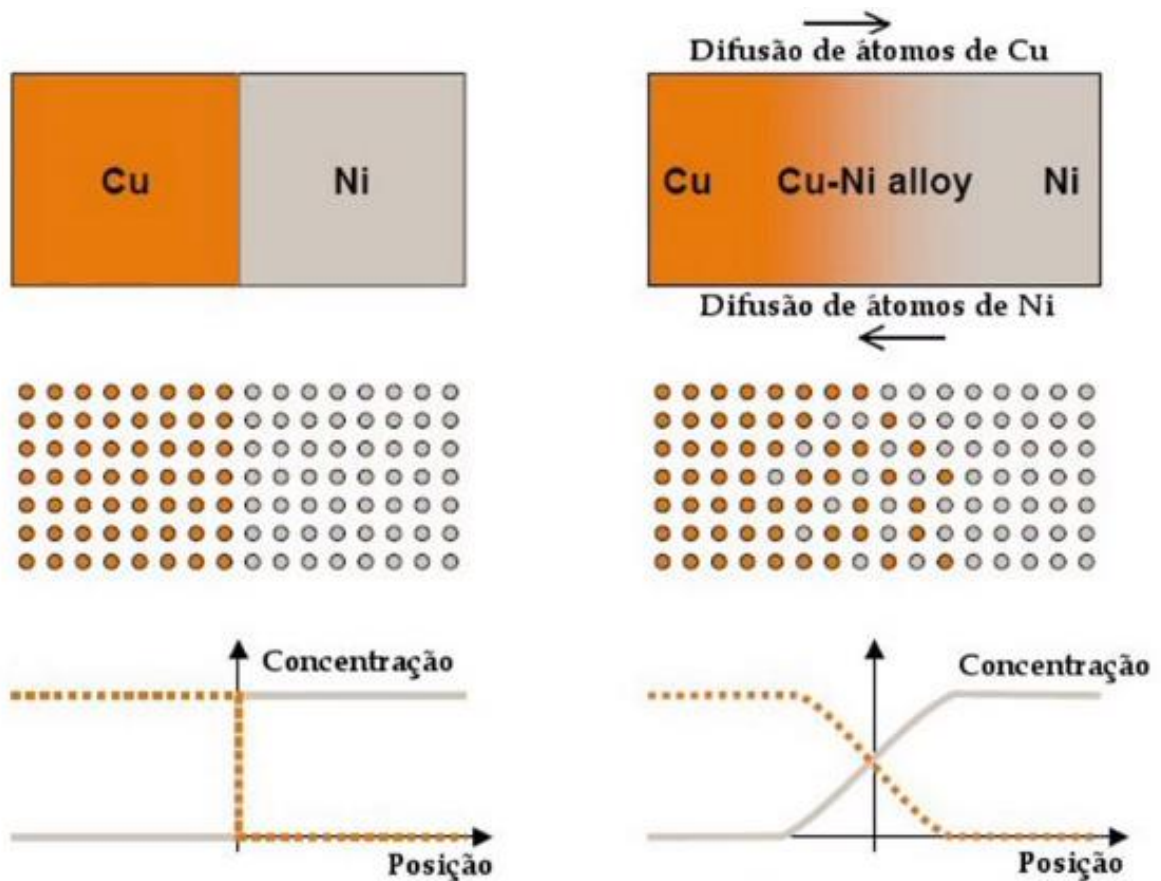


Em painéis solares, a célula fotovoltaica é dopada com impurezas aceitadoras, como o boro, e um wafer de tipo p é criado. Então, uma impureza doadora, como o fósforo, é difundido somente na superfície, gerando assim uma wafer onde existe uma junção p-n. É importante que neste wafer exista coerência e continuidade no reticulado

cristalino, com o menor número possível de defeitos cristalinos e lacunas intersticiais, facilitando a passagem de elétrons e, conseqüentemente, condução da corrente no semiconductor (Cheung, 2010). Isto pode ser garantido através de processos industriais metalúrgicos, os quais não são pertinentes ao trabalho.

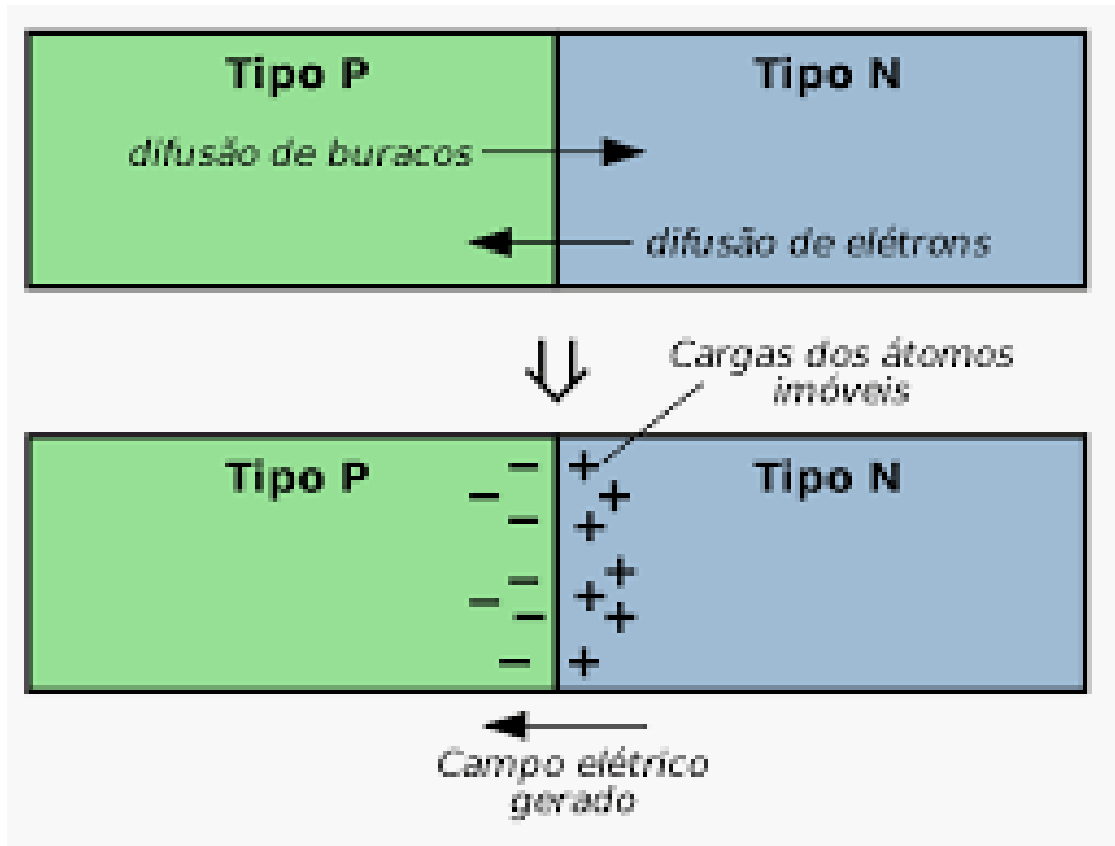
Ao criar uma interface entre semicondutores do tipo p e n, ocorre um processo conhecido como difusão, onde a matéria se transporta pela movimentação de átomos. Pode ocorrer através de diversos mecanismos, mas a existência de um gradiente em sua concentração é o que nos interessa. Vemos na **Figura 5** a seguir um exemplo de difusão em estruturas sólidas. É importante enfatizar que no exemplo à seguir, a difusão que ocorre é de átomos e, em painéis solares, ocorre a difusão de elétrons e lacunas. O exemplo é utilizado meramente com para ilustrar o funcionamento da difusão. No exemplo, devido à diferença de concentração, átomos de cobre migram para a região de baixa concentração de cobre (parte cinza) e átomos de níquel se transportam para o sentido oposto, onde há baixa concentração de níquel (parte laranja). Dessa forma, a interface entre as fases Cu-Ni apresenta concentração diferente que as extremidades (Sérgio, et al., 2015).

Figura 5: Difusão de átomos de Cobre e Níquel (Fonte: (Sérgio, et al., 2015))



O mesmo processo ocorre com as lacunas e elétrons em uma junção p-n, como mostra a **Figura 6**. Elétrons difundem do semiconductor do tipo N para o P e as lacunas difundem de P para N, criando correntes de difusão. Assim, os semicondutores que antes eram eletricamente neutros, passam a apresentar cargas. No lado N, uma deficiência de elétrons começa a surgir, devido à migração dos mesmos para o lado P, gerando carga positiva. O mesmo ocorre no lado P, onde uma carga negativa surge. Estas cargas ficam próximas à interface entre P e N, formando uma região denominada de Zona de Carga Especial. Com o passar do tempo, a zona aumenta, se aprofundando para ambos os lados da junção, como mostra a figura (Pn Junction Diffusion and Drift, 2017).

Figura 6: Geração da Zona de Carga Especial e do Campo Elétrico Interno (Fonte: (Pn Junction Diffusion and Drift, 2017))



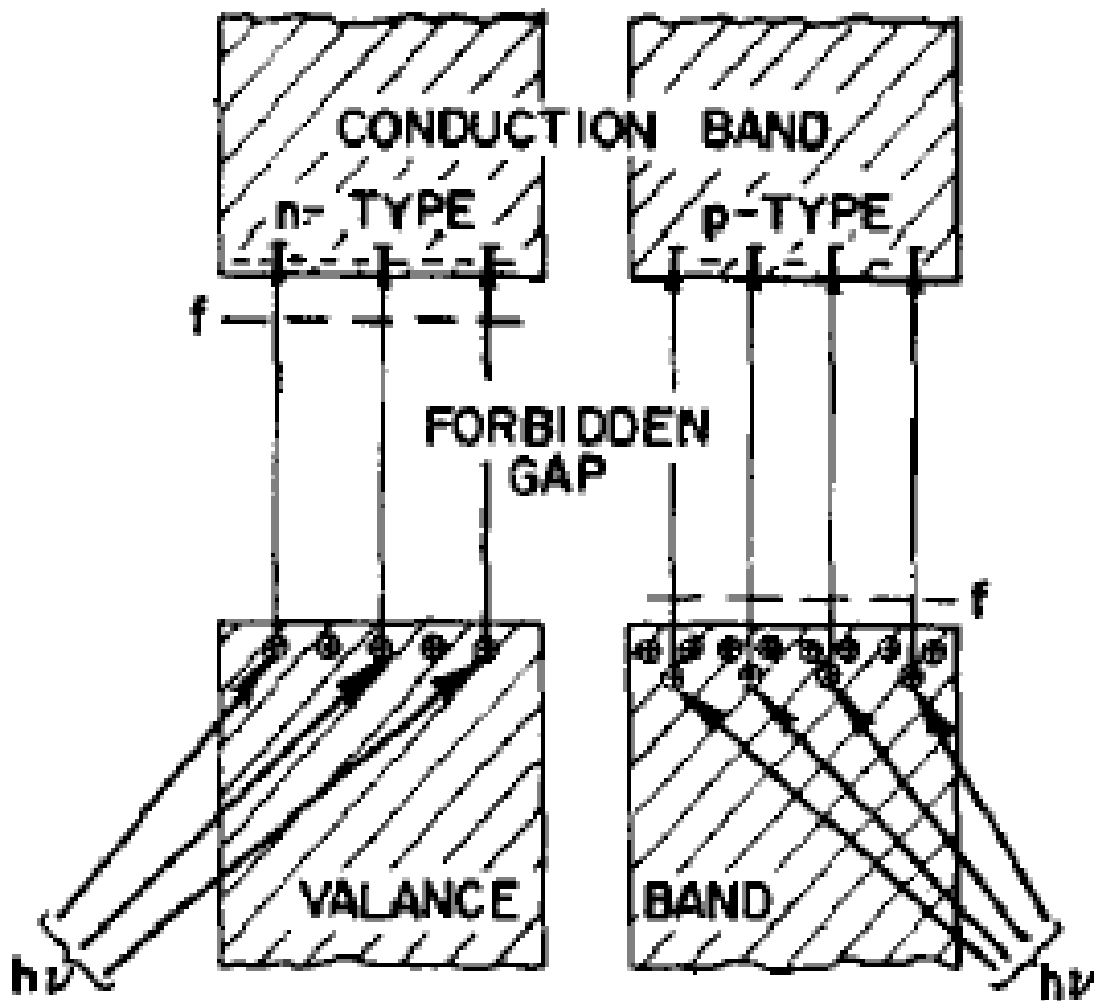
Cargas positivas em N e negativas em P geram um campo elétrico o qual vai contra a corrente de difusão que iniciou a movimentação de elétrons e lacunas, até um equilíbrio ser encontrado e o processo encerrar. Ao final do processo, a região na interface (onde não existem mais cargas livres) é chamada de região de depleção e nela existe um campo elétrico o qual está, por sua vez, associado à uma tensão. Esta tensão é a chamada barreira de potencial. Em geral, nos semicondutores de silício, essa tensão gira em torno de 0,6 V (Cipelli, et al., 1982).

O campo de força existente age como um diodo, permitindo a passagem de elétrons do lado P para o N, mas impedindo que eles passem no sentido contrário. A analogia utilizada é a de uma colina: elétrons podem facilmente descer (ir para o lado N), mas não podem subi-la (ir de N para P) (Aldous, et al., 2000).

Quando fótons atingem a estrutura da junção P-N, caso possuam energia acima daquela necessária para transmitir os condutores, sejam eles lacunas ou elétrons, através da banda proibida (1.1 eV para silicó), eles serão jogados da banda de valência para a de condução, como mostra a **Figura 7**, criando um elétron livre e, conseqüentemente, uma lacuna. O semiconductor do tipo N, apresenta muitos

elétrons na banda de condução e poucas lacunas na camada de valência e o oposto ocorre no semiconductor de tipo P (Rappaport, 1959).

Figura 7: Geração de Condutores de carga em semicondutores do tipo P e N (Fonte: (Rappaport, 1959))

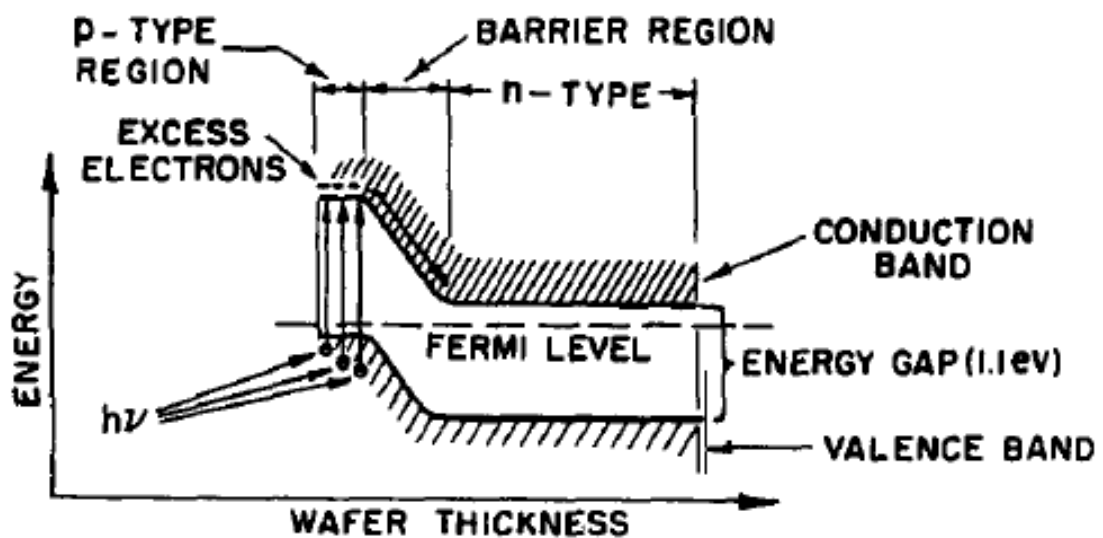


Segundo Rappaport (1959), o produto entre o número de portadores de carga n (elétrons) e p (lacunas) é constante, à uma dada temperatura ($np = 10^{21}$ para Silício à temperatura ambiente). Por exemplo, para um semicondutor de Silício de tipo n altamente condutor, N pode ser de 10^{17} por cm^3 e, logo P seria aproximadamente 10^4 . Com esses mecanismos em consideração, conseguimos montar o conceito de portadores majoritários e minoritários. Rappaport (1959) diz que, quando a luz solar atinge o semicondutor com energia maior que aquela da banda proibida de energia, ambos os tipos de portadores são produzidos em número iguais. Uma fonte de luz intensa, então, aumenta muito o número de portadores minoritários, ao passo que a quantidade de portadores majoritários mal é afetada pela ação da radiação. Esses portadores em excesso são difundidos no semicondutor e recombinados extremamente rápido, afim de retomar o equilíbrio. Porém, caso a junção P-N já exista

e um campo elétrico esteja estabelecido, portadores em excesso que estejam próximos do potencial ficarão presos e fluirão.

A **Figura 8** mostra o diagrama de energia da junção P-N. Os elétrons em excesso fluem para a direita e as lacunas para a esquerda. Dessa forma, uma corrente elétrica é formada e, se conexões elétricas estiverem presente, é possível usufruir desta geração de eletricidade, tendo um dispositivo que pode, efetivamente, transformar radiação solar em eletricidade, onde a magnitude da corrente gerada será proporcional ao número de fótons absorvidos (Rappaport, 1959).

Figura 8: Diagrama de Energia de uma junção p-n (Fonte: (Rappaport, 1959))

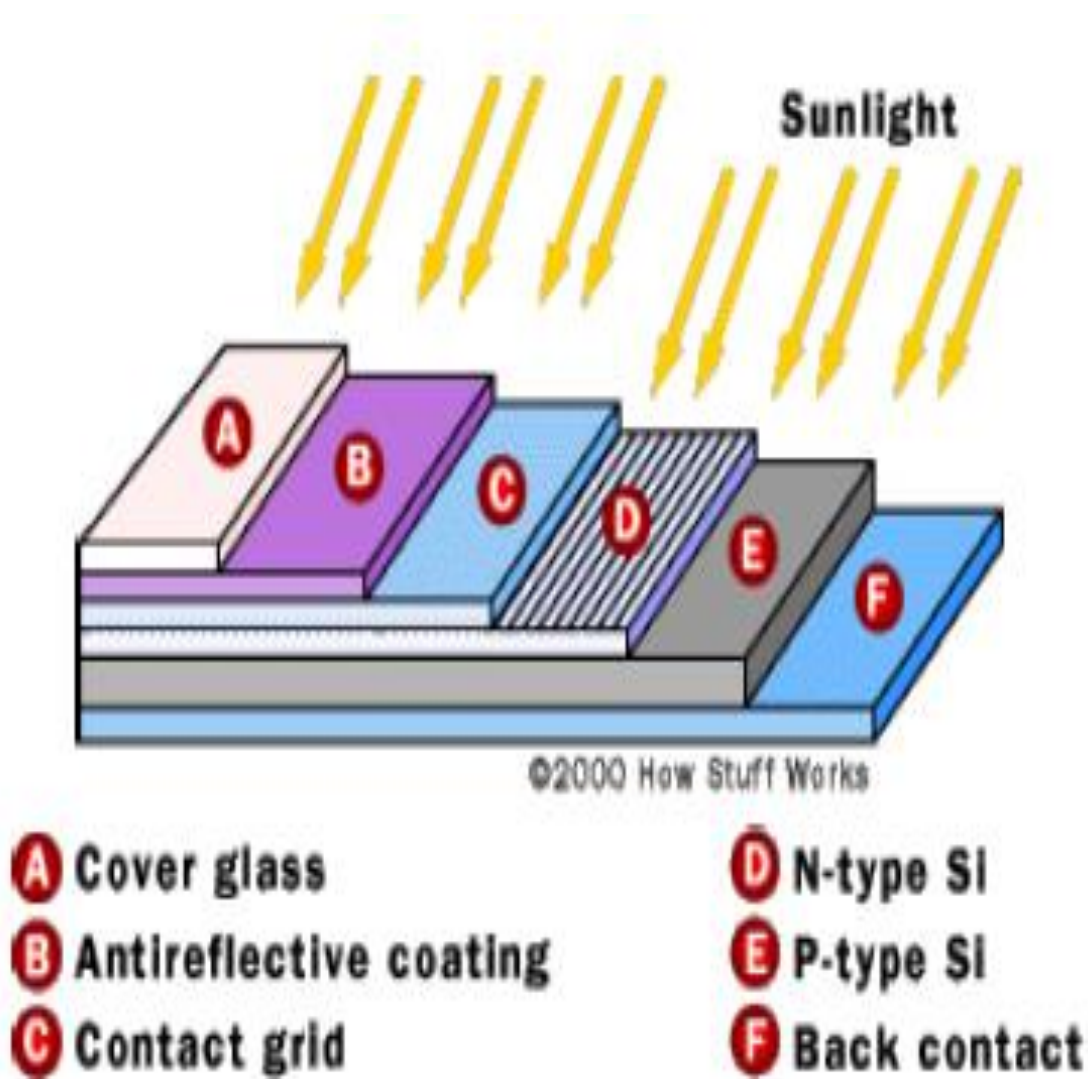


3.4. Componentes de um sistema gerador contendo painéis solares

Os painéis solares que são utilizados atualmente estão presentes nos mais diversos locais, como em telhados de casas, estacionamentos, postos de gasolina, fazendas próprias para painéis e até satélites. Isso significa também que são usados em ambientes completamente diferentes, com níveis de insolação, pluviosidade e temperaturas médias das mais diversas e por isso, existem painéis fotovoltaicos com as mais diversas estruturas e composições para utilização em meios que demandam certas características. De qualquer forma, existe uma estrutura geral básica à qual todos os painéis podem ser reduzidos. É importante conhecer esta estrutura e os

materiais utilizados em um painel solar. Na seção anterior, focamos na matriz de silício e em seu funcionamento, mas este é apenas um dos muitos componentes presentes em uma célula (ou módulo) fotovoltaico. Para que o sistema funcione de forma ideal, é necessária uma estrutura particular. A **Figura 9** ilustra a estrutura básica de uma célula foto voltaica de silício genérica (Aldous, et al., 2000).

Figura 9: Estrutura básica de uma célula fotovoltaica em silício (Fonte: (Aldous, et al., 2000)).



Esta será a estrutura na qual será baseada a análise de cada componente, explicitamente definindo suas funções e propriedades.

No centro da célula, temos as fatias de silício tipo-N e Silício tipo-P: a junção de semicondutores P-N. Para poder aproveitar e coletar a corrente gerada pelo efeito fotovoltaico, contatos metálicos são instalados no topo e na base da célula de silício. Estes contatos podem ser de diversos materiais, desde zinco até óxido de estanho, e

podem afetar muito a eficiência total da célula fotovoltaica (Ali, et al., 2017). Em alguns casos, podem até ser utilizados diferentes tipos de metal, um para o contato do topo e outro para o contato do fundo.

Silício é conhecido, entre outras coisas, por ser um material bastante brilhante. Isso se dá ao fato de que o silício é um semimetal e é altamente refletivo. Isso apresenta um problema já que parte da luz incidente no material será refletida ao invés de absorvida, impedindo que estes fótons sejam utilizados na célula. Para tentar contornar este problema, uma camada antirefletiva é aplicada no topo da célula, reduzindo a perda devido à reflexões para menos de 5% (Aldous, et al., 2000). A camada antirefletiva é a causa da aparência azul de muitos módulos solares.

Estas camadas antirefletivas são comercialmente depositadas via Deposição Química de Vapor por Plasma (PECVD), que oferece alta conformidade, precisão e em altas taxas (Prevo, et al., 2007). O padrão industrial é utilizar filmes finos de nitrato de silício (SiN), fabricados através de PECVD, como camada antirefletiva, em substratos de Silício. A principal desvantagem deste processo é o alto custo devido aos precursores químicos e a necessidade de processar no vácuo.

Outros materiais também podem ser utilizados, como a sílica. Segundo Prevo (2007), apesar de sílica não apresentar as eficiências foto voltaicas vistas em outros materiais como SiN, ela ainda apresenta bons níveis (~5%).

O último material utilizado é uma placa de vidro, com a intenção de proteger a célula de elementos naturais, como chuva e vento, e não naturais também. Os módulos fotovoltaicos são feitos através da conexão de diversas células (geralmente 36), tanto em série como em paralelo para atingir níveis decentes de voltagem e corrente, e logo após, os inserindo em uma estrutura firme, com placas de vidro e terminais positivos e negativos (Aldous, et al., 2000).

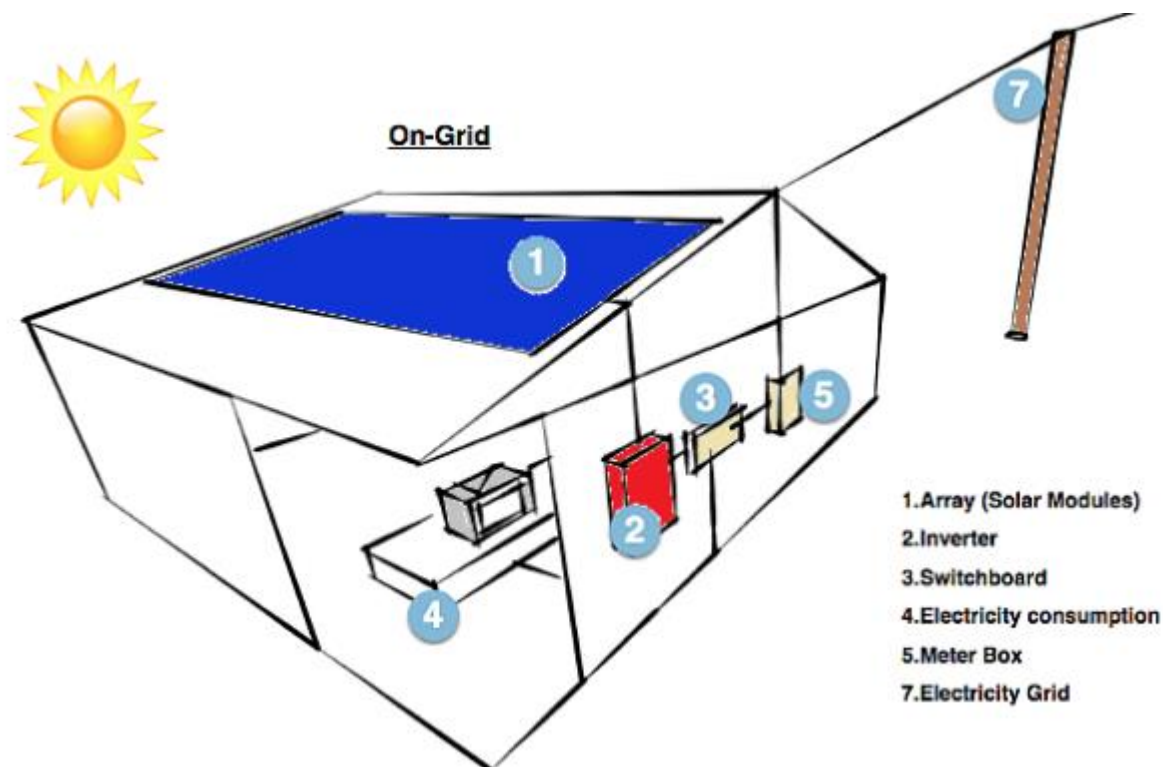
Silício monocristalino não é o único material a ser utilizado em células fotovoltaicas. Em uma tentativa de diminuir custos de produção, já que produzir silício monocristalino é um processo bastante custoso, silício poli cristalino também é utilizado apesar das células resultantes não apresentarem eficiências tão boas quanto as de silício monocristalino. Silício amorfo (sem estrutura cristalina organizada) é uma outra opção, novamente na tentativa de baixar custos. Alguns outros exemplos

existentes são arsenieto de gálio, seleneto de cobre-índio-gálio e telureto de cádmio (Aldous, et al., 2000). É importante mencionar que, já que cada material possui uma banda de energia diferente, eles são ótimos em faixas de comprimento de onda diferentes, ou fótons com diferentes energias. Silício policristalino é o mais utilizado já que seu processo de fabricação é mais simples (e menos custoso) que a produção de silício monocristalino.

Alguns estudos mostram que, uma forma possível de melhorar eficiência é através da utilização de camadas compostas de diferentes materiais, logo com diferentes bandas de energia. A ideia é tornar a célula eficaz em uma maior faixa de comprimentos de onda, com um material com banda de energia maior na superfície, absorvendo fótons com alta energia enquanto fótons com baixa energia são absorvidos pelo material com menor banda de energia, que está na parte inferior da célula.

Em um sistema gerador de eletricidade utilizando painéis fotovoltaicos, além do painel em si, existem outros equipamentos que compõem o sistema. O conjunto destes equipamentos muda entre sistemas *on-grid* e *off-grid*. A **Figura 10** mostra todos os equipamentos necessários para um sistema residencial *on-grid* (Newkirk, 2014). O módulo solar, inversor e quadro de distribuição estão presentes também em um sistema *off-grid*. O inversor transforma a corrente contínua gerada pelo módulo fotovoltaico em corrente alternada, tornando-a própria para utilização. O quadro de distribuição é alimentado com a corrente alternada que sai do inversor e a distribui ao resto da casa (Newkirk, 2014).

Figura 10: Esquema básico de um sistema gerador *on-grid* (Fonte: (Newkirk, 2014))



O medidor está presente em sistemas *on-grid*, mas não nos *off-grid*. Este equipamento mede a energia que a casa consome, a energia gerada nos painéis e o nível de eletricidade excedente (EnergySage, 2019). E ainda existe a conexão com a rede elétrica pública.

Já para um sistema *off-grid*, além do módulo solar, inversos e caixa de distribuição, existem ainda a bateria e, idealmente, um gerador de emergência. As baterias mais comumente utilizadas são as de chumbo-ácido e as de íons de lítio (Svarc, 2019). As baterias de chumbo-ácido são a mais antiga e a mais comum forma de armazenamento de energia e são consideradas uma boa opção para sistemas *off-grid* devido ao seu custo relativamente baixo, longo tempo de vida e confiabilidade. Elas são recarregáveis e podem ser realizar o ciclo de descarga-recarga centenas de vezes. As baterias de íons de lítio são muito populares no setor de carros elétricos devido ao seu baixo peso e alta densidade energética, mas recentemente entraram no mercado de armazenamento de energia residencial. Em comparação com baterias de chumbo-ácido, estas recarregam mais rapidamente e são mais estáveis, reduzindo as chances de degradação durante os ciclos de descarga-recarga, além de ocuparem um menor espaço na residência devido à alta densidade energética. As baterias de

lítio da Tesla são um bom exemplo de baterias residenciais para armazenamento de energia (Tesla).

3.5. Princípios Básicos da Análise de Ciclo de Vida

Análise ou Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é, segundo a norma ABNT NBR ISO 14.040 (ABNT, 1997), 14.041 (ABNT, 1998), 14.042 (ABNT, 2000) e 14.043 (ABNT, 2000), uma compilação de avaliações das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida. O estudo deve avaliar todos os estágios no ciclo de vida do material ou produto analisado, desde a extração de matéria prima através de recursos materiais, passando por processamento, manufatura, distribuição, use, manutenção, disposição e reciclagem.

ACV envolve análise total dos sistemas de produção e dá como resultado uma avaliação compreensiva de todas as entradas de energia e emissões para o meio ambiente. Pode, muitas vezes, ser uma avaliação demorada e custosa, por isso métodos facilitadores são necessários para que uma audiência maior passe a utilizá-la como forma válida análise (Rebitzer, et al., 2004).

O objetivo principal é utilizar os dados obtidos sobre o ciclo de vida de um certo produto para compará-lo com outro, identificar partes do processo que necessitam de melhora e ajudar a direcionar a tomada de decisões. Em geral, o foco são os impactos ambientais, como redução de pegada de CO₂.

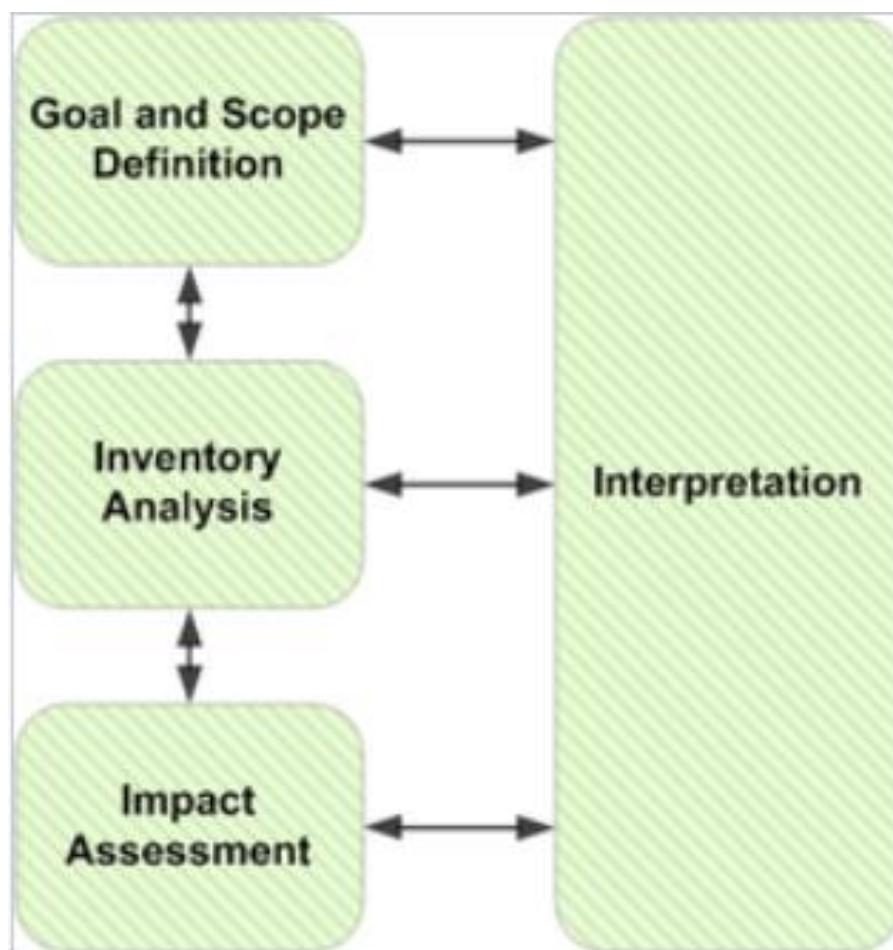
Ainda segundo a ISO, uma ACV deve ser separada em 4 fases distintas. Primeiramente, se define qual o objetivo e o escopo da análise a ser desenvolvido (*Goal and Scope Definition*). É importante explicar o contexto do estudo, em diversos níveis, nacional e global. A norma ISO requer que o escopo e o objetivo sejam bem definidos e consistentes com a aplicação da análise. Existem alguns detalhes técnicos que devem ser definidos ainda nesta primeira etapa, como: unidade funcional (o que está sendo estudado e unidade de referência), fronteiras do sistema, limitações e pressupostos, procedimentos e métodos.

A segunda parte da ACV é a análise do inventário ou também chamado de Inventário do Ciclo de Vida (*Life Cycle Inventory*) que envolve a construção de um fluxo com todas as entradas e saídas no sistema, sejam elas energéticas ou matérias primas retiradas do meio ambiente. Inclui entradas de energia e água e saídas para terra, água e ar. O modelo do fluxo é geralmente ilustrado através de um fluxograma que inclui todas as atividades que serão analisadas, além de providenciar uma visão clara das fronteiras do sistema analisado. Estes dados precisam estar relacionados à unidade funcional definida na primeira fase. As matérias primas geralmente estão expostas no topo e cada processo pelo qual elas passam está explicitado no próprio fluxo, culminando no produto final. A quantidade de energia necessária e os rejeitos também estão presentes nestes tipos de fluxogramas (Rebitzer, et al., 2004)

Depois dessa etapa, vem a avaliação do impacto ambiental (*Impact Assessment*) em si. De forma objetiva, deve-se estudar o qual significativos os impactos são ao meio ambiente. Segundo a norma, devem ser explicitados as categorias de cada impacto, classificação e caracterização. Por fim, temos a Interpretação (*Interpretation*) de todos os dados e análises até então, que deve quantificar e identificar os resultados das duas fases anteriores (análise de inventário e avaliação do impacto).

É importante explicitar que as quatro fases de um ACV são interdependentes e os dados adquiridos em uma iram afetar a fase subsequente. A **Figura 11** esquematiza de forma clara a interdependência entre todas as quatro fases.

Figura 11: Visualização das fases de uma ACV e a interdependência entre elas
(Fonte: (ABNT, 1997))



Segundo estudos conduzidos em 2006, ACV são muito utilizadas para dar apoio para estratégias de negócios e pesquisa e desenvolvimento, contabilizando, respectivamente, 18% e 17% do total de ACVs realizadas no ano. Grandes multinacionais estão fazendo uso destas análises para melhor otimizar a tomada de decisões. Mesmo assim, boa parte de ACVs ainda são utilizadas para realizar análises de impacto ambiental e estudos de poluição (Rebitzer, et al., 2004).

Além de tudo mencionado até aqui, é de suma importância que haja uma análise dos dados, de sua consistência e validade. Para que um ACV seja válido, é importante que exista informação e dados realmente uteis e atuais que formem a base de tal estudo. Da mesma forma, ao comparar duas análises, é crucial que dados equivalentes (ou seja, comparáveis), existam para ambos os produtos ou processos em questão. Se, por exemplo, um dos produtos possuir um volume muito maior de

dados disponíveis, ele não poder ser comparado de forma justa com um segundo produto que apresenta dados menos detalhados (ABNT, 1997).

Encontrar informações confiáveis e válidas é um problema bastante comum durante o desenvolvimento de uma ACV. Novas fontes de dados, pesquisas, avanços científicos, métodos de manufatura e materiais são continuamente introduzidos, devido á forma veloz que pesquisa e desenvolvimento têm andado. Isso torna muito difícil e também muito importante que se utilize informações atualizadas, já que para que ele seja válido, a informação utilizada deve ser recente. Mas existem algumas formas de mitigar estas questões. A análise de ciclo de vida muitas vezes engloba vários estágios de um processo, como extração de material, processamento e manufatura. Se for possível isolar e identificar a fase mais danosa ao meio ambiente, então é possível reduzir seu impacto ao focar somente nesta única etapa. Isto ao mesmo tempo descomplica a ACV como um todo, já que somente uma fase do processo está sendo estudada, e ainda dá resultados interessantes e valiosos.

3.6. Análise Ciclo de Vida de Painéis Fotovoltaicos

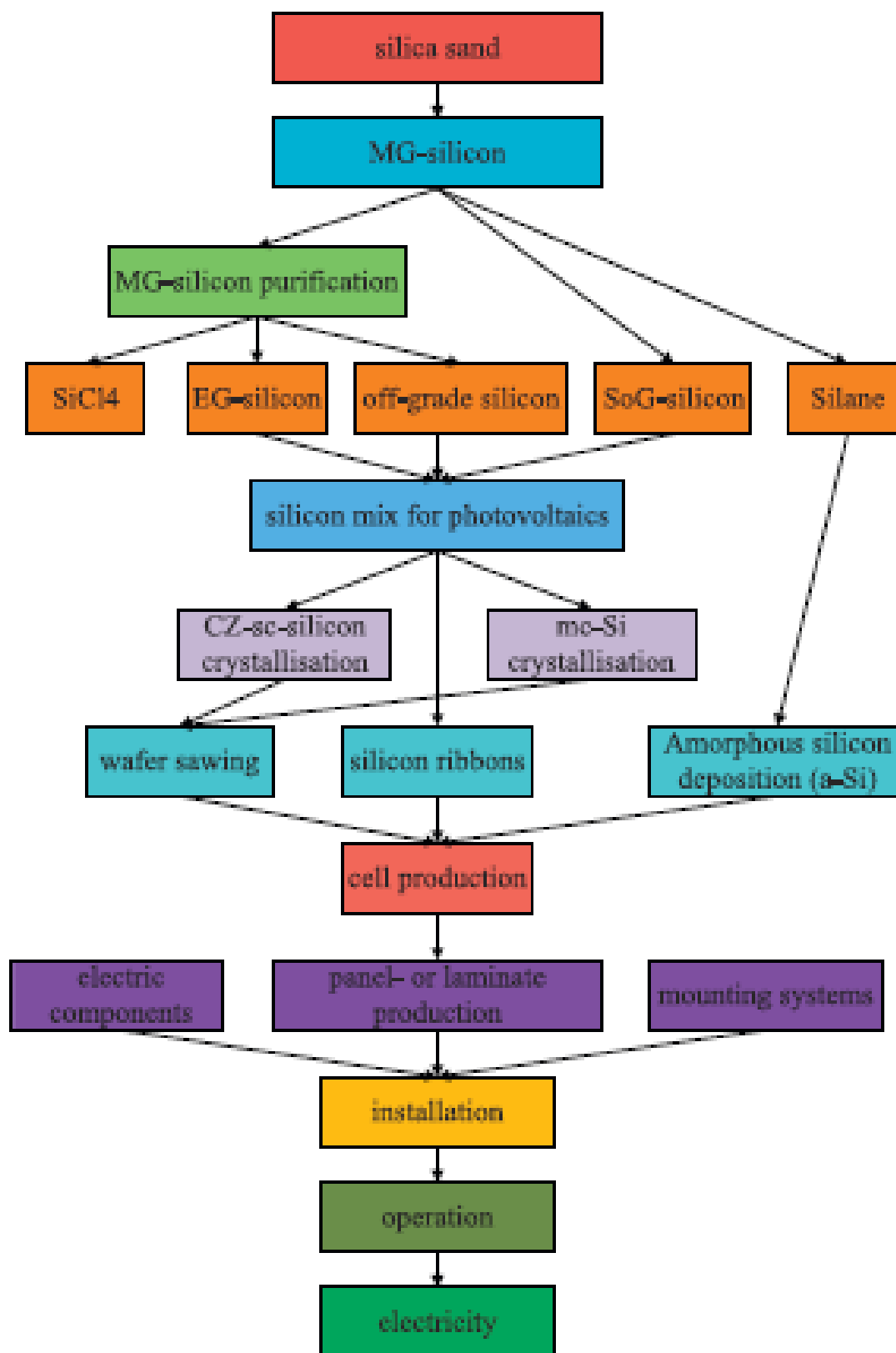
A análises de ciclo de vida apresentam certas especificidades de acordo com o processo e/ou produto que estudam. No caso de painéis fotovoltaicos, as ACVs focam nos tempos de retorno energético e de CO₂. A revisão realizada por Peng et al (2012) avaliou 5 tipos diferentes de painéis solares: silício monocristalino, silício policristalino, silício amorfo, filmes finos de CdTe (cádmio-telúrio) e filmes finos de CIS (cobre-índio-selênio) e comparou as energias consumidas durante todo o ciclo de vida, o EPBT (*Energy Payback Time*) e a emissão de gases de efeito estufa de cada tipo. A base de dados para ACV *Ecoinvent* (Ecolnvent, 2013) foi utilizada.

Os painéis de silício monocristalino mostraram uma variação considerável em relação aos estudos realizados anteriormente (Stoppato, 2006) discrepância existente devido à avanços tecnológicos desde a época em que estes estudos foram realizados. Os painéis em silício monocristalino mostraram um tempo de retorno energético entre 1,7 e 2,7 anos, a maior necessidade energética entre todos as tecnologias estudadas (devido à purificação do Silício) e uma emissão de 45g CO₂-eq/kWh, que,

comparativamente, é uma unidade de grandeza menor que os níveis de emissão de CO₂ presentes em combustíveis fósseis.

De forma geral, sistemas baseados em Silício, como monocristalino, policristalino e amorfo, tiveram as piores performances entre todos os tipos de painéis solares estudados, especialmente silício monocristalino. Logo, segundo o estudo, painéis compostos de filme finos são ecologicamente mais favoráveis. De qualquer forma, sistemas fotovoltaicos provaram ser sustentáveis e ambientalmente amigáveis quando utilizados para substituir a queima de combustíveis fósseis, potencialmente eliminando 1000t de CO₂ por GWh gerado (Peng, et al., 2012). A **Figura 12** exibe o fluxograma com todas as etapas de produção de um painel fotovoltaico baseado em silício.

Figura 12: Fluxo do processo de produção de sistemas baseados em silício, utilizado durante a análise de inventário na ACV (Fonte: (Peng, et al., 2012))



Vemos que no estudo de Peng et al. (2012) foi utilizado um fluxo bastante detalhado da produção de células baseadas em silício, como foi comentado na sessão anterior que é importante ser realizado durante a análise do inventário do ciclo de vida. Isto torna a análise muito mais rica, mas, ao mesmo, consideravelmente mais complexa.

O estudo de Stoppato (2006), utilizando o *software* Boustead Model V5.0 (BousteadConsulting, 2013), realizou a ACV de painéis policristalino de silício, afim de avaliar os tempos de retorno energéticos e o potencial de mitigação de CO₂ e, apesar de analisar somente sistemas de painéis fotovoltaicos de silício poli cristalino, chegou a mesma conclusão que Peng et al (2012): a fase crítica do ciclo de vida é o refinamento do silício metálico para o que é chamado de silício grau solar, onde 47,61% do CO₂ de todo o processo é gerado e 47,27% de toda a energia necessária para o processo é consumida.

Diferentemente do estudo anterior, Stoppato (2006) comparou a emissão de CO₂ em mais de 20 países, cada um com sua matriz energética e radiação solar média e chegou à conclusão, como mostra a **Figura 13** que o tempo de retorno energético é menor que o tempo total de operação das placas em todos os países analisados, não importa o quão não favoráveis fossem as condições. A conclusão final é que painéis solares são vantajosos para o meio ambiente.

Figura 13: Tempos de retorno energético para painéis solares em silício policristalino em diversos países (Fonte: (Stoppato, 2006))

Country	Town	Solar radiation (kWh/m ²)	Latitude	Altitude (m)	Annual production (kWh/kWp)	EPBT (years)	ERF
Australia	Sydney	1614	-33.55	1	1319	3.728	7.5
Austria	Vienna	1108	48.20	186	906	5.428	5.2
Belgium	Brussels	946	50.50	77	788	6.241	4.5
Canada	Ottawa	1377	45.25	75	1188	4.140	6.8
Czech Republic	Prague	1000	50.06	261	818	6.012	4.7
Denmark	Copenhagen	985	55.75	1	850	5.786	4.8
Finland	Helsinki	956	60.13	0	825	5.961	4.7
France	Paris	1057	48.52	32	872	5.640	5.0
France	Marseille	1540	43.18	7	1317	3.734	7.5
Germany	Berlin	999	52.32	35	839	5.862	4.8
Germany	Munich	1143	48.21	515	960	5.123	5.5
Greece	Athens	1563	38.00	139	1278	3.848	7.3
Hungary	Budapest	1198	47.30	103	988	4.978	5.6
Ireland	Dublin	948	53.20	9	811	6.064	4.6
Italy	Rome	1552	41.53	15	1315	3.740	7.5
Italy	Milan	1251	45.28	103	1032	4.765	5.9
Japan	Tokyo	1168	35.40	14	955	5.150	5.4
Republic of Korea	Seoul	1215	37.30	30	1002	4.908	5.7
Luxembourg	Luxembourg	1035	49.62	295	862	5.705	4.9
The Netherlands	Amsterdam	1045	52.21	-1	886	5.551	5.0
New Zealand	Wellington	1412	-41.17	21	1175	4.185	6.7
Norway	Oslo	967	59.56	13	870	5.653	5.0
Portugal	Lisbon	1682	35.44	16	1388	3.543	7.9
Spain	Madrid	1660	40.25	589	1394	3.528	7.9
Spain	Sevilla	1754	37.24	5	1460	3.368	8.3
Sweden	Stockholm	980	59.21	16	860	5.718	4.9
Switzerland	Bern	1117	46.57	524	922	5.334	5.2
Turkey	Ankara	1697	39.55	1102	1400	3.513	8.0
United Kingdom	London	955	51.30	20	788	6.241	4.5
United Kingdom	Edinburgh	890	55.57	32	754	6.522	4.3
United States	Washington	1487	38.52	14	1249	3.937	7.1

Sherwani et al (2009) realizou uma revisão de estudos sobre análise de ciclo de vida de painéis fotovoltaicos, estudando painéis de silício monocristalino, poli cristalino e amorfo e chegou às mesmas conclusões que Peng et al (2012) notando apenas que podem existir variações no tempo de retorno energético e na emissão de gases poluentes dependendo da orientação e ângulo do painel solar, se a instalação é integrada ou não à rede (*on-grid* ou *off-grid*) e tamanho do sistema, mostrando que a forma como os painéis são instalados é importante em seu resultado final.

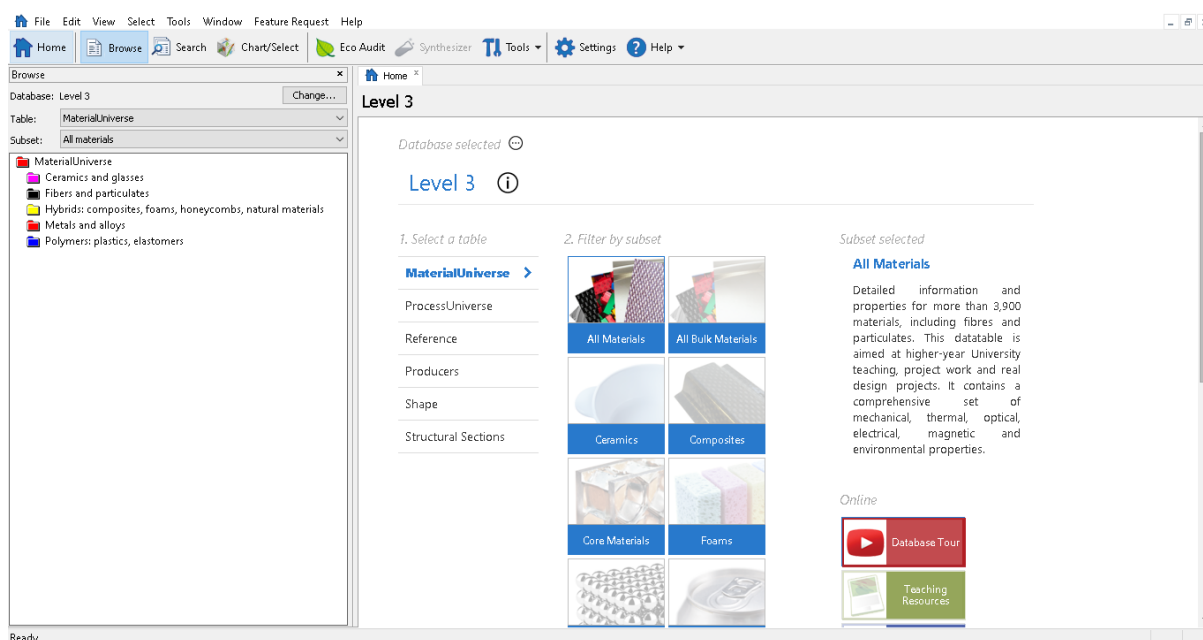
4. METODOLOGIA

Este trabalho tem como objeto de estudo painéis fotovoltaicos utilizados em um sistema *on-grid*. Para realizar a análise de ciclo de vida é utilizado o *software* CES Edupack 2016 da Granta Design, no Level 3, o qual possibilita, através da ferramenta *Eco Audit*, uma análise sucinta dos materiais analisados. A ferramenta utiliza os indicadores de consumo energético e pegada de CO₂ como resultados da análise.

4.1. CES Edupack 2016

Para a obtenção das informações procuradas durante a ACV, será utilizado o módulo EcoAudit do *software* CES (*Cambridge Engineering Selector, Level 3*) *Edupack (versão 2016)*. Este *software* é uma base de dados de materiais, onde é possível obter informações sobre as mais diversas propriedades de uma vasta gama de materiais. A **Figura 14** mostra a tela inicial do *software*.

Figura 14: Tela inicial do CES Edupack 2016 (Fonte: CES Edupack 2016)



A base de dados é bastante rica, com centenas de diferentes materiais, dos mais simples como o ferro até compósitos de matriz cerâmica altamente tecnológicos. Para cada material escolhido, o *CES Edupack 2016* disponibiliza uma grande lista de

propriedades e características, como composição detalhada, preço, propriedades térmicas, elétricas, mecânicas e magnéticas, durabilidade, produção primária de CO₂ e consumo de energia elétrica e água. Além disso, com o programa é possível gerar gráficos e diagramas correlacionando todas as propriedades mencionadas anteriormente ou até comparar propriedades entre materiais distintos, possibilitando inúmeras análises e conclusões.

Uma ferramenta bastante importante do *software* é o *Eco Audit*. Com ela, é possível estimar o impacto ambiental de um produto, o qual pode ser composto de uma combinação dos materiais presentes no *CES Edupack*. O interessante do *Eco Audit* é que é possível inserir uma grande variedade de dados de entrada no projeto, todos os quais afetarão o resultado final. A **Figura 15** mostra a tela principal da ferramenta *Eco Audit* e suas principais entradas de dado.

Figura 15:Tela principal do *Eco Audit* e suas principais entradas de dados (Fonte: *CES Edupack*)

The screenshot displays the main interface of the Eco Audit software, organized into three main sections:

- Material, manufacture and end of life:** A table with columns: Qty., Component name, Material, Recycled content, Mass (kg), Primary process, and End of life.
- Transport:** A table with columns: Name, Transport type, and Distance (km).
- Use:** A form with various input fields:
 - Product life: 1 Years
 - Country of use: World
 - Static mode: Product uses the following energy: Electric to thermal
 - Mobile mode: Product is part of or carried in a vehicle: Diesel - ocean shipping
 - Power rating: 0 W
 - Usage: 0 days per year
 - Distance: 0 km per day
 - Usage: 0 hours per day

É necessário, antes de iniciar o projeto, escolher quais materiais que compõem o produto, em qual quantidade, qual é seu processo primário de fabricação e como ocorre seu fim de vida. Com todas essas informações, o programa consegue obter alguns dados iniciais de pegada de CO₂ e energia elétrica, porém ainda é necessário adicionar alguns outros detalhes sobre o ciclo de vida do produto.

O *software* pede ainda por informações relativas a outros pontos bastante relevantes do ciclo de vida do produto, como o meio de transporte utilizado durante sua locomoção. É possível escolher entre os meios de transporte mais comuns para transporte de mercadorias, como navios, trem, caminhões e transporte aéreo e, além disso, o *CES Edupack* ainda dá a possibilidade de construir o caminho seguido pelo produto, caso mais de um método de transporte esteja envolvido. É necessário indicar a distância viajada em cada etapa e, dessa forma, levando em conta o modo de transporte e o combustível utilizado, o programa calcula a quantidade de energia consumida e o de CO₂ produzida nesta etapa.

Para finalizar o *Eco Audit*, basta informar o tempo aproximado, em anos, de vida do produto, se um produto é estático ou se ele é componente de um veículo ou outro produto móvel e em qual país ele será utilizado. Esta última escolha leva em consideração a matriz energética do país escolhido, analisando a participação de combustíveis fósseis e métodos renováveis de geração de energia na matriz. Dessa forma, ao comparar o mesmo produto, porém utilizado em locais diversos, os resultados serão diferentes, mesmo que sua composição seja idêntica e seu transporte ocorra de formas semelhantes. É importante mencionar que a escolha de país afeta somente a geração e CO₂ e consumo energético na fase de uso do produto, e não apresenta impacto nas fases iniciais. Dessa forma, os impactos nas fases iniciais devem ser contabilizados separadamente.

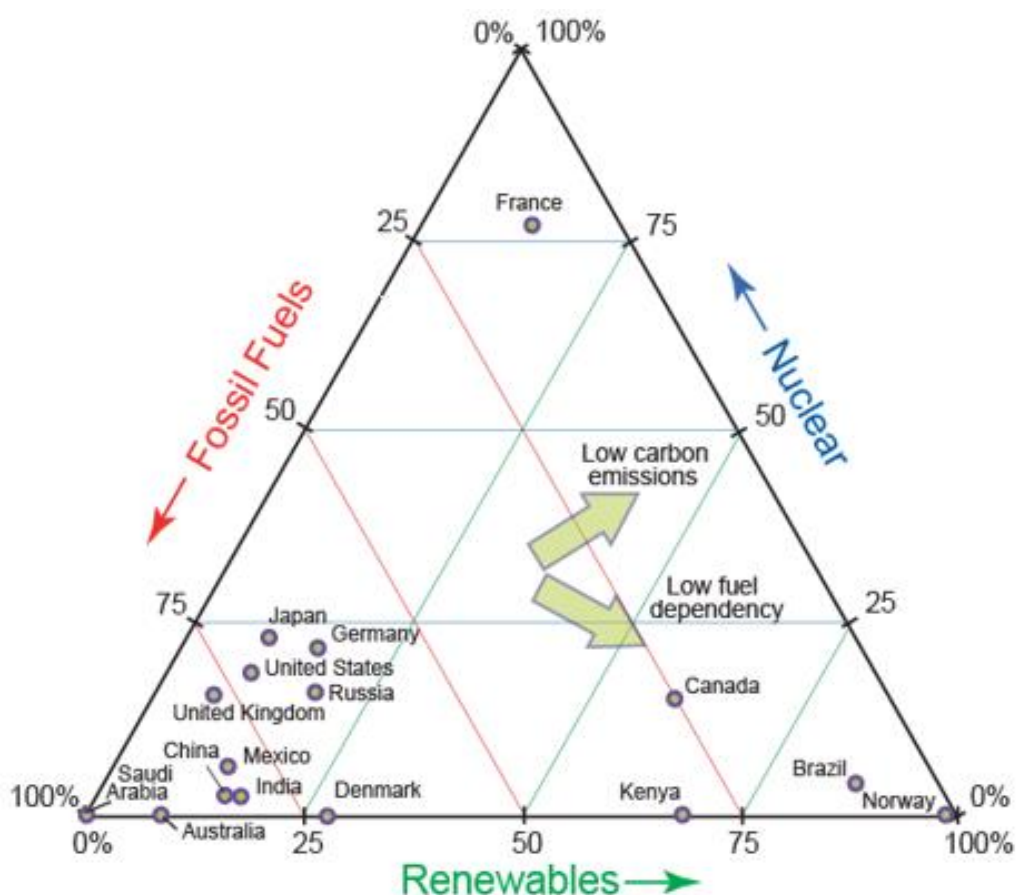
Ao finalizar e executar o *Eco Audit*, relatório detalhado é gerado. Neste relatório, é primeiramente exibido a contribuição relativa de cada fase da vida do produto em relação ao total de energia consumida e sua pegada de CO₂, evidenciando quais as fases críticas. Em seguida, são analisadas em detalhe a geração de energia e depois a pegada de CO₂, mostrando os dados obtidos para cada fase do ciclo de vida, que é dividida em material, manufatura, transporte, uso, disposição e potencial de fim de vida.

O *Eco Audit* ainda possibilita comparar a análise de um produto com um segundo produto, enriquecendo ainda mais os possíveis estudos que podem ser realizados utilizando a ferramenta. É possível copiar o produto atual e mudar somente as características que serão comparadas, como por exemplo, mudar somente o método de transporte e analisar como esta etapa afeta a produção de CO₂ e consumo

de energia. Alternativamente, pode-se comparar produtos completamente diferentes, mas com algumas semelhanças durante certas etapas o ciclo de vida.

Esta será a ferramenta utilizada para a ACV dos painéis solares de silício mono cristalino e será realizada a comparação entre estudos, nos quais apenas os países de utilização do painel serão mudados, possibilitando uma clara e direta comparação afim de entender como a matriz energética destes países afeta a geração de gases poluentes e consumo de energia. Em relação aos países onde as *Eco Audit* serão feitas, é importante analisar as respectivas matrizes energéticas. A **Figura 16** é um diagrama ternário com diversos países e suas correspondentes composições de matriz energética, dividida em energia nuclear, combustíveis fósseis e renováveis.

Figura 16: Diagrama Ternário de matrizes energéticas de alguns países (Fonte: (Ashby, 2011))



É interessante para enriquecer o estudo que países com matriz bastante distintas sejam comparados. O Brasil é um bom exemplo de país com matriz energética bastante renovável e limpa já que cerca de 70% de toda a energia produzida no país tem origem hidroelétrica (ANEEL, 2019) e uma boa opção de

contraposição seria a Austrália, que é altamente dependente de combustíveis fósseis, como o petróleo e carvão, para abastecer sua demanda energética (DEE, 2018).

Além dessas duas análises de países com matrizes polares e opostas, é interessante analisar países com matriz ligeiramente mais balanceada, com menor dependência de ambas fontes renováveis e não-renováveis, mas sim com uma composição delas. As análises destes países, deixará mais claro como a transição entre renováveis e não-renováveis afetará os resultados de consumo de energia e geração de CO₂. Canadá é uma boa escolha pois possui participação de fontes limpas de energia, porém é mais dependente que o Brasil em questão de combustíveis fósseis e Alemanha também, mas por depender menos de combustíveis fósseis que a Austrália, dessa forma montando um espectro de matrizes energéticas.

Além de possuírem matrizes energéticas ligeiramente diferentes, Canadá e Alemanha apresentam diferentes níveis de radiação solar média que Brasil e Austrália. Dessa forma, a comparação ganha mais um nível de profundidade, sendo possível analisar como o nível de radiação solar afeta o tempo de retorno energético e de CO₂ (Solargis, 2019).

4.2. ACV: Objetivo e escopo de trabalho

Um dos objetivos desta análise de ciclo de vida é obter dados atuais e confiáveis e, a partir deles, tentar obter números concretos em relação ao consumo energético e a pegada de CO₂ de um painel fotovoltaico de silício monocristalino, levando em consideração todas as fases relevantes durante o processamento e a fabricação de um painel solar fotovoltaico. Com esses dados, é possível inferir o tempo de retorno energético e de CO₂ do painel em questão. Para tal objetivo ser atingido, é necessário que sejam claramente definidas todas as características do painel modelo que será utilizado na análise de ciclo de vida, como: a dimensão do painel e número de células fotovoltaicas que o compõem; quais partes e materiais compõem o painel fotovoltaico; quais as dimensões dos diversos componentes; seus respectivos processos de extração e fabricação; tempo de vida útil do painel, ações que serão

tomadas no final de seu ciclo de vida e os dados de consumo energético e geração de gases poluentes nas fases relevantes.

Outro importante objetivo será comparar os dados de pegada de CO₂ e consumo energético de um painel fotovoltaico de silício monocristalino fabricado em países com matrizes energéticas diversas. Serão analisados, por exemplo, países com matriz altamente dependente de combustíveis fósseis, outros com forte presença de métodos renováveis de geração de energia e, por final, países com matrizes equilibradas, ou seja, uma mistura entre métodos de geração de energia renováveis e dependentes de combustíveis fósseis. O propósito desta segunda etapa é entender como e com qual intensidade a matriz energética de um país afeta o tempo de retorno, e logo, a viabilidade ambiental de fabricação de painéis fotovoltaicos.

Em relação ao escopo, o sistema *on-grid* foi escolhido pelas seguintes razões:

- É o sistema mais utilizado nacionalmente (eCycle, 2017).
- Como é ligado diretamente na rede elétrica, o sistema *on-grid* não necessita de baterias, simplificando a análise de ciclo de vida (Newkirk, 2014).
- É o sistema mais coerente com o trabalho, já que será analisado o impacto da substituição de certas fontes de energia pelos módulos solares e o sistema *on-grid* entra diretamente na rede elétrica nacional.

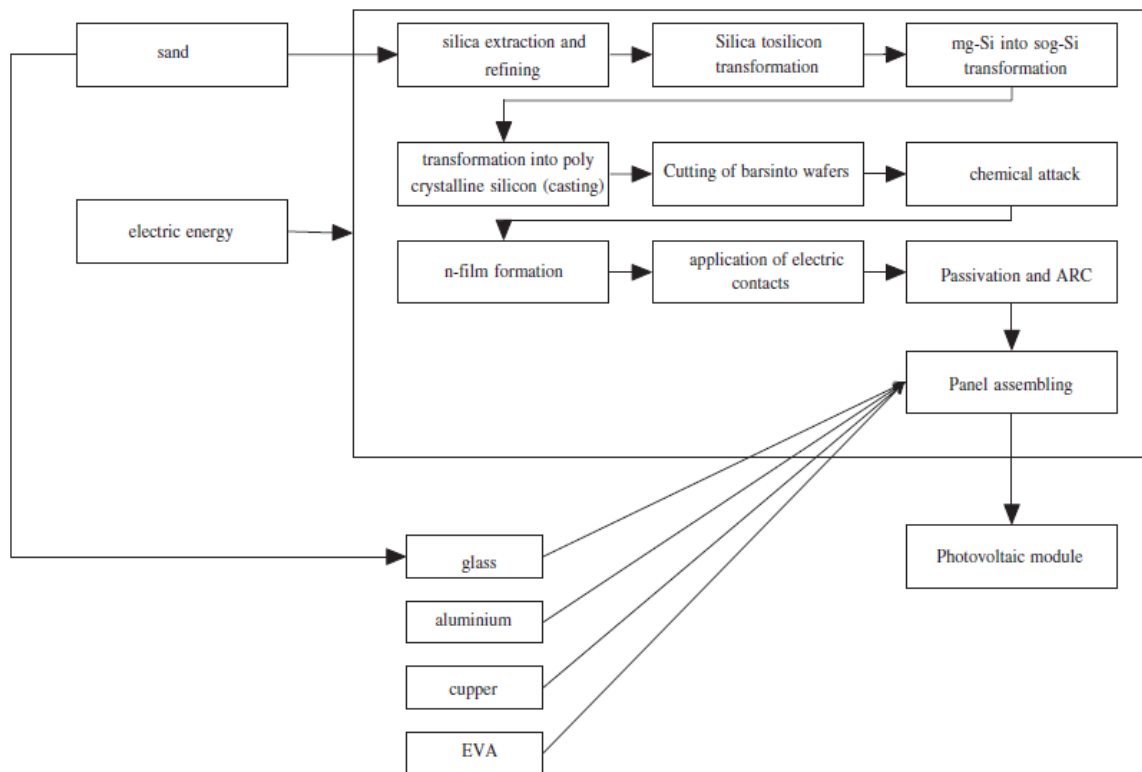
4.3. ACV: Inventário de Ciclo de Vida

Esta sessão foca nos dados de entrada do *software* CES Edupack. O painel fotovoltaico modelo utilizado neste trabalho será o de Silício Monocristalino. Esta escolha foi feita por algumas razões. A principal é que o silício monocristalino ainda é o material mais comumente utilizado em matriz fotovoltaicas, apesar de outras tecnologias terem crescido bastante nos últimos anos, como silício policristalino e Amorfo (Peng, et al., 2012). Além disso, silício monocristalino útil para aplicação em painéis solares é de complicada produção, utilizando muita energia e gerando quantidades consideráveis de GHG (*greenhouse gases*, gases de efeito estufa), predominantemente CO₂. Isso ocorre por que o silício utilizado deve conter alto grau

de pureza, com precisões até a sexta casa após a vírgula (99.999999% de Silício) e o processo é bastante complexo e faminto energeticamente (CGEE, 2009).

O processo de manufatura de um painel solar genérico de silício é mostrado na **Figura 17**. Nela, vemos desde a extração das matérias primas, até a montagem do painel em si, com os demais componentes.

Figura 17: Esquematisação do processo de produção de um painel fotovoltaico genérico (Fonte: (Stoppato, 2006))



Como mencionado anteriormente, devido às simplificações, a ACV será realizada exclusivamente levando em consideração aos materiais utilizados na entrada de dados na **Figura 17**. As etapas de produção mostradas na à cima são levadas em consideração durante a execução do *EcoAudit* e, dessa forma, será possível obter os dados de entrada totais (energia elétrica consumida e pegada de CO₂) para o processo como um todo. O processo será considerado idêntico em todos os países da ACV para homogeneizar a comparação entre os dados obtidos. Infelizmente, o *CES Edupack 2016* não apresenta uma grande nuance e considerar cada processo individualmente (como faz Stopatto *et al* 2006) não seria viável.

A primeira característica que deve ser definida são as dimensões do painel que iremos analisar. Painéis solares variam de tamanho de acordo com: o meio no qual serão utilizados (residencial ou comercial); principal tecnologia utilizada em sua fabricação (como silício monocristalino, amorfo, etc.) e até fabricante (Matasci, 2018). Porém, como já sabemos, painéis solares são compostos de diversas células solares e estas são, de modo geral, padronizadas em tamanhos de 6' x 6' (15,6cm x 15,6 cm), então os painéis em si são compostos de um número variável de células, que podem ir de 36 até 144 células, entretanto combinações entre 60 (para painéis residenciais) e 72 células (para instalações comerciais) são as mais comuns (Thoubboron, 2018). A fim de tornar os cálculos deste trabalho mais coerentes e atualizados, os principais produtos das maiores marcas fabricantes de painéis solares fotovoltaicos são analisados e os painéis mais comumente utilizados em contextos residências para sistema *on-grid* serão levados em consideração. As marcas analisadas foram: LG (LG) , Panasonic (Panasonic) e Canadian Solar (CanadianSolar).

Existe uma grande variação no número de células utilizadas em um painel dentro das marcas escolhidas. As mais comuns possuem 60 células fotovoltaicas, mas este número pode chegar até 96 células. Para simplificar a entrada de dados, o painel de 60 células será utilizado em uma distribuição de 6 x 10. Em específico, o painel padrão da *Canadian Solar* será a base (CanadianSolar). Este produto possui geração de energia avaliada em 300 W, dimensões de 992 x 1650 x 35 mm e massa de 18.2 kg, com armação de liga de alumínio anodizado e cobertura frontal de vidro temperado de espessura de 3.2 mm. Também para simplificar a entrada de dados, a lista de materiais que serão utilizados na análise foi baseada no artigo do IRENA (2016) no qual a composição de um painel solar de silício cristalino é dividida em porcentagem em massa. Segundo a fonte, painéis solares atuais são compostos por 76% de vidro (cobertura do painel), 10% de EVA (encapsulamento e parte traseira), 8% de alumínio (armação), 5% de silício (células fotovoltaicas) e o restante de outros metais que compõem os conectores. Para simplificar, os metais de menor composição serão ignorados. Estas proporções apresentadas serão extrapoladas para o painel da *Canadian Solar*. Então, pode-se assumir que a massa de 18,2 kg que o painel apresenta é composta de: EVA, armação de alumínio, painel de vidro temperado e o silício monocristalino presente. Os dados de entrada no *CES Edupack* estão apresentados na **Figura 18**:

Figura 18: Lista de Materiais utilizados como entrada no *software*, baseado na composição da Irena (2016) (Fonte: autoria própria)

Qty.	Component name	Material	Recycled content	Mass (kg)	Primary process	End of life
1	Células	Single crystalline silicon	Virgin (0%)	1,11	Incl. in material value	Landfill
1	Moldura	Aluminum, commercial	Typical %	1,82	Casting	Recycle
1	EVA	EVA (Shore A85, 25% vi	Virgin (0%)	1,45	Polymer extrusion	Combust
1	Cobertura de Vidro	Alumino silicate - 1720	Virgin (0%)	13,82	Glass molding	Recycle

Na fase de transporte, foi necessário realizar uma simplificação. Como o estudo tem como objetivo a comparação dos índices obtidos através do *Eco Audit* nos países definidos, a fase de transporte seria distinta para cada país, gerando emissões de CO₂ totais diferentes, dificultando as comparações posteriores.

Os países definidos foram Brasil, Canadá, Alemanha e Austrália. Para os países com matriz energética bastante dependente de combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás a fabricação de tecnologias deve, em teoria, ter uma maior geração de gases poluentes por unidade de energia gerada bastante alta. Os outros países analisados possuem a sua matriz energética limpa, com grande porcentagem de sua produção energética gerada por fontes limpas e renováveis, como torres eólicas, hidroelétricas, painéis solares, entre outros. Comparativamente, estes países apresentarão uma menor quantidade de gases poluentes por unidade de energia gerada.

Certas simplificações, limitações e pressupostos serão impostos para tornar a obtenção e o tratamento dos dados um pouco mais dinâmica. Claro que estas limitações serão devidamente explicitadas e são coerentes com o contexto do estudo. O *software CES Edupack* possui algumas limitações e, por isso, o trabalho deve ser moldado de acordo com essas restrições.

Em relação ao painel escolhido, apesar de ser um produto existente de uma marca que possui fabricas em locais específicos, será assumido que o painel é fabricado no mesmo país onde será utilizado, assim deixando mais claro o impacto que a matriz energética daquela país representa no ciclo de vida do painel fotovoltaico.

O *CES Edupack*, na entrada de dados para o uso do produto, apresenta a opção de escolher o tipo de *input* e *output* energético. Neste caso, podemos escolher a opção '*Light to electric (solar cell)*' e para esta escolha, o *software* não leva em

consideração a geração de CO₂ durante o uso do produto, somente nas fases de extração, produção e manufatura. O mesmo vale para a energia consumida.

Com essas considerações, serão necessários alguns passos para obter os dados. Ao obter os números de geração de CO₂ e consumo energético nas fases iniciais, deve-se levar em consideração o fator de kg de CO₂ gerado por kWh disponível no país, obtendo assim o total de CO₂ gerado nas fases iniciais. Após essa primeira etapa, sabendo os valores de radiação solar nos países estudados, a potência do painel e sua eficiência, calcula-se kWh gerados pelo painel naquele país específico. E, com este dado, é possível calcular o tempo de retorno energético e CO₂ economizado, mostrado na **Tabela 1**:

Tabela 1: Pegada de CO₂ e Radiação Solar Global (Fontes: (EPE, 2018) (Stoppato, 2006) (Solargis, 2019))

País	Cidade	Pegada de CO₂ (kgCO₂/kWh)	Radiação Solar Global (kWh/m²)
Alemanha	Berlim	0,573	1062
Austrália	Sydney	0,840	1627
Brasil	São Paulo	0,104	1689
Canadá	Vancouver	0,244	1245

4.4. ACV: Avaliação de Impacto Ambiental

A etapa de avaliação de impacto ambiental será realizada no item 5.

4.5. ACV: Interpretação

A etapa de interpretação da análise de ciclo de vida será realizada no item 6

5. RESULTADOS

5.1. Avaliação de impacto ambiental

Segundo os dados obtidos no *CES Edupack* e utilizando a unidade funcional decidida na seção anterior, o painel fotovoltaico CS6K-300 da *Canadian Solar* de 18,2 kg e 1,64 m² consome, durante seu ciclo de vida, um total de 2600 MJ (ou 722 kWh) e produz 187 kg de CO₂ por painel produzido. Na **Tabela 2** estão expostos os valores de consumo de energia e de pegada de CO₂ durante o ciclo de vida do painel fotovoltaico de silício monocristalino, com as contribuições percentuais para cada fase do ciclo.

Tabela 2: Resultados de consumo de energia e pegada de CO₂ do CES Edupack 2016 (Fonte: autoria própria)

Phase	Energy (MJ)	Energy (%)	CO2 footprint (kg)	CO2 footprint (%)
Material	2,41e+03	92,5	171	91,7
Manufacture	184	7,1	14,6	7,8
Transport	0	0,0	0	0,0
Use	0	0,0	0	0,0
Disposal	11,9	0,5	0,833	0,4
Total (for first life)	2,6e+03	100	187	100
End of life potential	-222		-11,5	

É necessário analisar separadamente a geração de CO₂ e o consumo de energia para cada fase do processo. O *Eco Audit* gera gráficos e tabelas para cada fase. Na **Figura 19** e na **Tabela 3** seguir mostram os dados obtidos pelo *Eco Audit* para a geração de energia.

Figura 19: Consumo de energia por fase (Fonte: autoria própria)

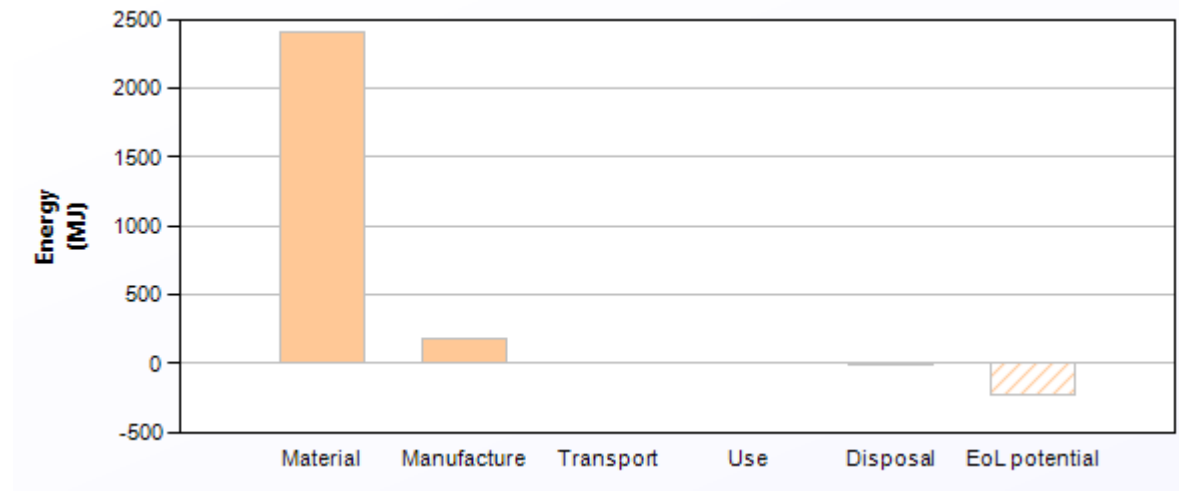


Tabela 3: Consumo de energia por material (Fonte: autoria própria)

Component	Material	Recycled content* (%)	Part mass (kg)	Qty.	Total mass (kg)	Energy (MJ)	%
Células	Single crystalline silicon, photovoltaics	Virgin (0%)	1,1	1	1,1	1,9e+03	77,5
Moldura	Aluminum, commercial purity, S150.1: LMO-M, cast	Typical %	1,8	1	1,8	2,3e+02	9,8
EVA	EVA (Shore A85, 25% vinyl acetate)	Virgin (0%)	1,5	1	1,5	1,1e+02	4,8
Cobertura de Vidro	Alumino silicate - 1720	Virgin (0%)	14	1	14	1,9e+02	8,0
Total				4	18	2,4e+03	100

*Typical: Includes 'recycle fraction in current supply'

Na análise energética, o impacto da fase de material na porcentagem total de energia consumida é bastante alto como pode ser visto na **Figura 19**, sendo responsável por mais de 2400 MJ dos 2600 MJ totais. Na **Tabela 3** fica claro que tal importância da fase de material se dá por conta da extração e processamento do silício monocristalino, que contabiliza 77,5% de toda a energia consumida durante a fase de material, apesar de ser o componente com menor massa percentual.

Como a energia elétrica utilizada para a extração e o processamento destes materiais é proveniente de algum processo que gera CO₂, é necessário calcular a pegada de CO₂ que está relacionada à esta energia utilizada. A quantidade de CO₂ gerado será diferente para cada país já que as matrizes energéticas diferem entre si. Os dados de pegada de CO₂ da **Tabela 4** serão utilizados para estes cálculos.

Tabela 4: Pegada de CO₂, Energia Consumida e CO₂ gerado por país (Fonte: (EPE, 2018) (Stoppato, 2006))

País	Pegada de CO ₂ (kgCO ₂ /kWh)	Energia Consumida (kWh)	CO ₂ gerado (kg CO ₂)
Alemanha	0,573	722	413,7
Austrália	0,840	722	606,5
Brasil	0,104	722	75,1
Canadá	0,244	722	176,2

Agora, serão analisados os dados de geração de CO₂ proveniente dos processos em si, sem relação com a energia utilizada no processo. A **Tabela 5** e a **Figura 20** mostram estes dados, primeiro divididos por etapas do ciclo de vida e depois mostrando a contribuição individual de cada material:

Figura 20: Geração de CO₂ por fase do ciclo de vida (Fonte: autoria própria)

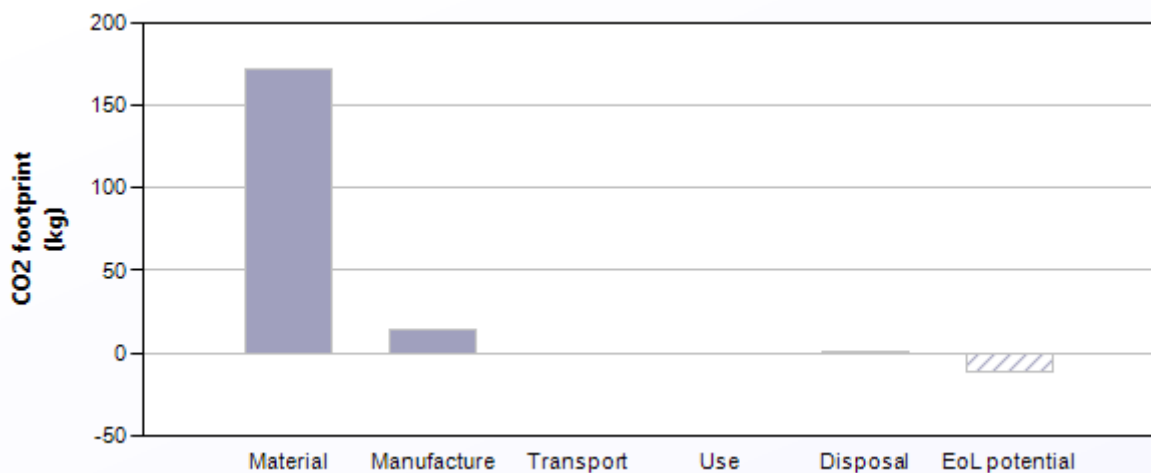


Tabela 5: Geração de CO₂ por material (Fonte: autoria própria)

Component	Material	Recycled content* (%)	Part mass (kg)	Qty.	Total mass (kg)	CO2 footprint (kg)	%
Células	Single crystalline silicon, photovoltaics	Virgin (0%)	1,1	1	1,1	1,4e+02	81,6
Moldura	Aluminum, commercial purity, S150.1: LMO-M, cast	Typical %	1,8	1	1,8	16	9,1
EVA	EVA (Shore A85, 25% vinyl acetate)	Virgin (0%)	1,5	1	1,5	3,1	1,8
Cobertura de Vidro	Alumino silicate - 1720	Virgin (0%)	14	1	14	13	7,6
Total				4	18	1,7e+02	100

*Typical: Includes 'recycle fraction in current supply'

É possível verificar que, novamente, grande parte do CO₂ gerado durante o ciclo de vida do painel solar tem origem na etapa de material. E 81,5% de todo o CO₂ gerado durante a etapa de material provém da extração e produção do silício monocristalino. O processo de purificação do silício metalúrgico para que se torne próprio para a utilização em painéis fotovoltaicos (conhecido como silício de grau solar) é um processo que necessita de grandes quantidades de energia e é bastante poluente. De forma geral, os dados obtidos através do *Eco Audit* são coerentes.

É necessário somar as gerações de CO₂ obtidas: aquela relacionada com os rejeitos dos processos e aquela proveniente da energia elétrica utilizada. Assim, obtém-se a pegada total de CO₂ emitida para produzir um painel solar CS6K-300 da *Canadian Solar*, nos 4 países estudados, como mostra a **Tabela 6**.

Tabela 6: Pegada de CO₂ Total, por país (Fonte: autoria própria)

País de fabricação e uso	Pegada de CO ₂ (matriz energética) (kg CO ₂)	Pegada de CO ₂ (processos) (kg de CO ₂)	Pegada Total de CO ₂ (kg de CO ₂)
Alemanha	413,7	186	599,7
Austrália	606,5	186	792,5
Brasil	75,1	186	261,1
Canadá	176,2	186	362,2

Por fim, pode-se consolidar na **Tabela 7** a pegada total de CO₂ e a energia consumida para a produção de um único painel fotovoltaico CS6K-300 da *Canadian Solar*, para cada um dos países, facilitando a leitura dos dados. Apesar de todos os

países consumirem a mesma quantidade de energia, cada um gera uma quantidade de CO₂, devido as diferentes matrizes energéticas.

Tabela 7: Pegada de CO₂ Total e Energia consumida, por país (Fonte: autoria própria)

País de produção	Pegada Total de CO₂ (kg CO₂)	Energia Consumida (MJ)
Alemanha	599,7	2600
Austrália	792,5	2600
Brasil	261,1	2600
Canadá	362,2	2600

5.2. Análise dos resultados

A análise de ciclo de vida de um painel solar em diferentes regiões mostrou que, em países com uma matriz energética mais dependente de combustíveis fósseis, como Alemanha e Austrália, as fases iniciais de material e manufatura geram uma quantidade consideravelmente maior de gás carbônico que os países com *mix* energético mais limpo e sustentável. Mesmo considerando o processo de fabricação idêntico em cada região e, logo, os processos consomem a mesma quantidade de energia elétrica. Isso ocorre, pois, cada unidade de energia gerada nestes país com matriz energética 'suja' gera uma massa maior de CO₂ quando comparados com a geração de gás carbônico no Brasil e Canadá. A pegada total de CO₂ chega a ser entre 1,65 e 3 vezes maior na Austrália e Alemanha.

5.3. Tempo de retorno energético e mitigação de CO₂

Agora que os dados de pegada de CO₂ e consumo energético foram devidamente calculados, é necessário estudar como os diferentes tipos de matrizes energéticas impactam o tempo de retorno energético e de mitigação de CO₂ para o painel fotovoltaico estudado.

O tempo de retorno energético (em Inglês: *Energy PayBack Time [EPBT]*), é o tempo, em anos, no qual o painel recupera a energia que foi consumida durante seu processamento. A fórmula utilizada será:

$$EPBT = \frac{e_{entrada}}{e_{saída}} \dots\dots \text{Equação 1}$$

Onde:

$e_{entrada}$ [kWh] é a energia necessária para todo o processamento do painel, já calculada na seção anterior e $e_{saída}$ [kWh] é a energia gerada pelo painel.

Como $e_{entrada}$ já é conhecido, basta calcular $e_{saída}$. Para isso, a seguinte fórmula será utilizada:

$$e_{saída} = A \times \eta \times H \times CP \dots\dots \text{Equação 2}$$

Onde:

A é a área total do painel solar na qual incide a luz solar, η é a eficiência do painel, H é a radiação solar média anual e CP é o coeficiente de perdas, geralmente é adotado um valor de 0,75.

Ainda é necessário obter os dados de produção anual de energia para o painel solar, os quais serão diferentes para cada país analisado, já que a radiação solar muda de uma região para a outra. Na **Tabela 8**, temos os níveis de radiação solar global para cada país. Como ocorrem grandes variações nos níveis de radiação, foram escolhidas cidades específicas, assim facilitando a obtenção dos dados de radiação solar. As cidades escolhidas foram escolhidas conforme sua relevância econômica no país. Estes dados foram obtidos do *Global Solar Atlas* (Solargis, 2019).

Tabela 8: Radiação Solar Global Anual nas respectivas cidades (Fonte: (Solargis, 2019))

País	Cidade	Radiação Solar Global Anual (kWh/m ²)
Alemanha	Berlim	1062
Austrália	Sydney	1627
Brasil	São Paulo	1689
Canadá	Vancouver	1245

É possível calcular a $e_{saída}$ utilizando a Equação 2. Por fim, calcula-se o EPBT e o *ERF* (*energy return factor*) que é a razão entre a expectativa de vida do painel (25 anos neste caso) e o EPBT, representando assim o número de vezes que o painel solar devolve a energia necessária para sua produção. Os valores estão expostos na **Tabela 9**.

Tabela 9: Tempo de retorno energético e ERF para cada cidade (Fonte: autoria própria)

Cidade	Radiação Solar Global Anual (kWh/m²)	$e_{saída}$ (kWh/ano)	EPBT (anos)	ERF
Berlim	1062	239	3,0	8,3
Sydney	1627	366	2,0	12,5
São Paulo	1689	380	1,9	13,2
Vancouver	1245	280	2,6	9,6

O próximo passo é calcular o tempo no qual o painel solar mitiga uma quantidade de CO₂ equivalente àquela gerada durante sua produção. Para isso, basta utilizar o dado de $e_{saída}$ e multiplicar pelo fator de pegada de CO₂ por kWh proveniente da matriz energética do país analisado, assim calculando a massa de gás carbônico mitigado por ano pelo painel solar. Então, basta dividir pela pegada total de CO₂ produzida pelo painel e então teremos o tempo, em anos, no qual o produto se equilibra ambientalmente. Todos os resultados estão na **Tabela 10**.

Tabela 10: quilogramas de CO₂ mitigados por ano e tempo de mitigação de CO₂ para cada cidade (Fonte: autoria própria)

Cidade	Pegada de CO₂ (kgCO₂/kWh)	Pegada Total de CO₂ (kg de CO₂)	CO₂ mitigado (kg CO₂/ano)	Tempo de mitigação de CO₂ (anos)
Berlim	0,573	599,7	136,9	4,4
Sydney	0,840	792,5	307,4	2,6
São Paulo	0,104	261,1	39,5	6,6
Vancouver	0,244	362,2	68,32	5,3

6. DISCUSSÃO

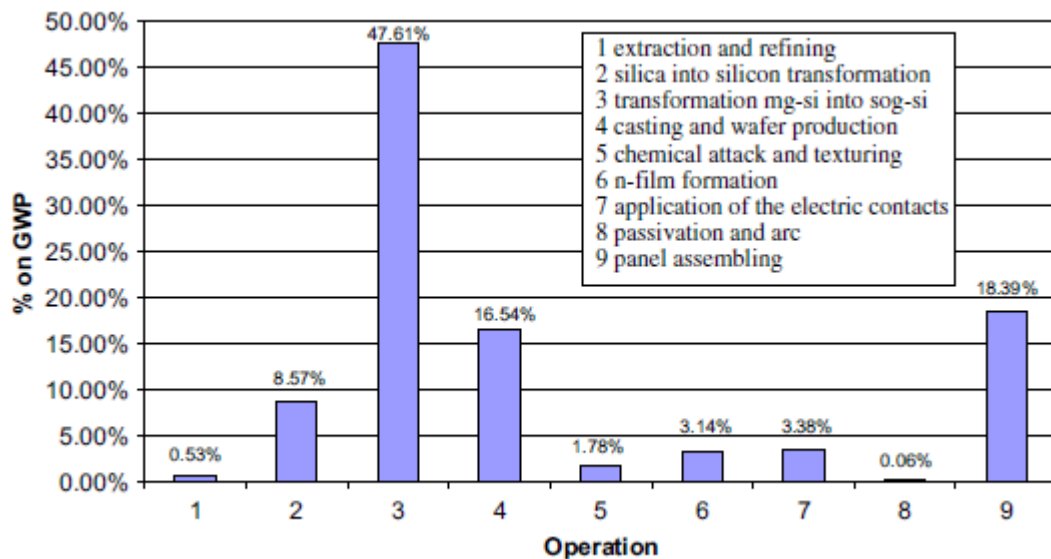
Os objetivos do trabalho giravam em torno da realização de uma ACV para um painel fotovoltaico em sistema *on-grid* e a análise dos dados obtidos. Também era um dos objetivos estimar a pegada de CO₂ em diferentes países e entender como a matriz energética de cada um mudaria os tempos de retorno energético e de mitigação de CO₂ para o painel estudado. Por fim, entender, no cenário brasileiro, como se daria a substituição de fontes termoelétricas e hidroelétricas por energia solar fotovoltaica. Esta sessão discute se esses objetivos foram realizados e como os resultados obtidos se comparam com aqueles já vistos na literatura adjunta

6.1. ACV, EPBT e Mitigação de CO₂

Na ACV do painel fotovoltaico CS6K-300 da *Canadian Solar*, os dados mostram que os processos onde o silício está envolvido são os mais energeticamente famintos e mais poluentes, onde a purificação do silício metalúrgico em silício grau solar é o fator mais pesado, independente da escolha de país onde a análise foi realizada. Este resultado já era o esperado e está refletido nas análises realizadas por estudo anteriores.

No estudo de Stoppato (2006) onde uma análise mais minuciosa dos processos é realizada, autoria própria conclui que a fase mais crítica é a transformação de silício metálico para silício grau solar, tanto no consumo de energia quanto na geração de CO₂. A **Figura 21** mostra a geração de CO₂ (como porcentagem do potencial para o efeito estufa (GWP)) para cada um dos processos.

Figura 21: Contribuição de cada operação para a emissão de CO₂, como porcentagem de GWP = 80kg CO₂/painel (Fonte: (Stoppato, 2006))



Em relação aos cálculos de *EPBT*, vê-se que, em países com maior intensidade de radiação solar, o tempo de retorno energético é menor, como já era de se esperar. Entretanto, o *EPBT* não varia muito, apresentando um tempo máximo de 3 anos para o uso do painel na Alemanha e um mínimo de 1,9 anos para o Brasil. Considerando o índice *ERF* calculado para cada país, o painel pode produzir, no pior dos casos, 8,33 vezes a energia necessária para produzi-lo. No caso de Stoppato (2006), um *ERF* de 8 vezes representava o melhor cenário. Essa divergência de resultados pode ser dar devido a melhorias tecnológicas entre os painéis estudados, já que o estudo mencionado foi realizado a cerca de 11 anos atrás, período no qual a tecnologia fotovoltaica avançou consideravelmente.

Já no estudo de Peng et al (2012), painéis de silício monocristalino mostraram grande variação de *EPBT*, para as quais autoria própria atribuiu uma grande variação de radiação solar. Ao considerar regiões com irradiação anual similar à aquela de São Paulo e Sydney (*South-European/China*, mostrados na **Figura 22**), os *EPBTs* vão de 1,7 a 2,6 anos, valores muito próximos aos apresentados por Brasil e Austrália, que são, respectivamente, 1,9 e 2.

Figura 22: resultados de tempo de retorno e emissão de CO₂ para sistema de silício monocristalino em localidades com diferentes irradiações (Fonte: (Stoppato, 2006))

Table 5
LCA results review of mono-Si PV systems.

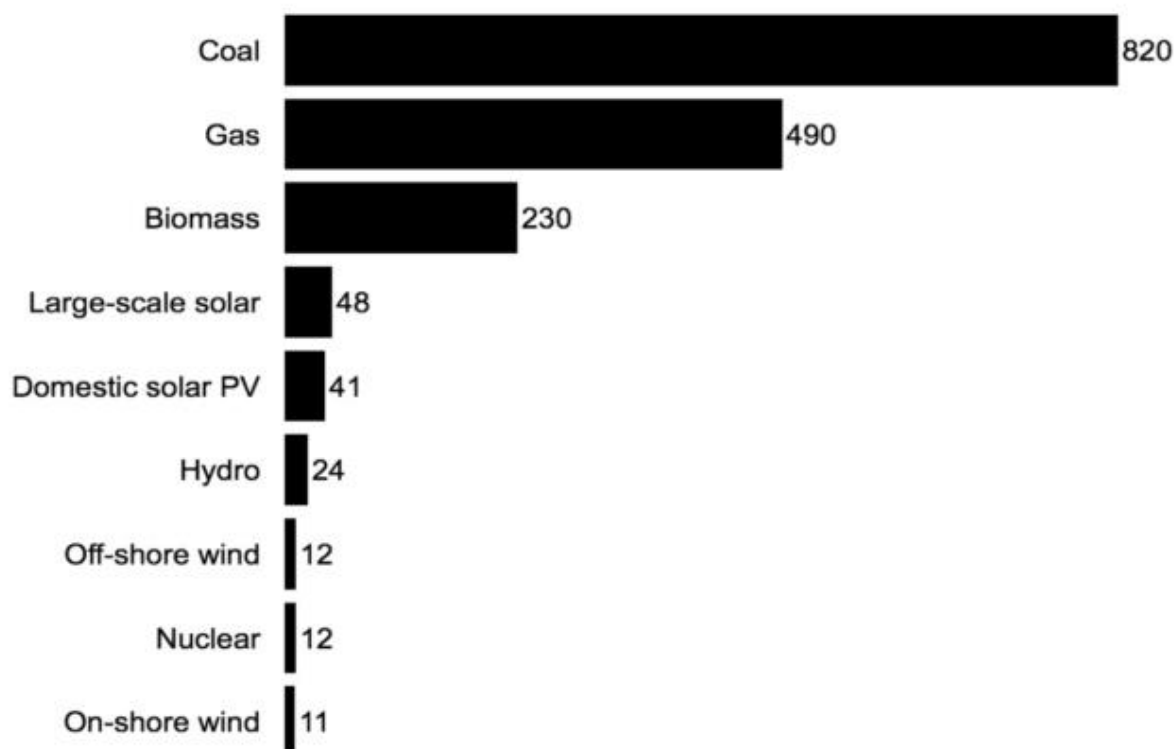
No.	Authors/years	Location/irradiation (kW h/m ² /yr)	Module efficiency	Life time (yr)	Perf. ratio	EPBT (yr)	GHG emissions rate (g CO ₂ -eq./kW he)	Remark
1	Wilson and Young [86]	UK/573–1253	12%	20	0.8	7.4–12.1	N/A	Frame
2	Kato and Murata [35]	Japan/1427	12.2%	20	0.81	8.9	61	The multi-Si and the SiCl ₄ shared the energy requirement and the CO ₂
3	Alsema and Wild-Scholten [59]	South-European/1700	13.7%	30	0.75	2.6	41	Frame
4	Alsema and Wild-Scholten [24]	South-European/1700	14.0%	30	0.75	2.1	35	Frame
5	Jungbluth and Dones [18]	Switzerland/1117	14.0%	30	0.75	3.3	N/A	Slanted-roof, frame, mounted
6	Wild-Scholten [41]	South-European/1700	14.0%	30	0.75	1.75	30	Frameless, on-roof installation
7	Ito and Komoto [73]	China/1702	N/A	N/A	0.78	2.5	50	Very-large scale PV systems installed in desert

A análise de tempo de mitigação de CO₂ apresentou os resultados esperados, mas deles podem ser feitas boas discussões. Nos países com *mix* de energia com forte presença de combustíveis fósseis e, logo, com maior pegada de CO₂, o tempo de mitigação se mostrou menor que aqueles países com matriz energética limpa. Isso ocorre, pois, cada unidade de energia gerada pelo painel solar na Alemanha ou na Austrália, economiza uma quantidade muito maior de CO₂ do que no Brasil ou Canadá, onde a matriz é limpa. Apesar da produção do painel gerar uma pegada de CO₂ maior na Austrália e Alemanha, o uso do painel fotovoltaico apresenta um impacto positivo muito maior nestes mesmos países, já que sua matriz é tão pobre de fontes renováveis de energia. Esta análise foi executada da mesma forma nos outros estudos.

6.2. Substituições na Matriz Energética Brasileira

Afim de entender como a geração elétrica fotovoltaica atuaria no setor energético brasileiro, será analisada a substituição das duas principais formas de geração elétrica no Brasil: hidroelétricas e termoelétricas (ANEEL, 2019). A **Figura 23** mostra as emissões de CO₂ durante a geração de eletricidade para as principais fontes energéticas utilizadas atualmente (IPCC, 2011). Assumindo que estes valores são refletidos também no cenário brasileiro, é possível analisar o impacto da substituição de hidroelétricas e termoelétricas por fazendas fotovoltaicas. O valor assumido para energia solar será o de fotovoltaico doméstico pois é o foco deste trabalho.

Figura 23: Emissões de ciclo de vida provenientes de geração de eletricidade, em gCO₂/kWh (Fonte: (IPCC, 2011))



Vê-se que, apesar de solar apresentar níveis de emissão mais baixos que aqueles de termelétricas (carvão, gás e biomassa), quando comparados com outras fontes, energia fotovoltaica apresenta emissões maiores. Deve-se, no caso do Brasil, tomar atenção especial às baixas emissões apresentadas pelas fontes hidráulicas, já usinas hidrelétricas são responsáveis por mais de 60% de toda a geração de eletricidade no país (ANEEL, 2019). Além disso, os investimentos necessários para 1 MW de capacidade instalada de energia solar é consideravelmente mais cara que todas as outras formas de geração, exceto energia nuclear, como mostra a **Tabela 11**.

Tabela 11: Custo de 1 MW de potência instalada por fonte, em dólares (Fonte: (Escolhas, 2016))

	US\$/MW
Hidrelétrica	3.782.000
Eólica	4.466.000
Solar	4.847.000
Térmica a Biomassa	3.049.000
Térmica a Gás Natural	4.365.000
Térmica a Carvão Mineral	3.050.000
Nuclear	5.400.000

Assim, o custo alto e o baixo potencial de mitigação de CO₂ tornam a energia solar uma má opção para substituir energia elétrica. Em comparação com termoelétricas, porém, a emissão de geração de energia fotovoltaica é de 5 (no caso de termoelétricas de biomassa) à 18 vezes (no caso de termoelétricas de carvão mineral) menor. Neste caso, apesar de continuar sendo uma tecnologia que necessita de um investimento inicial mais elevado, ambientalmente energia solar é uma opção superior.

Considerando estas análises, existem duas principais incentivos que devem ser aplicados em relação à energia solar:

- Cultivar alternativas ou melhorias aos processos produtivos (principalmente durante a purificação do silício) para baratear o custo total da tecnologia. Dessa forma, tornando energia solar mais competitiva contra termoelétricas.
- Desenvolver novos métodos tecnológicos que aumentem a eficiência dos painéis solares, gerando uma quantidade menor de CO₂ por MW instalado, tornando a geração fotovoltaica mais competitiva contra usinas hidrelétricas.

6.3. Avaliação da Metodologia

Utilizar a análise de ciclo de vida em conjunto com *software CES Edupack 2016* foi bastante simples, mas, ao mesmo tempo, mostrou resultados bastante consistentes com a literatura utilizada. De forma geral, os índices e dados obtidos

durante as análises se encontram dentro dos limites apresentados pelos estudos utilizados como base (Stopatto (2006) e Peng et al (2012)). Apesar do programa utilizado não levar em conta todas as complexidades que os estudos mencionados contabilizam, os resultados continuaram coerentes, mostrando que as simplificações e as limitações assumidas neste trabalho foram bem implementadas.

7. CONCLUSÕES

1. Para aplicação do software *Cambridge Engineering Selector* Edupack 2016, da Granta Design, muitas simplificações dos processos envolvidos no ciclo de vida do painel foram necessárias. Os estudos realizados apresentam um nível muito mais elevado de detalhes.
2. Apesar disso, os resultados para a ACV do painel fotovoltaico em silício monocristalino, com área de 1,64 m² e utilizado em um sistema *on-grid* foram bastante coerentes com a bibliografia apresentada. A fase de material é o momento mais crítico do ciclo de vida do produto, contribuindo com 91,7% (171 kg de CO₂) de todo o CO₂ emitido. O silício monocristalino é responsável pela emissão 140 kg de CO₂ por painel, totalizando 74,8% da pegada de CO₂ do gerador durante todo o processo.
3. A utilização de painel solar em um sistema *on-grid* é preferencial em países com matrizes energéticas sujas, ou seja, aqueles que dependem mais de termoelétricas, pois o impacto da geração fotovoltaica é muito maior neste caso, com tempos de mitigação de consideravelmente menores. O tempo de mitigação de CO₂ para as quatro cidades analisadas foram:
 - Em Berlin, na Alemanha: 4,4 anos
 - Para Sydney, Austrália: 2,6 anos
 - São Paulo, Brasil: 6,6 anos
 - Para Vancouver, no Canadá: 5,3 anos
4. Já em relação ao tempo de retorno energético, como a energia consumida é a mesma para todos os países, os períodos necessários para recuperação são menores em países com maior nível de insolação. No caso, Brasil e Austrália. O tempo de retorno energético para as quatro cidades foram:
 - Em Berlin, na Alemanha: 3 anos
 - Para Sydney, Austrália: 2 anos
 - São Paulo, Brasil: 1,9 anos
 - Para Vancouver, no Canadá: 2,6 anos
5. De forma geral, a utilização de tecnologias de energia solar são ótimos meios sustentáveis. Mesmo nas piores condições de radiação solar, o EPBT do painel estudado é muitas vezes menor que o tempo de operação dado pelo fabricante.

6. Em relação ao Brasil, ainda são necessários alguns avanços na energia solar para que ganhe mais espaço na matriz energética. Em relação ao investimento necessário para a sua geração quanto, esses valores ainda precisam cair consideravelmente para se compararem com aqueles apresentados por termoelétrica. E é necessário que a eficiência desta tecnologia suba para competir com a geração hidráulica, mas este segundo ponto parece ser improvável dadas as limitações da tecnologia fotovoltaica.

8. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Existem algumas possibilidades de continuações deste trabalho. Uma análise interessante de ser realizada é o caso no qual o painel solar de silício monocristalino é fabricado em um país, transportado e utilizado em um segundo país com matriz elétrica diferente de seu local de origem. Existem diversas combinações diferentes de país de origem, modo de transporte e país de uso que podem ser estudadas, possibilitando o entendimento de muitos casos mais complexos que os apresentados neste trabalho e que podem ser mais próximos de situações reais. Além disso, a comparação dos resultados com os exibidos neste trabalho podem trazer conclusões interessantes.

Uma das possibilidades para trabalhos futuros é aumentar o escopo do estudo. Avaliar a ACV e comparar os resultados de retorno de CO₂ e retorno energético referentes à outras tecnologias utilizadas em painéis solares, como silício policristalino, silício amorfo, filmes finos, entre outros. Levar em consideração países com diferentes composições de matriz elétrica do que aquelas apresentadas neste trabalho. França, por exemplo, possui alta presença de energia nuclear em sua matriz elétrica e analisar a influência de energia solar neste contexto pode trazer resultados interessantes.

Uma outra possibilidade é estudar mais a fundo os efeitos econômicos e ambientais da geração distribuída, particularmente no Brasil. Entender como um número mais elevado de pessoas gerando sua própria eletricidade e agregando os excedentes à rede pública afeta a matriz energética brasileira.

Por fim, é importante aprofundar os estudos em relação aos impactos de fim de vida de semicondutores de silício. Analisar os efeitos ambientais da disposição indevida desta tecnologia, como por exemplo em lixões e avaliar a viabilidade tecnológica e ambiental de utilizar painéis solares não virgens, ou seja, com uma certa quantidade de componentes reutilizados ou reciclados.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdmouleh, Zeineb, Alammari, Rashid e Gastli, Adel. 2015. Review of policies encouraging renewable energy integration & best practices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 45.

ABNT. 1997. ISO 14040. Environmental management – life cycle assessment – principles and framework.

— **1998.** ISO 14041. Environmental management – life cycle assessment – goal and scope definition and inventory analysis.

— **2000.** ISO 14042. Environmental management – life cycle assessment – life cycle impact assessment.

— **2000.** ISO 14043. Environmental management – life cycle assessment – life cycle interpretation.

Adams, W.G. e Days, R.E. 1877. The Action of light on selenium. *Proceedings of the Royal Society*.

Aldous, Scott e Toothman, Jessika. 2000. How Solar Cells Work. *howstuffworks*. [Online]. [Citado em: 25 de Junho de 2019.] <https://science.howstuffworks.com/environmental/energy/solar-cell.htm>.

Ali, M.F. e Houssain, M.F. 2017. Influence of Front and Back Contacts on Photovoltaic Performances of p-n Homojunction Si Solar Cell: Considering an Electron-Blocking Layer. *International Journal of Photoenergy*.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. 2019. *BIG - Banco de Informações de Geração*.

— **2019.** Brasil ultrapassa marca de 1GW em geração distribuída. *.aneel.gov.br*. [Online] 11 de Junho de 2019. [Citado em: 20 de Novembro de 2019.] https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/brasil-ultrapassa-marca-de-1gw-em-geracao-distribuida/656877.

—. 2018. Geração Distribuída. *aneel.gov.br*. [Online] 15 de Agosto de 2018. [Citado em: 27 de Novembro de 2019.] <https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>.

ANEEL, <https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>. 2012. RESOLUÇÃO NORMATIVA . RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012.

Ashby, M.F. 2011. *Material Selection in Mechanical Design*.

Benson, Christopher e Magee, Christopher. 2014. *On improvement rates for renewable energy technologies: Solar PV, wind turbines, capacitors, and batteries*. Cambridge : Massachusetts Institute of Technology.

BNDES. 2018. A energia solar no Brasil. *bndes.gov.br*. [Online] 24 de Agosto de 2018. [Citado em: 20 de Novembro de 2019.] <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/noticias/noticia/energia-solar>.

BousteadConsulting. 2013. Boustead Consulting. <http://www.bousteadusa.com/>. [Online].

CanadianSolar. Canadian Solar. [Online] [Citado em: 05 de Novembro de 2019.] <https://www.canadiansolar.com/>.

—. Solar Modules. *canadiansolar.com*. [Online] [Citado em: 5 de Novembro de 2019.] <https://www.canadiansolar.com/solarPanels/detail/33>.

CGEE, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. 2009. *PRODUÇÃO DE SILÍCIO GRAU SOLAR NO BRASIL*.

Chapin, D.M., Fuller, C.S. e Pearson, G.L. 1954. A New Silicon p-m Junction Photocell for converting Solar Radiation into Electrical Power. *Journal of Applied Physics*.Vol. 25.

—. 1957. *Solar Energy Converting Apparatus. US 2780765 USA*.

Cheung, N. 2010. *Solar Cells Fabrication Technologies*. Berkeley : U.C. Berkeley.

Cipelli, A. M. V. e Sandrini, W.J. 1982. *Teoria e desenvolvimento de projetos de circuitos eletrônicos*. São Paulo : Livros Érica.

CircuitoAmigo. Semicondutores. *Circuito Amigo*. [Online] [Citado em: 05 de Junho de 2019.] <https://sites.google.com/site/circuitoamigotecnologia/componentes-eletronicos/semi-condutores>

DEE, Department of Environmental Energy. 2018. *Australian Energy Update*.

Dematte, R.D., et al. 2016. Análise de Eficiência de Fontes. *Brazilian Technology Symposium*.

Dias, Diogo Lopes. Família do boro. *Manual da Química*. [Online] [Citado em: 29 de Novembro de 2019.] <https://www.manualdaquimica.com/quimica-geral/familia-boro.htm>.

Dias, Diogo lopes. Família do nitrogênio. *Manual da Química*. [Online] [Citado em: 29 de Novembro de 2019.] <https://www.manualdaquimica.com/quimica-geral/familia-nitrogenio.htm>.

EcolInvent. 2013. Ecoinvent. <https://www.ecoinvent.org/>. [Online] [Citado em: 30 de Novembro de 2019.] <https://www.ecoinvent.org/>.

eCycle. 2017. Tipos de sistemas fotovoltaicos: on-grid e off-grid. [Online] [Citado em: 20 de Novembro de 2019.] <https://www.ecycle.com.br/component/content/article/69-energia/3483-sistema-fotovoltaico-painel-solar-estrutura-suporte-inversor-controlador-carga-cabos-baterias-captacao-armazenamento-kit-geracao-energia-eletrica-eletricidade-vantagens-desvantagens-fonte>.

EERE, Energy Efficiency and Renewable Energy. 2002. The History of Solar. www1.eere.energy.gov. [Online] [Citado em: 28 de Novembro de 2019.] https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf.

Einstein, Albert. 1917. On The Quantum Theory of Radiation. *Physikalische Zeitschrift*. Vol. 18.

EnergySage. 2019. Net metering for home solar panels. *Energy Sage*. [Online] [Citado em: 30 de Novembro de 2019.] <https://www.energysage.com/solar/101/net-metering-for-home-solar-panels/>.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. 2018. *Relatório Síntese*.

Escolhas, Instituto. 2016. *Quanto é gerar energia?* <http://www.escolhas.org/>

Fraas, Lewis. 2014. *Low-Cost Solar Electric Power*. s.l. : Springer international Publisher.

IDEAL, Instituto para o desenvolvimento de energias alternativas na américa latina. 2019. *O mercado brasileiro de geração distribuída fotovoltaica*.

IEA, International Energy Agency. 2019. *Key World Energy Statistics 2019*. s.l. : IEA.

— **2014.** *PVPS Report Snapshot of Global PV 1992-2013*. s.l. : IEA.

— **2019.** *World Energy Balances 2019*. s.l. : IEA.

— **2004.** *World Energy Outlook*. s.l. : IEA.

IPCC. 2011. *Intergovernmental Panel on Climate Change Life Cycle Assessment*.

IRENA, International Renewable Energy Agency. 2016. *End-of-life Management: Solar Photovoltaic Panels*.

— **2019.** *Renewable Energy Statistics 2019*. s.l. : IRENA.

Kyoto Protocol. **UN, United Nations. 1998.**

Leiserowitz, Anthony, et al. 2019. Climate Change in the American Mind: December 2018. <https://climatecommunication.yale.edu/>. [Online] [Citado em: 15 de Novembro de 2019.] <https://climatecommunication.yale.edu/publications/climate-change-in-the-american-mind-december-2018/2/>.

LG. Solar Technology. *lg.com*. [Online] [Citado em: 05 de Novembro de 2019.] <https://www.lg.com/us/solar-technology>.

Matasci, Sara. 2018. What is the average solar panel size and weight? *Energy Sage*. [Online] [Citado em: 03 de Novembro de 2019.] <https://news.energysage.com/average-solar-panel-size-weight/>.

Newkirk, Martin. 2014. How Solar Power Works - On-Grid, Off-Grid And Hybrid Systems. *clean energy reviews*. [Online]. [Citado em: 28 de Novembro de 2019.] <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/2014/5/4/how-solar-works>.

NORC. 2018. Is the Public Willing to Pay to Help Fix Climate Change? <http://www.apnorc.org/>. [Online] [Citado em: 15 de Novembro de 2019.]

<http://www.apnorc.org/projects/Pages/Is-the-Public-Willing-to-Pay-to-Help-Fix-Climate-Change-.aspx>.

OECD. OECD Home. <https://www.oecd.org/>. [Online] [Citado em: 20 de Novembro de 2019.] <https://www.oecd.org/>.

Palanna, O.G. 2009. Doping of Silicon for Photovoltaics. *Engineering Chemistry*.

Panasonic. Solar. panasonic.com. [Online] [Citado em: 05 de Novembro de 2019.] <https://na.panasonic.com/us/energy-solutions/solar/>.

Peng, Jinqing, Lu, Lin e Yang, Hongxing. 2012. Review on lifecycle assessment of energy payback and greenhouse gas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

Pn Junction Diffusion and Drift. **Tungsten, Yuri. 2017.**

Prevo, B.G. e Hon, E.W. 2007. Assembly and characterization of colloid-based antireflective coatings on multicrystalline silicon solar cells. *Journal of Materials Chemistry*. Vol. 17.

Rappaport, Paul. 1959. The Photovoltaic Effect and its Utilization. *RCA Review*.

Rebitzer, G, et al. 2004. Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*. Vol. 30, 5.

Richardson, Luke. 2018. The History of Solar Energy. *Energy Sage*. [Online] [Citado em: 15 de Novembro de 2019.] <https://news.energysage.com/the-history-and-invention-of-solar-panel-technology/>.

Sérgio, Adriano, et al. 2015. *Difusão Atômica*. Belém : s.n.

Sherwani, A.F., Usmani, J.A. e Varun. 2009. Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

Solargis. 2019. Global Solar Atlas. <https://globalsolaratlas.info/>. [Online]. [Citado em: 03 de Novembro de 2019.] <https://globalsolaratlas.info/>.

Stoppato, A. 2006. Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation. *Science Direct*.

Svarc, Jason. 2019. Energy Storage – Battery Types For Offgrid And Hybrid Solar. *clean energy reviews*. [Online] [Citado em: 30 de Novembro de 2019.] <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/2014/9/7/clean-energy-storage-types-batteries>.

—. **2018.** Solar Panel Construction. *clean energy reviews*. [Online] [Citado em: 4 de Novembro de 2019.] <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction>.

Tesla. Powerwall. *Tesla.com*. [Online] [Citado em: 30 de Novembro de 2019.] https://www.tesla.com/en_AU/powerwall?redirect=no.

Thoubboron, Kerry. 2018. 60 vs. 72-cell solar panels: which size is right for you? *Energy Sage*. [Online] [Citado em: 05 de Novembro de 2019.] <https://news.energysage.com/60-vs-72-cell-solar-panels-which-is-right/>.

Wikipedia. 2019. Junção PN. *Wikipedia*. [Online] [Citado em: 30 de Julho de 2019.] https://pt.wikipedia.org/wiki/Jun%C3%A7%C3%A3o_PN.

—. **2019.** Life-cycle assessment. *Wikipedia*. [Online] 2019. [Citado em: 10 de Julho de 2019.] https://en.wikipedia.org/wiki/Life-cycle_assessment.

—. **2019.** Quadro de distribuição. *Wikipedia*. [Online]. [Citado em: 30 de Novembro de 2019.] https://pt.wikipedia.org/wiki/Quadro_de_distribui%C3%A7%C3%A3o.

Wilson, A.H. 1931. *Proc. Roy. Soc.*