

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**GÜNTHER HAAS**

**ESTUDO DE CASO:  
AVALIAÇÃO DO CUSTO-BENEFÍCIO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO  
INSTALADO EM UMA RESIDÊNCIA**

Porto Alegre

2020

**GÜNTHER HAAS**

**ESTUDO DE CASO:  
AVALIAÇÃO DO CUSTO-BENEFÍCIO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO  
INSTALADO EM UMA RESIDÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Miguel Aloysio Sattler

Porto Alegre

2020

**ESTUDO DE CASO:  
AVALIAÇÃO DO CUSTO-BENEFÍCIO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO  
INSTALADO EM UMA RESIDÊNCIA**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovado pela banca examinadora e, em sua forma final, pelo Professor Orientador da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre, 09 de novembro de 2020

Professor Miguel Aloysio Sattler (UFRGS)  
PhD. Pela University of Sheffield, Inglaterra  
Orientador

**BANCA EXAMINADORA**

**Professor Miguel Aloysio Sattler (UFRGS)**  
PhD. Pela University of Sheffield, Inglaterra

**Professora Ana Carolina Badalotti Passuelo (UFRGS)**  
Dr<sup>a</sup>. Pela Universitat Rovira i Virgili, Espanha

**Professora Eugenia Aumond Kuhn (UNIRITTER)**  
Dr<sup>a</sup>. Pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Professor José Alberto Azambuja (UFRGS)**  
Dr. Pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a minha família e amigos pelo apoio durante minha jornada acadêmica.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao professor Miguel Aloysio Sattler, pela orientação, paciência e grande interesse durante o desenvolvimento do trabalho.

Agradeço aos meus pais, Paulo e Neusa, que sempre me apoiaram.

Agradeço às minhas irmãs, Priscila e Bárbara, pelo carinho e disposição para me ajudar sempre que preciso.

Agradeço aos meus primos Gerhardt e João Pedro, e meu primo emprestado César, que são como irmãos para mim, pelo companheirismo e amizade durante todos esses anos.

Agradeço aos meus colegas pelos laços formados durante a graduação que me fizeram crescer, e pelas amizades que vou levar para a vida toda.

## RESUMO

Na busca de um futuro mais sustentável, cada vez mais são estudadas formas diferentes de gerar energia elétrica, que tenham menores impactos ambiental e financeiro. Em razão de o Brasil ser um país favorecido em termos dos elevados índices de incidência solar, o uso de células fotovoltaicas tem sido mais difundido entre as pessoas, devido ao evidente e rápido retorno do investimento. Porém, o que não é considerado, comumente, é o impacto real desse sistema gerador de energia diferenciado. Um impacto, não somente financeiro, mas também relacionado à geração de dióxido de carbono e outros poluentes. Diante desse cenário, neste trabalho, é realizado um estudo de caso, a fim de verificar os resultados de desempenho e retornos do sistema fotovoltaico instalado em uma residência. Primeiramente, é apresentado o que a literatura aponta, a respeito: do contexto energético brasileiro; da radiação solar; da fonte de energia utilizada, que é a energia fotovoltaica; da forma como ela é obtida; bem como do ciclo de vida do sistema fotovoltaico. A análise do ciclo de vida permitiu identificar os impactos ambientais atrelados ao uso de sistemas fotovoltaicos. Impactos ligados a emissão de gases do efeito estufa e a quantidade de energia, proveniente de fontes não renováveis, utilizada, durante o ciclo de vida do sistema fotovoltaico. Após isso, as informações encontradas na literatura serviram como base para analisar o sistema em foco, obtendo-se, então, o desempenho desse sistema, quanto a geração de energia, e os seus retornos: energético e financeiro. Permitindo, assim, avaliar se o investimento, em sistemas fotovoltaicos, tem, de fato, retornos ambiental e financeiramente favoráveis.

**Palavras-chave:** Fotovoltaico. Sustentabilidade. Investimento. Geração de energia. Pegada de carbono. Painel Solar.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Investimento global em energia limpa, por setor, por trimestre.....	15
Figura 2 – Matriz elétrica brasileira em 2018.....	20
Figura 3 – Investimento, dos países da América Latina, em energia renovável (em bilhões de US\$).....	21
Figura 4 – Evolução das emissões totais antrópicas, associadas à matriz energética brasileira (em MtCO <sub>2</sub> eq).....	22
Figura 5 – Emissão de kg de CO <sub>2</sub> eq, por MWh gerado, em 2016.....	22
Figura 6 – Comparação: consumo mundial anual de energia x reservas disponíveis de combustíveis não renováveis x energia solar passível de ser aproveitada.....	24
Figura 7 – Trajetória da Terra, em torno do Sol.....	25
Figura 8 – Distribuição média mundial de radiação solar incidente sobre a superfície terrestre (em kWh/m <sup>2</sup> ).....	26
Figura 9 – Distribuição média de irradiação solar, no Brasil (em kWh/m <sup>2</sup> ).....	27
Figura 10 – Comparação do gap entre condutores, semicondutores e isolantes.....	28
Figura 11 – Compartilhamento de elétrons, entre átomos de boro e de fósforo, com átomos de silício.....	29
Figura 12 – Analogia entre um diodo e uma válvula.....	29
Figura 13 – Junção P-N.....	30
Figura 14 – Efeito fotoelétrico, em uma célula de silício.....	31
Figura 15 – Sistema ligado à rede.....	33
Figura 16 – Módulo fotovoltaico.....	34
Figura 17 – Diodos no sistema fotovoltaico.....	37
Figura 18 – Células de silício policristalino.....	40
Figura 19 – Células monocristalinas.....	40
Figura 20 – Comparação de espessuras, entre uma célula de filme fino (esquerda) e uma célula de cristal de silício (direita) (em μm).....	41
Figura 21 – Sombreamento.....	43
Figura 22 – Comparação entre painéis, com e sem acúmulo de poeira.....	44
Figura 23 – Eficiência laboratorial de diferentes modelos de células e painéis fotovoltaicos.....	45

Figura 24 – Ciclo de vida do sistema fotovoltaico .....	47
Figura 25 – Método da tração de Czochralski .....	49
Figura 26 – Edificação estudada .....	56
Figura 27 – Módulos fotovoltaicos instalados.....	57
Figura 28 – Ângulo Azimutal .....	58
Figura 29 – Inversor instalado .....	58
Figura 30 – Interface do programa Radasol 2 .....	60
Figura 31 – Distribuição mensal de irradiação .....	61
Figura 32 – Produção de energia anual estimada.....	62
Figura 33 – Produção de energia acumulada estimada .....	62
Figura 34 – Tempo de retorno da energia .....	66
Figura 35 – Tempo de retorno do CO <sub>2</sub> eq .....	67
Figura 36 – <i>Payback</i> descontado .....	71



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Expectativa de vida útil para o sistema fotovoltaico e componentes .....	54
Quadro 2 – Energia elétrica consumida por etapa do ciclo de vida do sistema fotovoltaico composto por dez módulos .....	63
Quadro 3 – Energia total para produção e instalação do sistema fotovoltaico, considerando painéis produzidos na China.....	64
Quadro 4 – Cenário de transporte considerado .....	65
Quadro 5 – Economia anual estimada, com o emprego de sistema fotovoltaico .....	69
Quadro 6 – Valor presente líquido.....	70

## LISTA DE SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica  
BOS – *Balance of System*  
CA – Corrente Alternada  
CC – Corrente Contínua  
DHI – *Direct Horizontal Irradiance*  
DNI – *Direct Normal Irradiance*  
DSSC – *Dye Sensitized Solar Cel*  
EBPT – *Energy Payback Time I*  
EVA – *Ethylene Vinyl Acetate*  
GEE – Gases do Efeito Estufa  
GEF – *Grid Emission Factor*  
GHI – *Global Horizontal Irradiance*  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
IEA – International Energy Agency  
LCA – *Life Cycle Assessment*  
MPPT – *Maximum Power Point Tracking*  
NBR – Norma Brasileira  
REN – Resolução Normativa  
STC – Standard Test Conditions  
TE – Tarifa de Energia  
TMA – Taxa Mínima de Atratividade  
TNT – Trinitrotolueno  
TUSD – Tarifa de Utilização de Serviços de Distribuição  
UV – Ultravioleta  
VPL – Valor Presente Líquido

## LISTA DE SÍMBOLOS

*AM* – Air Mass

*A* – Ampere

*a. a* – Ao ano

*cm* – Centímetro

*Cl* – Cloro

*CO<sub>2</sub>* – Dióxido de carbono

*CO<sub>2</sub>eq* – Dióxido de carbono equivalente

*SiO<sub>2</sub>* – Dióxido de silício

*Cu(Ga)Se<sub>2</sub>* – Di-seleneto de cobre-índio-gálio

US\$ - Dólar americano

*eV* – Elétron-volt

°C – Graus Celsius

*Hz* – Hertz

*H* – Hidrogênio

*MtCO<sub>2</sub>eq* – Megatonelada de dióxido de carbono equivalente

*MW* – Megawatt

*MWh* – Megawatt-hora

*CH<sub>4</sub>* – Metano

*m* – Metros

*m/s* – Metro por segundo

*m<sup>2</sup>* – Metro quadrado

*mm* – Milímetro

*CO* – Monóxido de carbono

*μm* – Nanômetro

*kg* – Quilograma

*kg CO<sub>2</sub>/MWh* – Quilograma de dióxido de carbono, por megawatt-hora

*km* – Quilometro

*kW* – Quilowatt

*kWh* – Quilowatt-hora

*kWh/a* – Quilowatt-hora por ano

R\$ – Real

*Si* – Silício

*CdTe* – Telureto de cádmio

*SiHCl<sub>3</sub>* – Triclorosilano

*V* – Volt

*W/m<sup>2</sup>* – Watt por metro quadrado

*C<sub>6</sub>H<sub>2</sub>CH<sub>3</sub>(NO<sub>2</sub>)<sub>3</sub>* – 2-metil-1,3,5-trinitrobenzeno

## SUMÁRIO

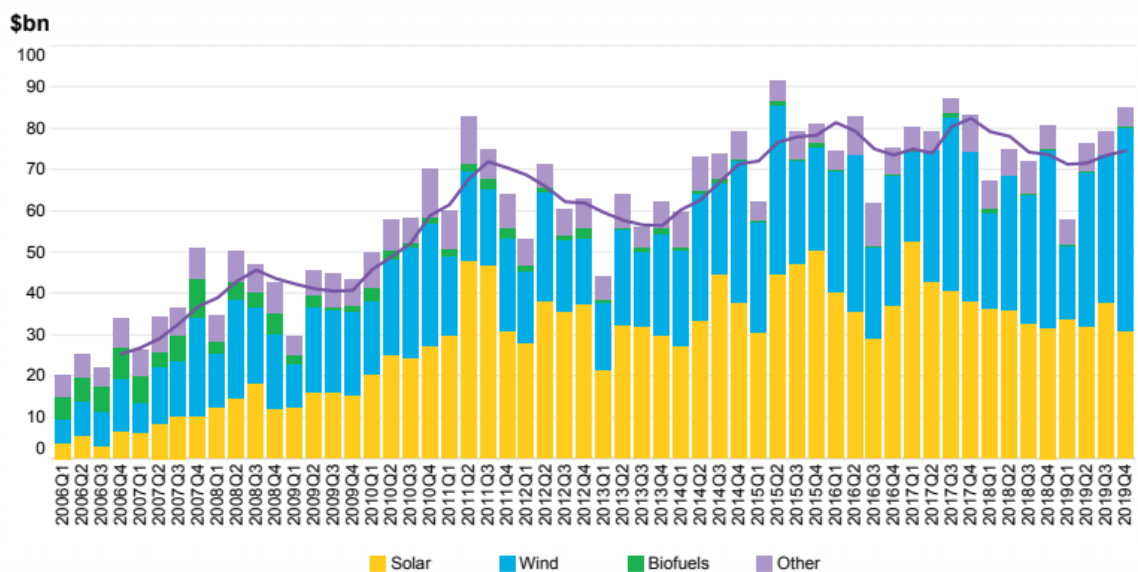
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS.....	17
1.2	METODOLOGIA .....	17
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>19</b>
2.1	CONTEXTO ENERGÉTICO BRASILEIRO.....	19
2.1.1	<b>Geração de energia elétrica no brasil</b> .....	<b>19</b>
2.1.2	<b>Emissão de dióxido de carbono, associada à matriz energética brasileira</b> .....	<b>21</b>
2.1.3	<b>Legislação concernente a sistemas fotovoltaicos</b> .....	<b>23</b>
2.2	RADIAÇÃO SOLAR.....	24
2.3	ENERGIA FOTOVOLTAICA .....	28
2.3.1	<b>Sistemas fotovoltaicos</b> .....	<b>31</b>
2.3.2	<b>Componentes de sistemas fotovoltaicos</b> .....	<b>33</b>
2.3.3	<b>Tecnologias fotovoltaicas</b> .....	<b>39</b>
2.3.4	<b>Eficiência de sistemas fotovoltaicos</b> .....	<b>42</b>
2.3.5	<b>Manutenção de sistemas fotovoltaicos</b> .....	<b>45</b>
<b>3</b>	<b>PENSAMENTO DO CICLO DE VIDA</b> .....	<b>47</b>
3.1	CICLO DE VIDA DO SISTEMA FOTOVOLTAICO .....	47
3.2	ÍNDICES AVALIATIVOS.....	50
3.2.1	<b>Tempo de retorno da energia</b> .....	<b>50</b>
3.2.2	<b>Tempo de retorno do dióxido de carbono equivalente</b> .....	<b>51</b>
3.2.3	<b>Retorno financeiro</b> .....	<b>52</b>
3.3	DIRETRIZES PARA PENSAMENTO DO CICLO DE VIDA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	53
3.3.1	<b>Expectativa de vida útil</b> .....	<b>54</b>
3.3.2	<b>Dados de irradiação</b> .....	<b>54</b>
3.3.3	<b>Desempenho</b> .....	<b>55</b>
3.3.4	<b>Degradação</b> .....	<b>55</b>
<b>4</b>	<b>ESTUDO DE CASO: RESIDÊNCIA FAMILIAR</b> .....	<b>56</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	56

4.2	GERAÇÃO DE ENERGIA: PROCEDIMENTOS PARA ESTIMATIVAS E RESULTADOS.....	59
4.3	IMPACTOS DO CICLO DE VIDA: PROCEDIMENTOS PARA ESTIMATIVAS E RESULTADOS.....	63
4.4	TEMPO DE RETORNO DA ENERGIA: PROCEDIMENTOS PARA ESTIMATIVAS E RESULTADOS.....	65
4.5	TEMPO DE RETORNO DO DIÓXIDO DE CARBONO EQUIVALENTE: PROCEDIMENTOS PARA ESTIMATIVAS E RESULTADOS.....	66
4.6	RETORNO FINANCEIRO: PROCEDIMENTOS PARA ESTIMATIVAS E RESULTADOS.....	68
4.6.1	<b>Valor presente líquido</b> .....	<b>69</b>
4.6.2	<b>Payback descontado</b> .....	<b>70</b>
5	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>72</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>73</b>
	<b>ANEXO A – ORÇAMENTO DO INVERSOR</b> .....	<b>77</b>
	<b>ANEXO B – FICHA TÉCNICA DO PAINEL FOTOVOLTAICO</b> .....	<b>79</b>
	<b>ANEXO C – FICHA TÉCNICA DO INVERSOR</b> .....	<b>82</b>

## 1 INTRODUÇÃO

De forma cada vez mais frequente e acentuada, são estudadas opções de geração de energia que, em um primeiro momento, complementem as principais fontes sendo usadas atualmente, para que, em um futuro próximo, possam substituí-las. A intenção é livrar-nos da dependência de fontes de energia fadadas a se esgotarem e criar uma era de geração energética mais sustentável. Só no ano de 2018, foram *investidos*, no mundo todo, US\$ 282,2 bilhões, no setor de produção de energia renovável (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019). Entre as protagonistas, está a geração de energia elétrica, por meio do aproveitamento da energia solar, como mostra a figura 1.

Figura 1 – Investimento global em energia limpa, por setor, por trimestre



Fonte: Bloomberg New Energy Finance (2020)

Sistemas de produção de energia solar (fotovoltaico e termal) promovem grandes benefícios, quando comparados a fontes convencionais de geração de energia, como a queima de combustíveis fósseis em termelétricas. No entanto, isso não significa que apresentem vantagens, sob todos os aspectos. Como aponta Carvalho et al. (2016), além das emissões diretas durante a operação, é preciso analisar todo o ciclo de vida das tecnologias de energia renovável, para que se tenha uma avaliação mais correta. Sob este aspecto, a energia solar apresenta impactos ambientais significativos, quando levadas em conta as fases de extração da matéria-prima, construção, transporte, instalação e descarte.

Durante sua produção, painéis fotovoltaicos determinam uma pegada de carbono e geram uma série de materiais residuais, que são danosos ao ambiente. Primeiramente, aponta-se a extração do quartzo, forma cristalina do silício, e das outras matérias-primas usadas na construção dos painéis, como causadoras de impacto ambiental. Em seguida, destaca-se o uso de fornalhas, a altas temperaturas, para a produção do silício metálico, que produzem grandes quantidades de dióxido de carbono e sulfetos. O processo químico usado para obtenção de silício policristalino gera, na forma de subproduto, o tetracloreto de silício, um material danoso ao ambiente, em proporções que chegam a ser, de três ou quatro partes de tetracloreto de silício, para uma parte de silício policristalino.

Continuamente, estão sendo desenvolvidas novas tecnologias, que ajudam a reduzir os impactos ambientais da indústria fotovoltaica, associados à sua produção. Entretanto, a grande maioria dos painéis é produzida com o uso de tecnologias antiquadas e muito dependentes de combustíveis fósseis, como é o caso da China (CHINA ENERGY PORTAL, 2020). Destaca-se que nesse país estão localizadas seis, entre as dez empresas que mais fabricaram módulos fotovoltaicos no mundo, em 2018, como aponta a PV-Tech (2019).

Estudos realizados por Phillips e Warmuth (2020), do Instituto Fraunhofer para Sistemas de Energia Solar (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, do alemão) estimam que são necessários, de nove meses, a dois anos e meio de operação, para que um painel solar produza energia de forma limpa, que compense o  $CO_2eq$  emitido na sua fabricação.

O tempo de operação necessário para a produção de energia limpa, que compense as emissões de dióxido de carbono equivalente, é afetado por diversas variáveis, sendo, as principais, o local de manufatura dos componentes do sistema e o material empregado. A China, por exemplo, cuja geração de energia elétrica é muito centrada no uso de combustíveis fósseis, tem uma pegada de carbono, no ciclo de vida de placas fotovoltaicas, maior do que a de outros países produtores, como os Estados Unidos (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2019). Essa diferença pode chegar ao dobro do  $CO_2eq$  liberado, durante as etapas de manufatura dos componentes do sistema.

Cada vez mais, tem-se buscado desenvolver tecnologias que corrijam os problemas ambientais que a humanidade vem causando com suas invenções. E,



nessa busca, por vezes, uma nova “solução milagrosa” é criada; algo que, à primeira vista, contribui para a questão ambiental, porém acaba causando ainda mais danos do que a tecnologia anteriormente empregada. Somente após estudo completo, incluindo todos os custos e impactos (desde financeiros, até ambientais) e todos os aspectos que se relacionam com essa solução, pode-se ter certeza da sua real efetividade e, assim, evitar a difusão de uso de algo que esteja, na verdade, contribuindo para o agravamento da situação do cenário geral do meio ambiente no planeta.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é verificar, de forma aprofundada, os reais gastos, bem como o retorno financeiro e ambiental, associados à aquisição e instalação de painéis fotovoltaicos, em uma residência familiar, na cidade de Feliz, no Rio Grande do Sul. O estudo ambiental está delimitado ao fluxo energético e a emissão direta de dióxido de carbono equivalente. Em resumo, buscou-se saber em que medida essa opção de geração de energia é, de fato, sustentável, uma vez que seu uso está se tornando progressivamente mais popular, sendo imperativo averiguar se um mal não está sendo apenas substituído por outro.

## 1.2 METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido a partir do pensamento do ciclo de vida (*life cycle thinking* – LCT) aplicado à sistemas fotovoltaicos, utilizando estimativas da literatura a respeito da avaliação do ciclo de vida (*life cycle assessment* – LCA), assim, não constituindo uma avaliação do ciclo de vida completa. Com o auxílio de uma pesquisa bibliográfica, foi possível detalhar cada etapa desse ciclo, compreendendo: materiais e processos utilizados; a funcionalidade das tecnologias relacionadas ao sistema fotovoltaico; o efeito fotovoltaico; o princípio de funcionamento do sistema; os diferentes tipos de sistemas; os componentes que os integram; tecnologias aplicadas; e possíveis problemas que afetem seu funcionamento.

Seguiu-se, então, para o estudo de caso. Com base nas informações obtidas na literatura, primeiramente, foi calculada a quantidade de energia elétrica que o sistema

proporcionará durante sua vida útil. Em seguida, foram obtidos os gastos financeiros e energéticos, e a quantidade de gases poluentes que se estima seja liberada no ciclo de vida do sistema. A próxima etapa, consistiu em calcular quanto tempo seria requerido para que a eletricidade gerada pelo sistema estudado, seja igual, em quantidade, à energia gasta nas outras fases do seu ciclo de vida. Um cálculo semelhante foi feito, considerando os gases poluentes liberados. Buscou-se saber quanto tempo o sistema fotovoltaico levaria para produzir eletricidade, de forma limpa, que compense os gases poluentes liberados diretamente durante o ciclo de vida. Por último, foram comparados: os custos de aquisição e de instalação dos painéis, com a economia provinda da eletricidade gerada, de modo a avaliar o tempo de retorno do investimento.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 CONTEXTO ENERGÉTICO BRASILEIRO

O setor energético tem passado por significativas transformações nos últimos anos, fazendo com que o debate sobre o tema assuma uma crescente importância na agenda global. Isso se deve ao aumento da demanda energética, resultado do crescimento das economias emergentes, à dependência de combustíveis fósseis, aos desafios resultantes das mudanças climáticas e de outros impactos ambientais.

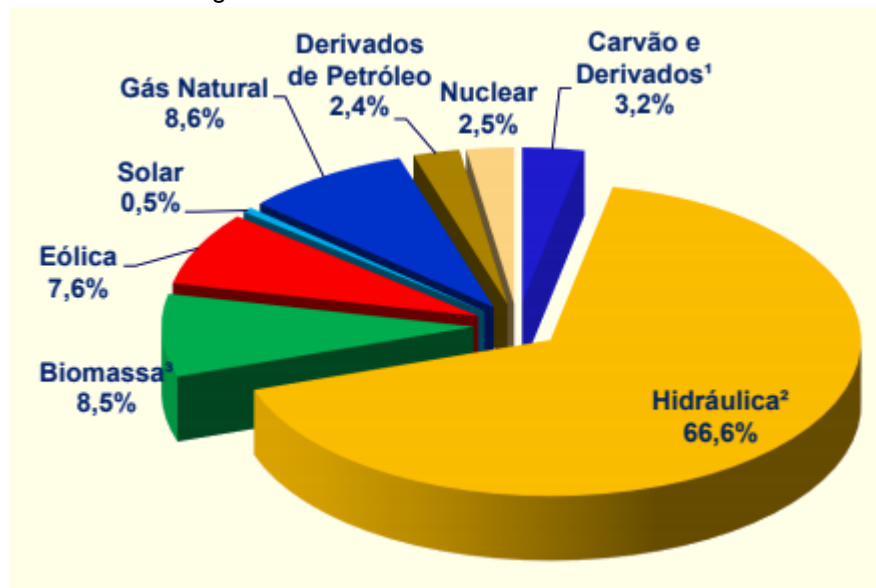
Em 2018, o consumo de energia elétrica representava cerca de 90% da produção nacional. Isso se deve, principalmente, ao baixo consumo de energia *per capita*, relacionado ao atual nível de desenvolvimento do país. No Brasil, o consumo *per capita* chega a valores de 3.040 kWh/hab/ano (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2019). Isso significa que há uma expectativa de que esse consumo de energia aumente, consideravelmente, com um crescimento econômico e populacional do país

A seguir, discorre-se sobre pontos considerados relevantes para esta pesquisa, no que se refere ao contexto energético brasileiro, quais sejam: a geração de energia no país; a emissão de dióxido de carbono associado à matriz energética brasileira; e, por fim, a legislação concernente a sistemas fotovoltaicos.

#### 2.1.1 Geração de energia elétrica no Brasil

As fontes renováveis de energia estavam associadas a cerca de 23,7% de toda a eletricidade produzida no mundo, em 2015. O Brasil é um dos poucos países onde as fontes renováveis têm maior representatividade, em comparação às não renováveis, com a hidroeletricidade ocupando o primeiro lugar, como indicado na figura 2.

Figura 2 – Matriz elétrica brasileira em 2018

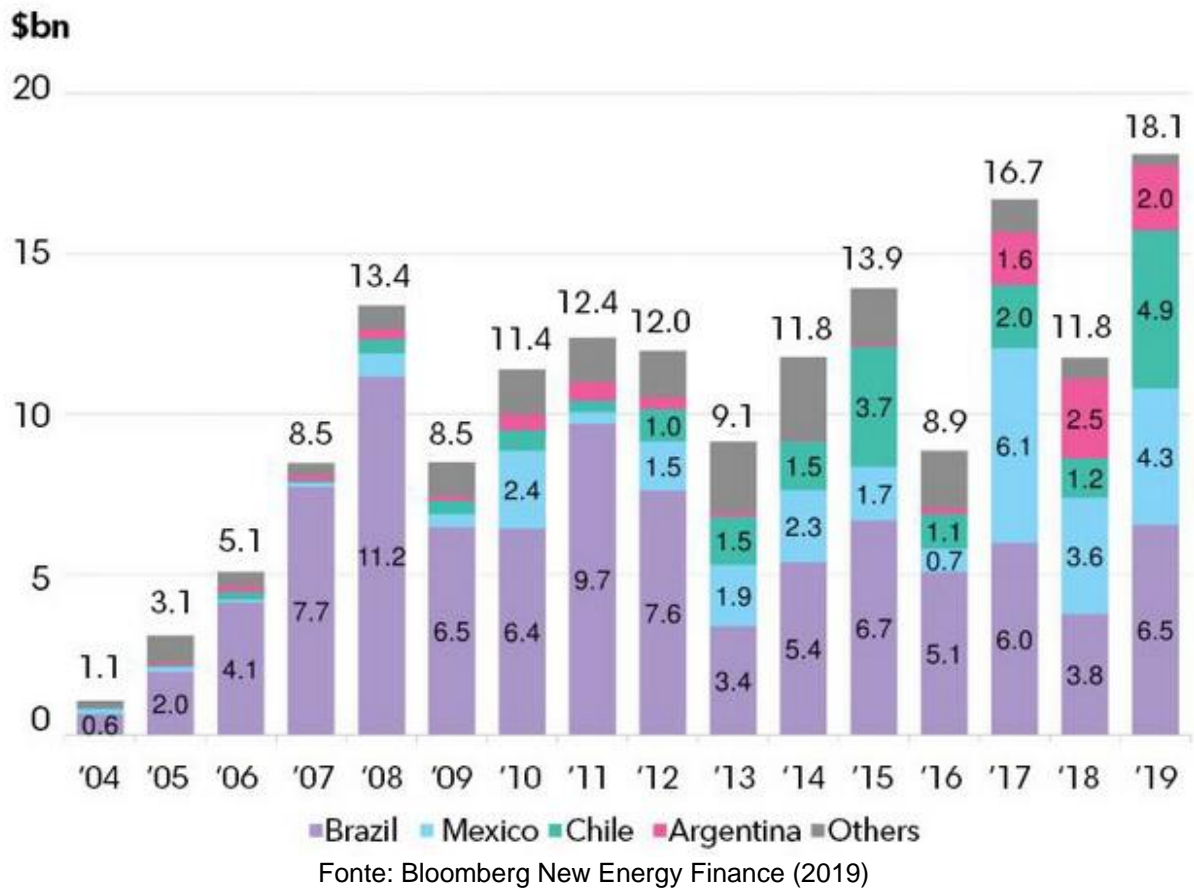


Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2019)

Todavia, concentrar a produção energética em um único modal deixa o país muito dependente deste. Na eventualidade de secas, como ocorreu em anos recentes, a capacidade de geração de eletricidade dessas hidrelétricas diminuiu muito, fazendo com que o país tivesse que recorrer a outras fontes, para compensar eventuais reduções em oferta. Em geral, a solução que tem sido praticada é a instalação de novas termelétricas, pela facilidade de implementação dessa opção. Por conta disso, entre os anos de 2009 e 2013, as emissões de dióxido de carbono aumentaram consideravelmente (MACROTRENDS, 2020).

Para se tornar o mais independente possível de fontes de energia poluentes e da energia proveniente, em sua maior parte, de apenas uma fonte (hidroelétrica), o Brasil, seguindo a tendência mundial, passou a investir mais significativamente em energia renovável, nos últimos tempos. Em 2008, o país atingiu um pico de investimentos em fontes de energia renovável, que chegou à soma de US\$ 11,2 bilhões, como se ilustra na figura 3. No segmento de energia fotovoltaica, os investimentos, desde que começaram, vêm crescendo: em 2012, foram US\$ 20 milhões; e, tornando-se o principal investimento do setor energético, em 2017, atingiram o recorde de US\$ 1,28 bilhão.

Figura 3 – Investimento, dos países da América Latina, em energia renovável (em bilhões de US\$)

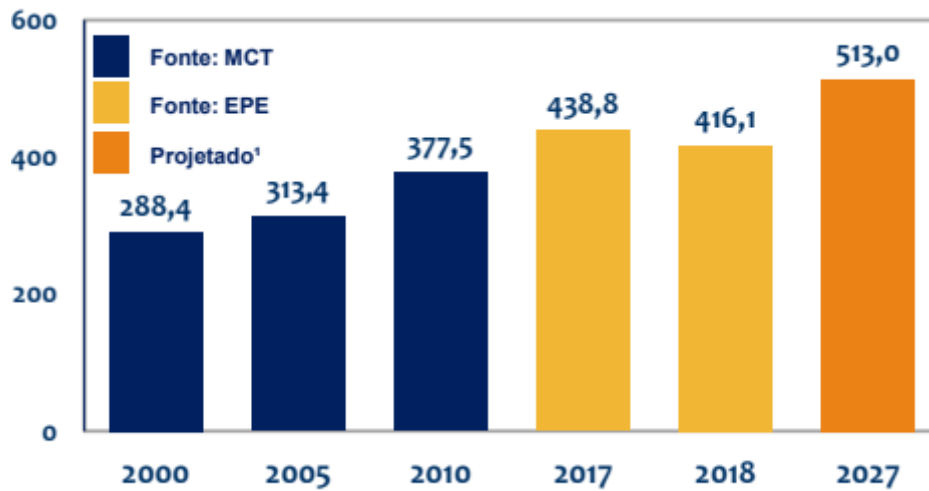


### 2.1.2 Emissão de dióxido de carbono, associada à matriz energética brasileira

O  $CO_2eq$  representa, em quantidades de  $CO_2$ , os diversos gases responsáveis pelo efeito estufa. Por exemplo, o metano,  $CH_4$ , causa um impacto 25 vezes maior que o  $CO_2$ . Então, 1 kg de  $CH_4$  liberado na atmosfera determinaria um impacto equivalente a 25 kg de  $CO_2$  (CLIMATE CHANGE CONNECTION, 2020).

Com referência ao ano de 2018, somando-se todas as atividades associadas à sua matriz energética, estima-se que o Brasil tenha emitido 416,1  $MtCO_2eq$ , representando uma diminuição em relação ao ano anterior. Essa estimativa contraria a tendência de aumento de emissões, a cada ano, como mostra a figura 4.

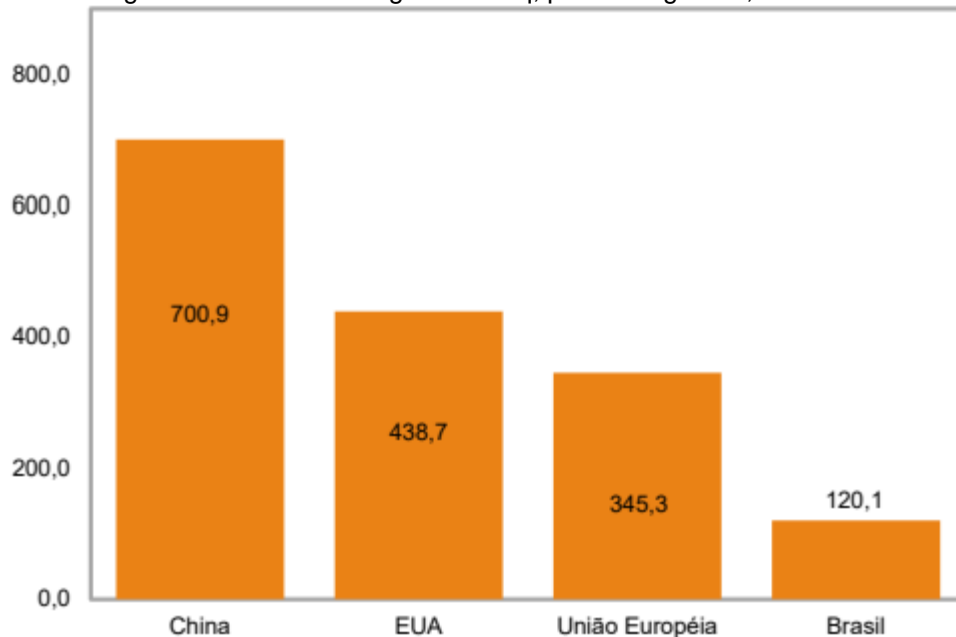
Figura 4 – Evolução das emissões totais antrópicas, associadas à matriz energética brasileira (em MtCO<sub>2</sub>eq)



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2019)

No que se refere apenas à produção de energia elétrica, o Brasil é um dos países que menos emitem CO<sub>2</sub>eq, por MWh, como a figura 5 indica. No ano de 2018, a intensidade de geração de dióxido de carbono equivalente ficou em 88 kgCO<sub>2</sub>eq/MWh (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2019).

Figura 5 – Emissão de kg de CO<sub>2</sub>eq, por MWh gerado, em 2016



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2019)

### **2.1.3 Legislação concernente a sistemas fotovoltaicos**

Em 2008, com a criação do Grupo de Trabalho de Geração Distribuída com Fotovoltaicos (GT-GDSF), pelo Ministério de Minas e Energia, deu-se início à elaboração de uma regulamentação, que incentivasse o uso de tecnologia fotovoltaica, como fonte de geração de energia no país.

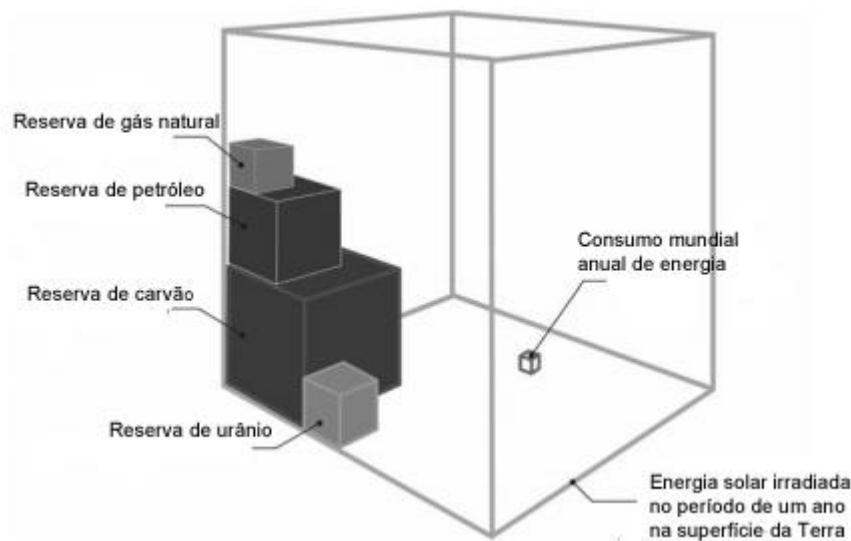
No dia 17 de abril de 2012, foi aprovada a Resolução Normativa n.º 482, da Agência Nacional de Energia Elétrica, que estabelece as condições gerais para o acesso de micro e minigeração distribuída, aos sistemas de distribuição de energia elétrica. A microgeração está associada a projetos com potência instalada de até 100 kW. Já, a minigeração inclui projetos entre 100 kW e 1MW. A legislação referida também cria a possibilidade de compensação entre a energia elétrica ativa, injetada pela unidade de micro ou minigeração, distribuída desde um gerador-consumidor, e a rede distribuidora, à qual está conectada. Ela estabelece que, quando a quantidade de energia elétrica gerada por uma unidade consumidora (residência, indústria, etc.), em determinado mês, for superior à energia elétrica consumida pela unidade, naquele período, esse excedente se transforma em créditos, que podem ser utilizados para diminuir sua conta de luz, em um prazo de até 36 meses (ANEEL, 2012).

A Resolução Normativa n.º 687, da Aneel, atualizou a Resolução Normativa n.º 482/2012, modificando pontos, como a redefinição do limite de microgeração, para até 75 kW, e de minigeração, para até 5 MW, e o aumento do prazo de utilização dos créditos na fatura elétrica, para 60 meses. Também foi criada a possibilidade de autoconsumo remoto, que ocorre quando o consumidor gera energia elétrica, em uma unidade, e compensa, em outro local/unidade, desde que as unidades pertençam ao mesmo titular e que estejam conectadas à mesma área de concessão da distribuidora. Assim, com a criação da possibilidade de geração compartilhada, permite-se a criação de consórcio ou cooperativa, entre diversos consumidores, para se beneficiarem conjuntamente da geração distribuída (ANEEL, 2015).

## 2.2 RADIAÇÃO SOLAR

O Sol emite sua energia na forma de radiação, que é essencial para a existência da vida na Terra. É por meio da fusão de átomos de hidrogênio, que o núcleo solar produz essa energia; ou seja, o Sol nada mais é, que um grande reator de fusão nuclear. Por estar a uma distância tão grande da Terra, em média 149 milhões de quilômetros, apenas uma pequena parcela dessa energia chega ao nosso planeta (cerca de 2 milionésimos do total). Mesmo considerando essa grande perda, segundo Krauter (2006), a quantidade total de energia que atinge a Terra, anualmente, equivale a 14 mil vezes o consumo mundial de eletricidade, em um ano. Portanto, apenas 0,01% dessa energia precisaria ser disponibilizada, para suprir a todas as necessidades da humanidade, no que diz respeito a gastos com eletricidade, como esquematizado na figura 6.

Figura 6 – Comparação: consumo mundial anual de energia x reservas disponíveis de combustíveis não renováveis x energia solar passível de ser aproveitada

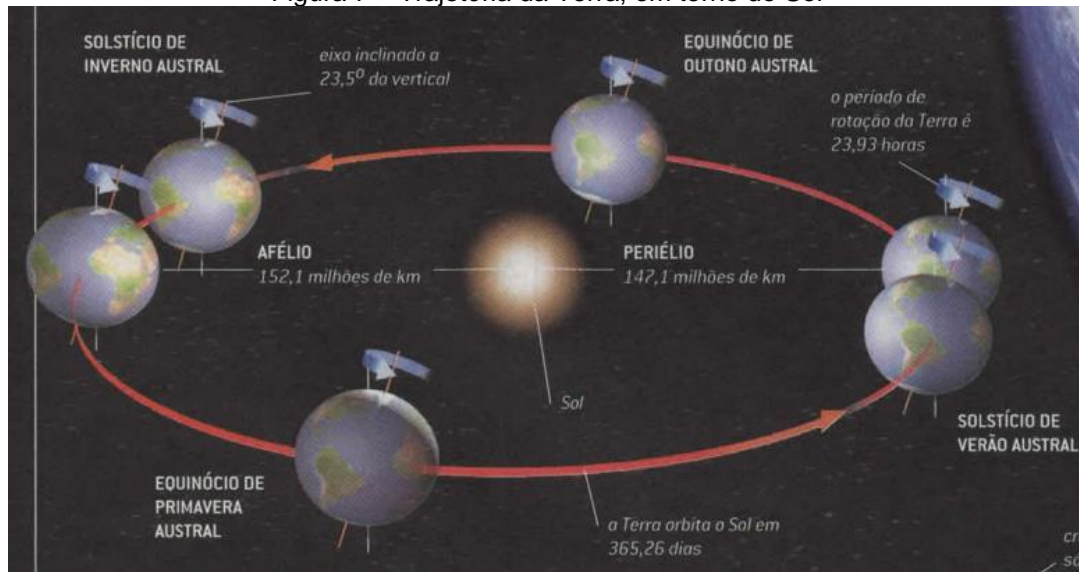


Fonte: adaptado de Krauter (2006, p. 22)

A intensidade da radiação solar, fora da atmosfera terrestre, varia ao longo do ano, à medida que a Terra percorre seu trajeto em torno do Sol, conforme indicado na figura 7. A distância entre os dois corpos varia, desde um mínimo de 147 milhões de quilômetros, no periélio, a um máximo de 152 milhões, no afélio.



Figura 7 – Trajetória da Terra, em torno do Sol



Fonte: Rees (2012, p. 144)

Além disso, a inclinação de  $23^{\circ}27''$ , do eixo de rotação terrestre, em relação ao plano da eclíptica, faz com que os raios solares incidam sobre a superfície da Terra durante seu movimento, com diferentes inclinações, e também determina que o ângulo de incidência desses raios solares varie, a cada dia, em ambos os hemisférios. Associado a essa inclinação, com que os raios solares incidem sobre a superfície terrestre, é definido o coeficiente de massa de ar (*air mass* – AM). Quanto menor o ângulo de incidência, maior é o coeficiente, sendo maior a porção de atmosfera que o raio solar precisa atravessar, antes de incidir sobre o solo. Assim, quanto maior a AM, mais os raios solares perdem intensidade, seja por absorção, seja por espalhamento deles na atmosfera. Esse coeficiente é usado para a caracterização da performance de células fotovoltaicas, em que a AM 1,5 é caracterizada como um valor universalmente aceito (ALI *et al.*, 2019).

Segundo Ali *et al.* (2019), os raios solares podem incidir sobre a superfície terrestre de três formas. A primeira, como um componente de irradiação direta (*direct normal irradiance* – DNI). A segunda, como componente difuso, que sofre reflexão e espalhamento, causados pela atmosfera (*diffuse horizontal irradiance* – DHI). E a terceira, é a irradiação proveniente da reflexão por outras superfícies. A soma dessas três parcelas, permite-nos obter a irradiação horizontal global (*global horizontal irradiance* – GHI).

Como resultado de combinações desses três componentes, a irradiação incidente sobre o limite exterior da atmosfera terrestre pode variar entre  $1.325 \text{ W/m}^2$  e  $1.412 \text{ W/m}^2$ , com a média sendo denominada “constante solar” e tendo valor igual a  $1.367 \text{ W/m}^2$ . Porém, a atmosfera reduz o nível de incidência de radiação solar, que atinge a superfície do planeta, por meio de reflexão e absorção (causadas pela camada de ozônio), vapor d’água, dióxido de carbono, e dispersão (causada por moléculas de ar, partículas de poeira e poluição em geral). Esse valor, portanto, depende de diversos fatores, incluindo clima e vegetação locais, e a localização no globo terrestre, como ilustrado nas figuras 8 e 9, onde se pode notar maior intensidade de irradiação próximo à linha do Equador. Para o cálculo da potência gerada por células fotovoltaicas, o valor considerado da irradiação incidente média, sobre a superfície da Terra é de  $1.000 \text{ W/m}^2$  (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 8 – Distribuição média mundial de radiação solar incidente sobre a superfície terrestre (em  $\text{kWh/m}^2$ )

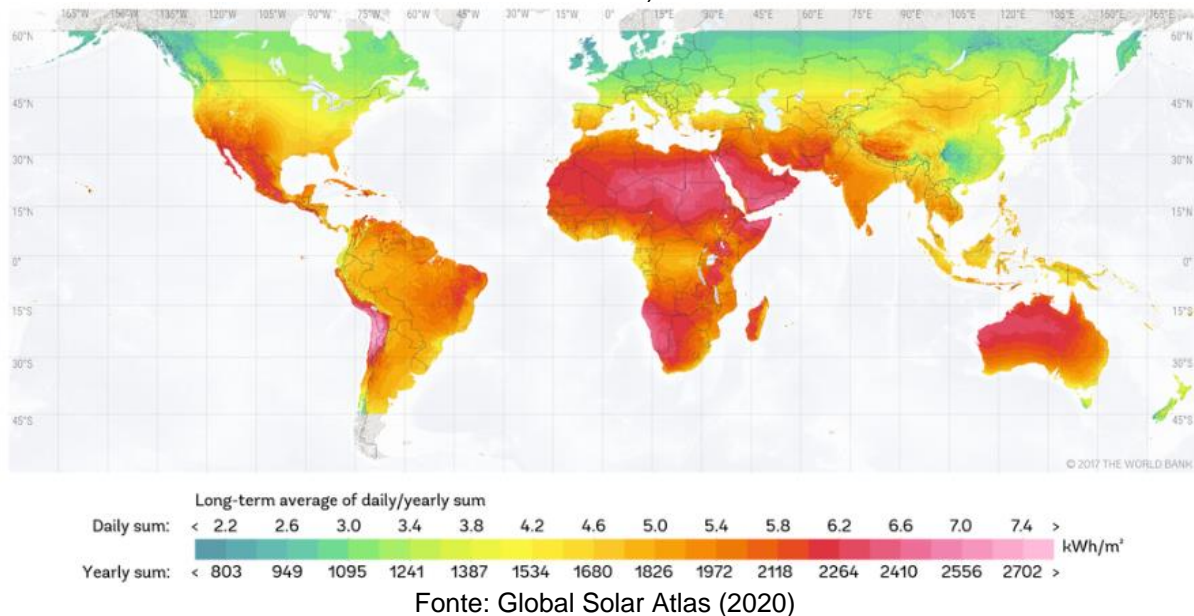
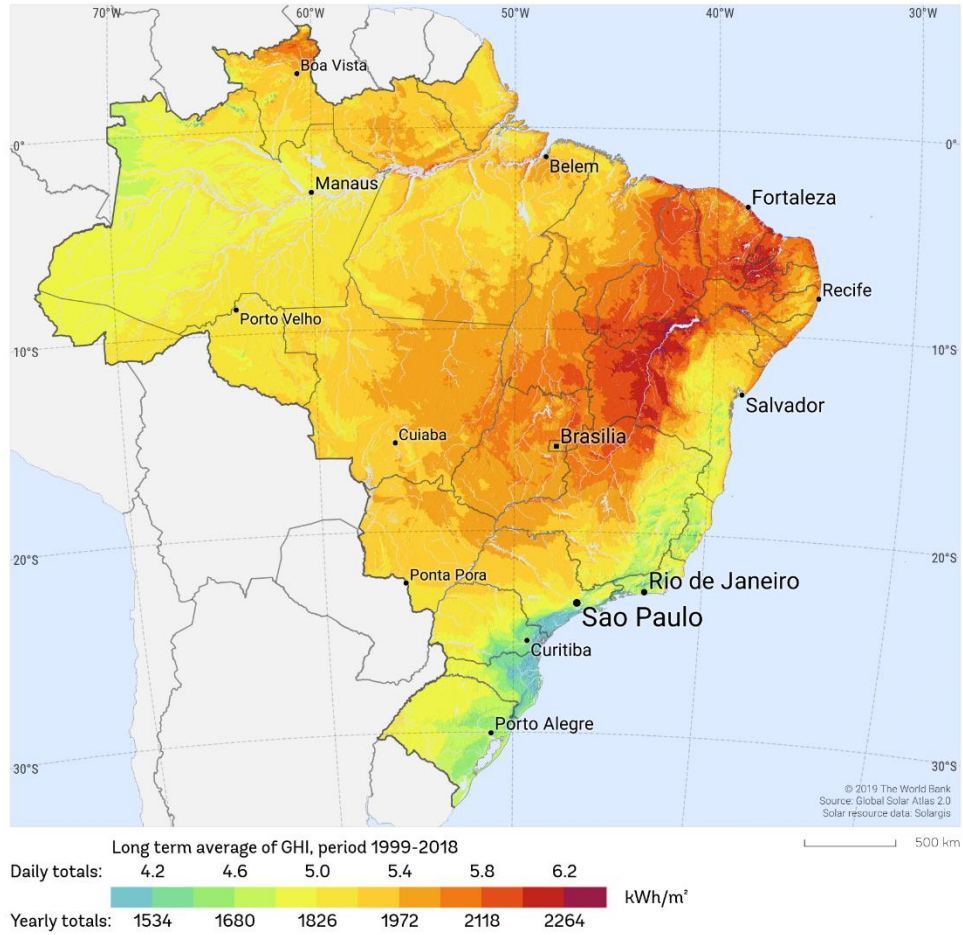


Figura 9 – Distribuição média de irradiação solar, no Brasil (em kWh/m<sup>2</sup>)



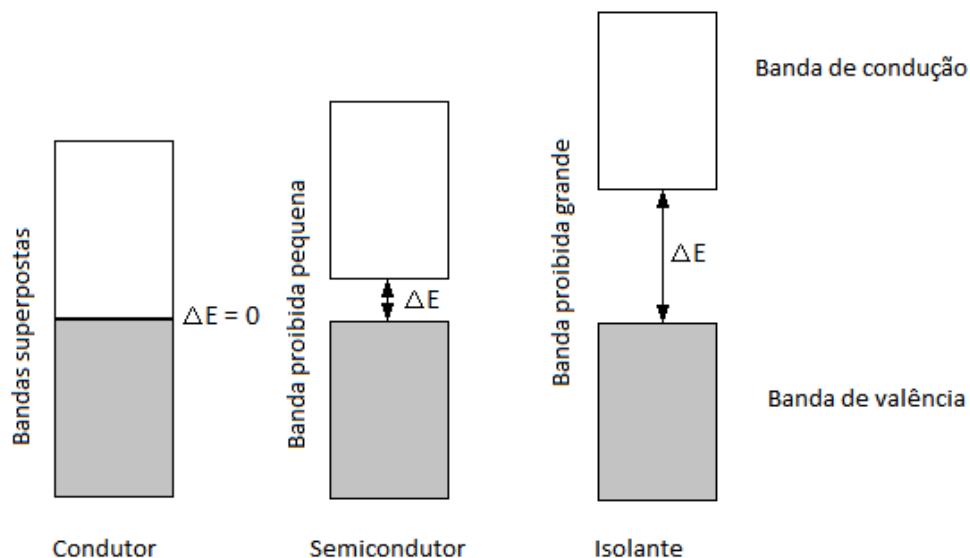
Fonte: Global Solar Atlas (2020)

## 2.3 ENERGIA FOTOVOLTAICA

A energia solar pode ser convertida em energia elétrica, por meio de um efeito conhecido como efeito fotoelétrico, ou efeito fotovoltaico, no qual a energia luminosa, proveniente dos fótons, é absorvida pelos elétrons de um dado material. O efeito fotoelétrico foi descrito, pela primeira vez, pelo físico Alexandre-Edmond Becquerel, no ano de 1839. Em seus estudos, ele observou a capacidade, de certos materiais, de gerar uma corrente elétrica, de pequena intensidade, quando expostos à luz.

O efeito fotoelétrico, nas células fotovoltaicas, é possível devido à existência de materiais conhecidos como semicondutores. Em tais materiais, a última camada de sua eletrosfera a receber elétrons, denominada **banda de valência**, é totalmente preenchida. Há, também, uma **banda de condução**, sem elétrons, e uma separação (ou *gap*) pequena entre essas duas bandas de energia (na ordem de 1 elétron-volt) (BRITO, 2014), como indicado na figura 10.

Figura 10 – Comparação do gap entre condutores, semicondutores e isolantes

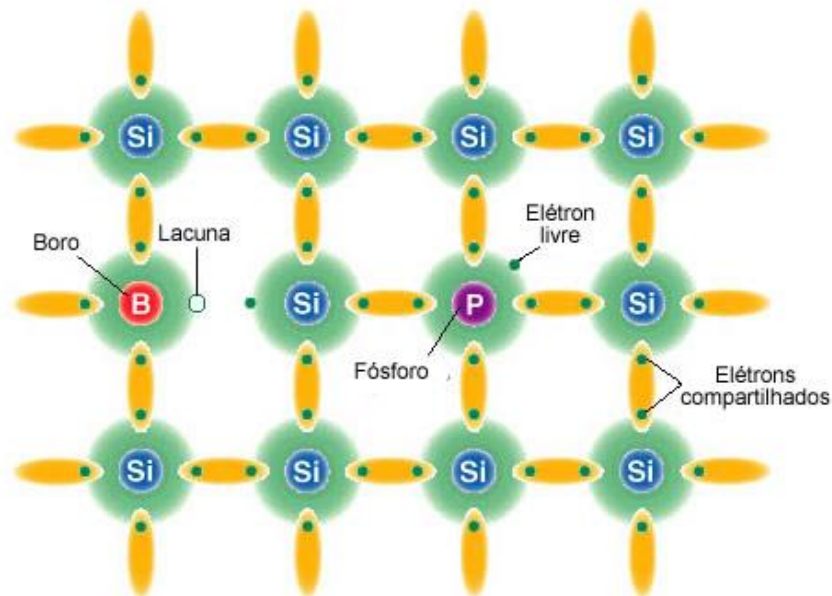


Fonte: Enfitec Junior (2018)

O silício, segundo elemento mais comum na crosta terrestre (apenas superado pelo oxigênio), é o material semicondutor mais utilizado na fabricação de células fotovoltaicas (BRITO, 2014). Parte-se, inicialmente, do silício puro, que possui quatro elétrons na sua camada de valência. Dopa-se metade desse silício com átomos de

boro, que apresentam, em sua camada de valência, espaço para um elétron. A outra metade do silício é dopada com átomos de fósforo, que, por possuir cinco elétrons em sua camada de valência, após feita a ligação com silício, deixa um elétron livre. A ligação entre esses três elementos é denominada junção P-N.

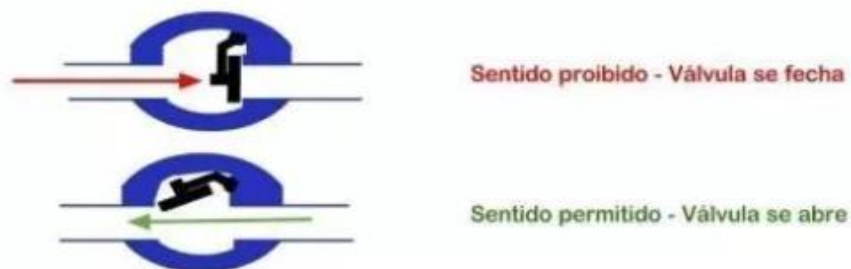
Figura 11 – Compartilhamento de elétrons, entre átomos de boro e de fósforo, com átomos de silício



Fonte: Brito (2014)

A junção P-N resulta em um componente, que tem função semelhante à de um diodo. Diodos têm a função de garantir que uma corrente elétrica siga um sentido único, impedindo-a, por eventual falha, de seguir no sentido contrário do desejado, análogo a uma válvula, em tubulações hidráulicas, como ilustrado na figura 12.

Figura 12 – Analogia entre um diodo e uma válvula

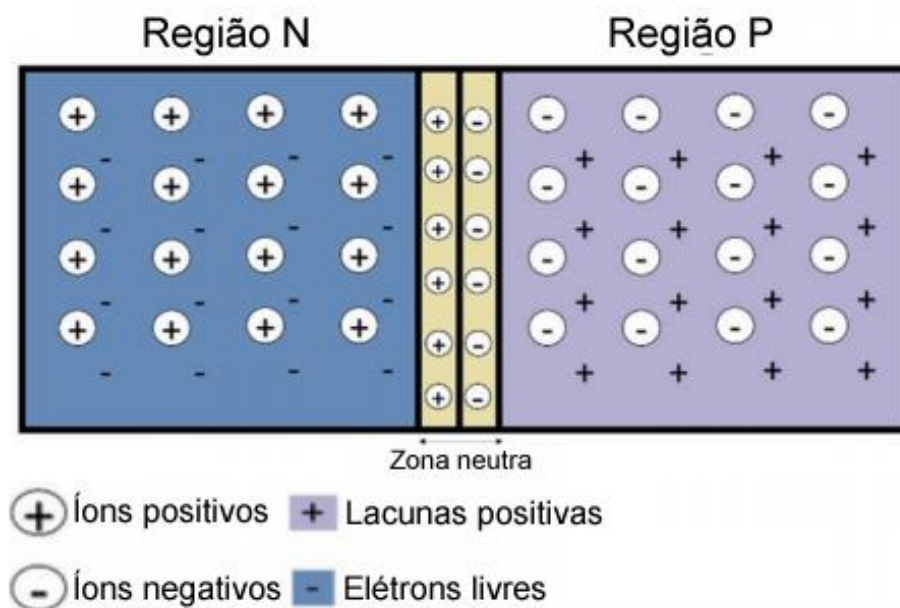


Fonte: Mundo da Elétrica (2017)



Ambas as partes – a que recebe átomos de boro (chamada região P), e a que recebe átomos de fósforo (chamada região N) – são eletricamente neutras, quando isoladas. No entanto, quando ambas as regiões são postas junto ao silício, ocorre difusão de elétrons. Nesse processo de difusão, os elétrons se deslocam da região N, onde há excesso de cargas negativas, para a região P, onde há excesso de cargas positivas. Ao se deslocarem, a diferença de cargas entre ambos os lados se reduz e, ao mesmo tempo, um campo elétrico é gradualmente formado, entre as duas partes. A difusão ocorrerá, até o momento em que o campo elétrico tiver intensidade suficiente para impedir que cargas negativas cruzem a junção. Esse processo é ilustrado na figura 13 (ALI *et al.*, 2019).

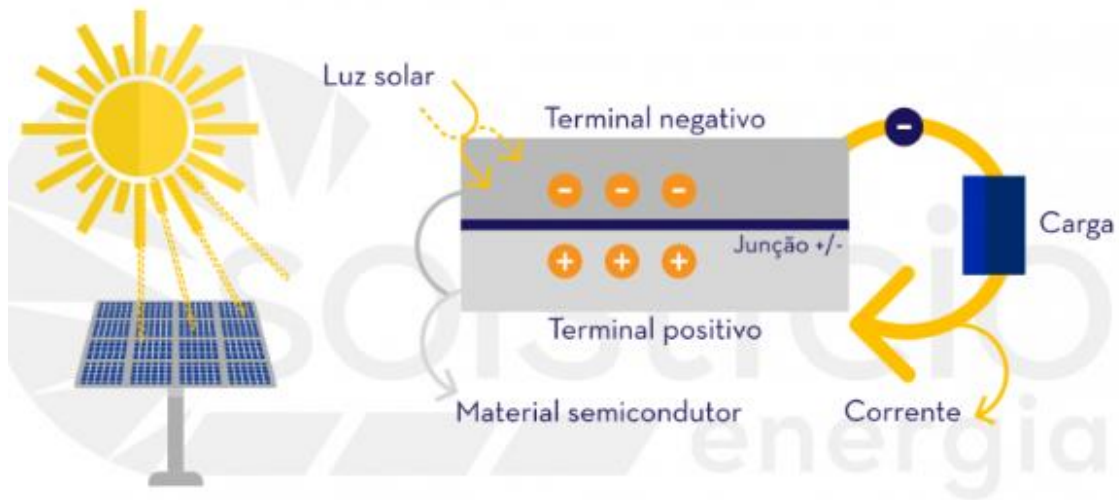
Figura 13 – Junção P-N



Fonte: adaptado de Ali *et al.* (2019, p. 17)

Uma vez alcançado o estado de equilíbrio, e estando criada uma zona neutra no centro da placa, quando a energia de fótons da luz solar atingir a célula fotovoltaica, esta será absorvida pelos elétrons, fazendo, assim, com que eles ganhem energia suficiente para vencer a barreira potencial, criada pelo campo elétrico, e atravessem a zona neutra. Ligando-se, então, condutores elétricos aos lados positivo e negativo da célula, formam-se um circuito elétrico e um fluxo contínuo de elétrons. Dessa forma, cria-se uma corrente elétrica, produzida na forma de corrente contínua (ALI *et al.*, 2019), que pode ser aproveitada. Esse sistema está ilustrado na figura 14.

Figura 14 – Efeito fotoelétrico, em uma célula de silício



Fonte: Solstício Energia (2017)

Partindo do efeito fotoelétrico, foram criadas as células solares, capazes de gerar corrente elétrica, com a energia proveniente de fótons. Como uma célula produz pouca energia sozinha e apresenta baixa resistência a danos diversos, sistemas mais complexos foram criados. Ligando várias células em série e fazendo sua proteção contra danos mecânicos, químicos e elétricos, procura-se obter um sistema que apresente maior eficiência e durabilidade. A seguir, são descritos os diversos tipos de sistemas utilizados, as partes que os compõem e as diferentes tecnologias empregadas, que buscam o mesmo objetivo: maior eficiência e durabilidade.

### 2.3.1 Sistemas fotovoltaicos

Segundo Pinho e Galdino (2014), sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em duas principais categorias: sistema autônomo (ou isolado) e sistema ligado à rede elétrica. Além desses, caso haja combinação de fontes de geração de energia, tem-se um sistema híbrido.

#### 2.3.1.1 Sistema autônomo

O sistema autônomo, ou isolado, é um sistema fotovoltaico não ligado a uma rede de distribuição de energia. Essa configuração é adequada, em situações de

áreas rurais e isoladas, onde a eletricidade é necessária, porém a rede de distribuição de energia não se faz presente.

O custo do investimento em infraestrutura, como instalação de cabos subterrâneos ou linhas aéreas, para baixa demanda, pode ser muito alto, fazendo com que haja mínimo ou nenhum retorno. Assim, a melhor solução é a instalação de um sistema fotovoltaico independente.

Esses sistemas, geralmente, são compostos por painéis fotovoltaicos conectados a controladores de carga. Estes, por sua vez, estão conectados às baterias e ao circuito que fará uso da energia gerada. Caso esse circuito utilize corrente alternada, a adição de um inversor de frequência será necessária.

#### 2.3.1.2 Sistema ligado à rede elétrica

O sistema ligado à rede elétrica, geralmente, é composto de painéis solares, quadro de distribuição, inversor de frequência e medidor elétrico, sendo ligado à rede de distribuição de energia.

Para esse tipo de sistema, existem quatro cenários possíveis: a energia gerada pelos painéis é igual à demanda; a energia gerada é superior à demanda, e o excesso de energia produzido é fornecido à rede; a energia gerada é inferior à demanda e a rede elétrica fornece o restante necessário; ou não há geração de energia solar, o que ocorre durante a noite, quando os painéis não produzem energia e a rede da concessionária supre totalmente as demandas de carga.

A figura 15 mostra os componentes do sistema fotovoltaico conectado à rede.



Figura 15 – Sistema ligado à rede



Fonte: adaptado de Ali *et al.* (2019, p. 178)

### 2.3.1.3 Sistema híbrido

O sistema híbrido consiste na associação entre um sistema fotovoltaico e uma fonte geradora de energia diferente. É um sistema mais complexo, pois necessita de integração dessas diferentes fontes de geração, como geradores eólicos ou motores a diesel, por exemplo. Porém, tem, como grande benefício, produzir energia, mesmo em momentos de privação de luz solar, quando o sistema fotovoltaico terá baixa ou nenhuma geração.

### 2.3.2 Componentes de sistemas fotovoltaicos

A seguir são apresentados diversos componentes do sistema fotovoltaico, passando pela unidade básica, a célula fotovoltaica, os elementos de proteção e outros componentes complementares, que variam, de acordo com a categoria de sistema.

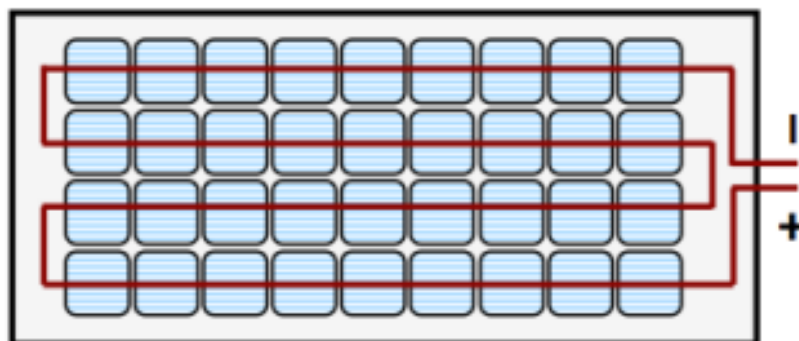
### 2.3.2.1 Célula fotovoltaica

A célula fotovoltaica é a menor estrutura do sistema e a responsável pela conversão de energia solar, em energia elétrica. Sua eficiência é diretamente resultante do tipo de material empregado em sua fabricação, apresentando uma sensibilidade, que varia conforme os diversos comprimentos de onda da radiação incidente e os diferentes materiais empregados. Assim, toda a energia solar que atinge a célula, com comprimento de onda diferente daquele ao qual a célula é sensível, transforma-se em calor, dentro do painel, causando perda de eficiência.

### 2.3.2.2 Módulo fotovoltaico

Uma célula fotovoltaica tem potência máxima, em geral, não excedente a 3 W, o que é insuficiente para a maioria das suas aplicações. Portanto, essas células solares, normalmente, são agrupadas e ligadas em um circuito em série, formando um módulo fotovoltaico, que apresenta uma potência mais elevada, como esquematizado na figura 16.

Figura 16 – Módulo fotovoltaico



Fonte: Carneiro (2010, p. 3)

Como os módulos estarão submetidos a condições ambientais adversas, é necessário construí-los com materiais que auxiliem na sua proteção. A fim de garantir a sua proteção, contra a ação de: esforços mecânicos; agentes atmosféricos; umidade; e outros fatores; os módulos são montados com as seguintes peças: moldura de alumínio, que garante rigidez mecânica; vidro temperado, a fim de proteger as células

de impactos mecânicos e permitir a entrada de luz; material encapsulante, como acetato-vinílico e etileno (EVA), que garante isolamento elétrico entre as células e protege-as de danos causados pela radiação UV; e um isolante elétrico, que protege a parte posterior do módulo e impede infiltrações (CARNEIRO, 2010).

### 2.3.2.3 Inversores

A energia elétrica é gerada, nos painéis fotovoltaicos, na forma de corrente contínua (CC). Levando-se em conta o fato de que grande parte dos equipamentos elétricos e eletrônicos funcionam a partir de corrente alternada (CA), torna-se necessária a conversão dessa corrente contínua produzida, a fim de que ela possa ser utilizada, e, também, para que seu eventual excedente possa ser injetado na rede da concessionária. Esse é o papel do inversor, que tem a capacidade de detectar a energia elétrica gerada pelos painéis e convertê-la em uma energia compatível com a mesma tensão, fase e frequência, da rede de distribuição.

O inversor conta, também, com um sistema de proteção eletrônica. Assim, ele tem a capacidade de detectar uma eventual sobrecarga e realizar, nesse caso, o desligamento do sistema, evitando qualquer dano aos equipamentos.

Além disso, o inversor tem a função de anti-ilhamento. Mesmo após o desligamento da rede pela distribuidora de energia, o sistema fotovoltaico continua produzindo energia, que poderia ser injetada na rede de distribuição, o que é uma condição inadmissível, pois compromete a segurança da manutenção na rede. Então, o inversor faz com que o sistema seja desligado.

O aproveitamento da energia gerada é diretamente relacionado à eficiência do inversor. Para ajudar nessa questão, os inversores contam com um sistema chamado “seguidor do ponto de potência máxima” (*maximum power point tracking* – MPPT), que maximiza a potência e a eficiência do sistema, convertendo a energia que passa por ele, de acordo com a melhor relação entre tensão e corrente momentânea, ligada às condições de irradiação e temperatura, naquele instante.

#### 2.3.2.4 Fusíveis e disjuntores

Fusíveis e disjuntores são dispositivos que promovem, simultaneamente, proteção contra correntes de sobrecarga e contra correntes de curto-circuito (NBR 5410:2004). Eles têm, como função, interromper qualquer sobrecorrente inferior ou igual à corrente de curto-circuito, presumida no projeto do sistema. Assim, na eventual ocorrência de uma falha elétrica, nenhum ponto do circuito é danificado por ficar exposto a temperaturas acima daquelas para as quais os equipamentos foram projetados para operar.

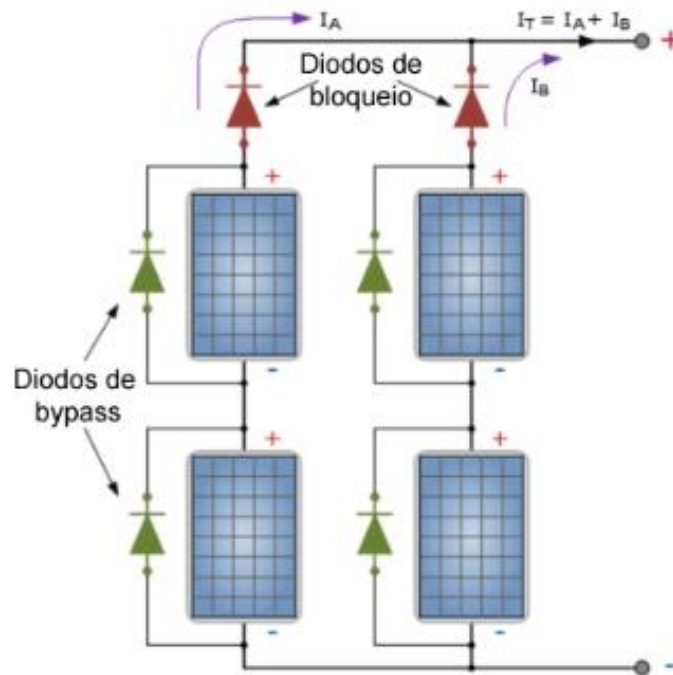
#### 2.3.2.5 Diodos de *bypass* e de bloqueio

A conexão em série das células fotovoltaicas torna os módulos muito sensíveis a condições desfavoráveis, como sombreamento ou pouca incidência de radiação solar. Em situações assim, uma ou mais células deixam de gerar energia.

A fim de evitar que o fluxo de correntes elétricas diferentes danifique o sistema, são utilizados diodos de *bypass*, ou diodos de passo. Esses diodos têm a função de evitar que a célula, ou o módulo, de pior rendimento, afete o desempenho do sistema, como um todo. Eles são conectados em paralelo às células, funcionando de forma semelhante a um curto-circuito, como indicado na figura 17. Idealmente, cada célula deveria ser equipada com um diodo de *bypass*; porém, tendo em vista o espaço físico limitado do módulo, em um módulo composto de 60 células, cada diodo protege um total de cerca de 20, por exemplo, acarretando uma pequena perda no rendimento total do painel (PAVLOVIC, 2020).

Já, diodos de bloqueio são utilizados entre os módulos fotovoltaicos e o gerador de energia solar, conforme se vê na figura 17. Sua função é evitar a circulação de corrente reversa pelo sistema.

Figura 17 – Diodos no sistema fotovoltaico



Fonte: adaptado de Pavlovic (2020, p. 87)

### 2.3.2.6 Proteção contra descargas atmosféricas (aterramento)

A proteção dos módulos fotovoltaicos, contra descargas atmosféricas, deve ser eficiente, pois eventuais descargas elétricas fortes podem atingir os painéis e causar-lhes danos, ou até mesmo, provocar incêndios. É recomendada a proteção do sistema, por meio de um para-raios. Contudo, no caso da já existência de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas no local, o sistema fotovoltaico pode ser ligado a ele, sem necessidade da instalação de um novo sistema exclusivo (PINHO; GALDINO, 2014).

### 2.3.2.7 Controlador de carga

Controladores de carga, geralmente, são usados em sistemas fotovoltaicos isolados e têm, como principal função, proteger as baterias de sobrecargas do sistema. Seu princípio de funcionamento consiste em impedir que a bateria sofra sobrecarga de tensão e prevenir que ela seja descarregada. Ambas as situações acarretam

desgaste e, conseqüentemente, diminuição da vida útil da bateria (PINHO; GALDINO, 2014).

#### 2.3.2.8 Baterias

As baterias são dispositivos responsáveis por fazer o armazenamento da energia elétrica gerada pelos painéis fotovoltaicos. Com esse armazenamento, elas suprem a demanda de energia, na ausência da radiação solar, como em dias nublados ou durante a noite, sendo mais utilizadas nos sistemas fotovoltaicos isolados. Existem diversos modelos de baterias, que podem ser utilizados. A escolha deve ser feita, considerando, tanto as células empregadas, por influenciarem diretamente a eficiência de armazenamento, quanto a vida útil da bateria, que, idealmente, deve ser, no mínimo, a mesma dos painéis fotovoltaicos. Segundo Pavlovic (2020), baterias de chumbo ácido são as mais utilizadas, por conta do seu baixo custo e alta disponibilidade.

#### 2.3.2.9 Cabeamento

Para fazer a ligação entre módulos fotovoltaicos, inversores, baterias e todos os outros dispositivos pertencentes ao sistema, faz-se necessário um número considerável de conexões que, por vezes, apresentam grande extensão. Nesse sentido, é importante atentar-se para a utilização de cabos e conexões seguras, a fim de evitar falhas, perdas e acidentes, como curto-circuito (PINHO; GALDINO, 2014).

O cabeamento pode ser dividido em lado CC (corrente contínua) e lado CA (corrente alternada). No lado CC, são necessários cabos individuais, com apenas um núcleo, cada. Já, no lado CA, iniciando após o inversor, o cabeamento consistirá em três cabos individuais de núcleo único, em caso de ligação monofásica; ou cinco cabos, em caso de ligação trifásica. Os cabos destinados a sistemas fotovoltaicos devem ser resistentes a diversos fatores, como: radiação ultravioleta; ação da água; e altas temperaturas; sendo admitido que gerem perdas de, no máximo, 1% (REMMERS, 2013).

### 2.3.2.10 Estrutura de fixação

A estrutura de fixação deve, além de suportar o sistema fotovoltaico, oferecer resistência à força dos ventos, expansões e contrações térmicas, entre outras formas de esforço mecânico, ao longo da vida útil do sistema.

## 2.3.3 Tecnologias fotovoltaicas

As tecnologias fotovoltaicas são divididas em três gerações: a primeira, é baseada em módulos de silício cristalino e junções P-N; a segunda, é baseada em filmes finos inorgânicos; e a terceira, apresenta variáveis, sendo mais comum o emprego de células orgânicas, células sensibilizadas por corantes (DSSC) e células de Perovskite. As tecnologias das gerações são diferenciadas quanto à eficiência, o que será descrito, em detalhes, a seguir.

### 2.3.3.1 Primeira geração

Cerca de 90% do mercado fotovoltaico mundial é representado pela primeira geração da tecnologia, caracterizada por células solares de silício cristalino (mono ou policristalino). A aplicação do silício apresenta grandes vantagens, como a abundância do elemento no planeta, custo moderado, baixa toxicidade e alta eficiência, em relação às outras gerações (20% ~ 25%). Essa área da indústria conta, também, com: cadeias de suprimentos extensivamente padronizadas e sofisticadas; investimentos em larga escala, em instalações de produção em massa do elemento; além de milhares de especialistas altamente treinados, cientistas, engenheiros e técnicos em silício. Em contraponto aos aspectos positivos, painéis fabricados com a primeira geração de tecnologia fotovoltaica apresentam uma pegada de carbono mais elevada, quando comparados aos das outras gerações (FREUNDLICH *et al.*, 2017).

Nos modelos de primeira geração, que usam silício policristalino, o silício é simplesmente solidificado, após sua fusão, o que resulta em um bloco com elevadas quantidades de cristais. Por conta disso, apresentam maior número de defeitos, que reduzem a eficiência da célula fotovoltaica. Por ser um método de fabricação mais

simples, seu custo acaba sendo mais baixo, quando comparado ao de células monocristalinas (RÜTHER, 2004).

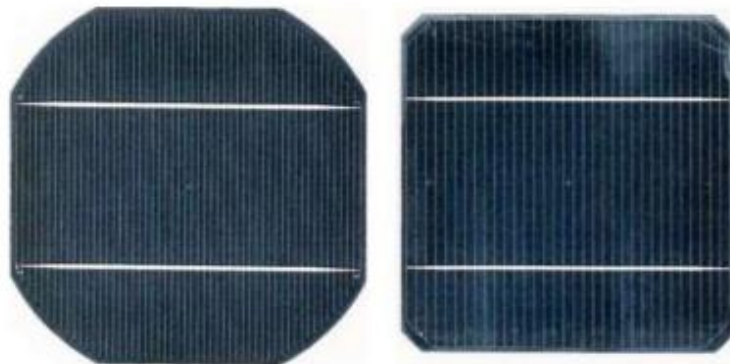
Figura 18 – Células de silício policristalino



Fonte: Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie (2008, p. 27)

O silício semiconductor é, naturalmente, policristalino. Para convertê-lo ao estado monocristalino, são necessários alguns processos industriais. O mais utilizado é o processo de tração de Czochralski, em que se derrete o silício, a temperaturas de cerca de 1.400°C. Por se tratar de um processo lento e cuidadosamente controlado, seu custo se torna elevado. Entretanto, resulta em células com uma eficiência superior, quando comparadas aos modelos policristalinos.

Figura 19 – Células monocristalinas



Fonte: Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie (2008, p. 25)



### 2.3.3.2 Segunda geração

Células solares de filmes finos são consideradas uma segunda geração fotovoltaica, pelo fato de consumirem menos matéria e energia durante sua produção. De acordo com a Sociedade Alemã de Energia Solar (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie (2008), a fabricação de células de silício chega a necessitar de temperaturas de 1.400°C, enquanto a fabricação de filmes finos necessita de apenas 200°C a 600°C.

As células fotovoltaicas de filme fino são baseadas em compostos absorvedores de calcogenetos, como  $CdTe$  e  $Cu(, Ga)Se_2$ . Este segundo, apresenta a maior eficiência entre todas as tecnologias de filmes finos, com testes laboratoriais chegando a valores de eficiência de 22,6%. Outra vantagem das células solares de filmes finos, dada a alta taxa de absorção da luz solar, característica de seus materiais, é a possibilidade de produzir células solares com espessuras mínimas, chegando a valores menores que 0,001 mm. Em decorrência dessa pequena espessura, apresentam flexibilidade (mediante o uso de um substrato de folha de polímero) e leveza (FREUNDLICH, 2017).

Figura 20 – Comparação de espessuras, entre uma célula de filme fino (esquerda) e uma célula de cristal de silício (direita) (em  $\mu\text{m}$ )



Fonte: Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie (2008, p. 40)

### 2.3.3.3 Terceira geração

As células de terceira geração, embora ainda tenham baixa eficiência de conversão de energia solar em energia elétrica, apresentam diversas vantagens sobre as tecnologias estabelecidas. Entre elas, estão: o potencial de processamento de baixo custo; sobre grandes áreas, possível semitransparência; flexibilidade mecânica; e baixo peso. Nessa geração é representada principalmente por células orgânicas, células sensibilizadas por corante, células de sulfeto de zinco e de cobre, célula de Perovskite (PAVLOVIC, 2020).

Algumas abordagens utilizadas em células de terceira geração são: modificação da distribuição de energia fotônica, antes da absorção pela célula; utilização de materiais ou estruturas de células com vários *band gaps* diferentes; e redução das perdas devidas à termalização (FREUNDLICH, 2017).

### 2.3.4 Eficiência de sistemas fotovoltaicos

Segundo Pavlovic (2020), a eficiência de um painel solar depende de diversos fatores. Entre eles, destacam-se reflexão da luz, na superfície da célula; perdas na região do infravermelho; perdas na região do ultravioleta; e perdas devido à espessura de célula solar.

No que se refere à reflexão da luz, na superfície da célula, quanto mais luz é refletida, menos a luz adentra a célula e menos ela é aproveitada. Segundo Pavlovic (2020), a reflexão óptica sobre a célula depende da sua microrrugosidade superficial; já que o aumento da microrrugosidade leva à diminuição da reflexão. Além disso, no intuito de se obter maior redução da reflexão, revestimentos antirreflexo são aplicados à célula solar, permitindo que a reflexão óptica seja reduzida para 3%.

Já, sobre as perdas na região do infravermelho, de acordo com Pavlovic (2020), no espectro solar, fótons sem energia suficiente para vencer o *gap* entre as bandas do material semicondutor não geram corrente, causando apenas uma elevação da temperatura da célula solar. Nas células solares de silício monocristalino e policristalino, as perdas de eficiência por esse fator chegam a 23%.

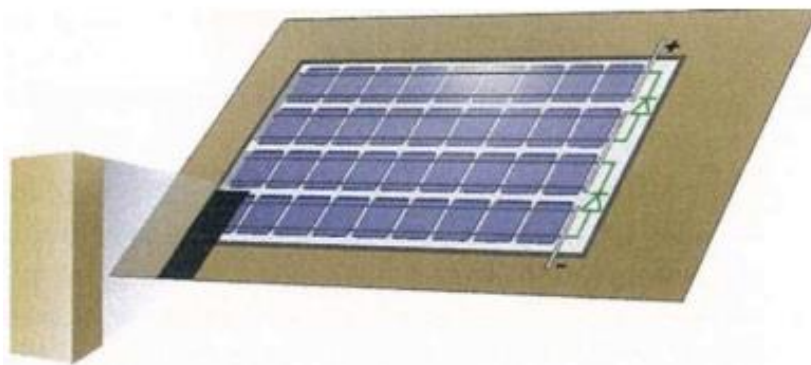
Quanto às perdas na região do ultravioleta, segundo Pavlovic (2020), em células solares de silício, fótons com energias acima de 1,1 eV causam, juntamente à geração de corrente, aquecimento das células, devido ao excesso de energia necessário para vencer o *gap*. A perda de eficiência das células solares, causada por esse fator, é de cerca de 33%;

Sobre as perdas associadas à espessura da célula solar, Pavlovic (2020) explica que, nas células solares, a parte sensível à luz não é espessa o suficiente para absorver todos os fótons incidentes; ou seja, parte do fluxo passa através da célula e é absorvido no eletrodo traseiro. Esse tipo de perda pode ser reduzido a valores tão baixos quanto 1%, uma vez que se faça uso de um eletrodo traseiro reflexivo, que retorna, para a célula solar, os fótons que o atingem.

Já, a *Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie* (2008) cita outras formas de perda, que também influenciam na eficiência. São elas: sombreamento, acúmulo de poeira, temperatura, *mismatch* e degradação.

Quando há sombreamento, seja total ou parcial, como ilustrado na figura 21, a célula que recebe menor quantidade de radiação determina a corrente, a potência e a operação do sistema todo. Como as células estão conectadas em série, a capacidade geradora é reduzida. O pico de funcionamento do gerador fotovoltaico ocorre quando ele está iluminado homoganeamente.

Figura 21 – Sombreamento



Fonte: Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie (2008, p. 91)

O acúmulo de poeira na superfície dos painéis fotovoltaicos ocorre em áreas urbanas, com tráfego de automóveis, ou em locais com clima seco. A sujeira impede que os painéis absorvam toda a luz que incide sobre eles, causando perdas de até

15%. O acúmulo de poeira é menor quando as células são lavadas com auxílio da água da chuva, em módulos com uma inclinação mínima de 10°, que se mostra suficiente para sua autolimpeza.

Figura 22 – Comparação entre painéis, com e sem acúmulo de poeira



Fonte: Eco Fortis (2020)

Quanto à temperatura, os painéis solares sofrem perda de 0,3 a 0,4%, a cada aumento de 1°C, com a temperatura operacional nominal sendo  $45 \pm 2^\circ\text{C}$ . Portanto, na fase da instalação, é importante proporcionar área para boa ventilação, a fim de que os módulos fotovoltaicos dissipem o calor e minimizem a perda de eficiência.

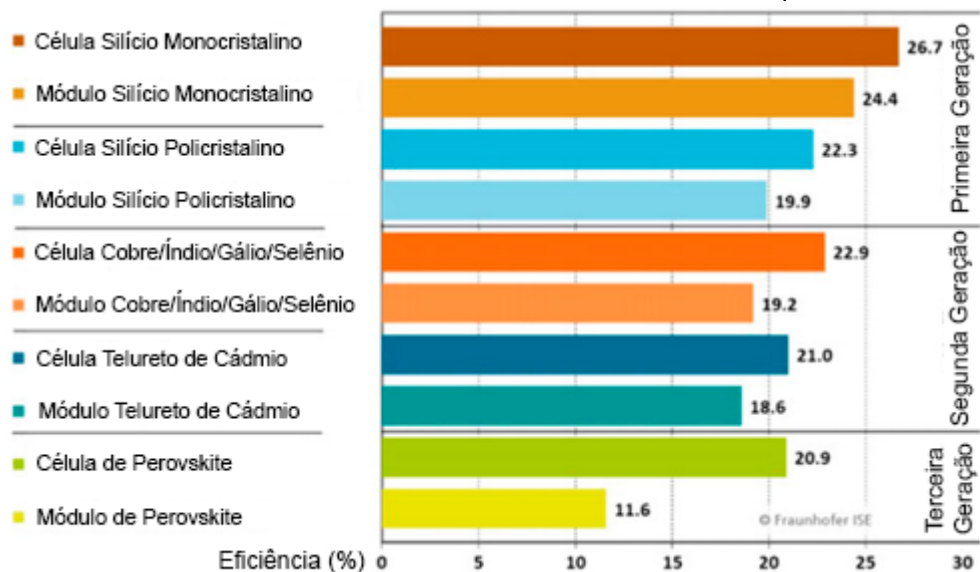
Já, *mismatch* é resultante da utilização de módulos fotovoltaicos com características específicas diferentes. O módulo gerador da menor corrente ditará o funcionamento do sistema.

Por fim, a degradação ocorre, principalmente, devido à ação do tempo, entre outros motivos. Exemplos são: *yellowing*, seguido de *browning*, que é o escurecimento do EVA, devido aos raios UV; delaminação, que é o descolamento do EVA, criando uma interface óptica extra e aumentando, assim, a refletividade; infiltração, que é a penetração de água, devido ao fato de o módulo não estar adequadamente vedado, levando à corrosão de componentes elétricos; e a degradação do revestimento antirreflexivo.

Dos diversos fatores de perda da eficiência, certo número é determinado por leis físicas fundamentais, como os fatores listados por Pavlovic; portanto, não podem ser impedidos. Perdas atreladas à tecnologia de formação de células solares, por outro lado, podem ser reduzidas com o emprego de novas tecnologias. Já, outras podem ser solucionadas com elaboração de um projeto adequado e realização de manutenção periódica.

As medidas de eficiência dos módulos fotovoltaicos são obtidas por meio de testes laboratoriais, sob condições padronizadas estabelecidas. Na figura 23, são ilustrados os resultados relativos a eficiência, de diversas opções de tecnologias fotovoltaicas, que fazem uso de diferentes materiais. Para tanto, as placas solares foram submetidas às seguintes condições: intensidade de radiação solar de 1000 W/m<sup>2</sup>; coeficiente de *Air Mass* de 1,5; temperatura do módulo solar, de 25°C; e velocidade do vento, de 1 m/s (PAVLOVIC, 2020).

Figura 23 – Eficiência laboratorial de diferentes modelos de células e painéis fotovoltaicos



Fonte: Pavlovic (2020, p. 81)

### 2.3.5 Manutenção de sistemas fotovoltaicos

Com o objetivo de manter a eficiência máxima do sistema fotovoltaico e impedir falhas que venham a comprometer seu funcionamento, a manutenção regular dos componentes do sistema se faz necessária. Para isso, recomenda-se a elaboração

de um plano de manutenção, que atenda, não só, às especificações dos fabricantes, mas também às especificações de projeto.

Em sistemas de pequeno porte, o próprio usuário pode ficar responsável por realizar parte das atividades de manutenção. Por meio de uma inspeção visual, por exemplo, ele poderá verificar as condições físicas das estruturas e dos módulos, dando atenção a detalhes, como: fixação da estrutura; possíveis corrosões; e aterramento. Também é fundamental verificar se os módulos apresentam sua face frontal limpa, sem rachaduras ou descoloração nas células. O crescimento de vegetação nos arredores é outro ponto a ser observado, pois pode resultar no sombreamento das placas.

Sugere-se que o usuário efetue a limpeza dos módulos, preferencialmente, no começo da manhã, ou no final da tarde, a fim de evitar um choque térmico, que pode ser causado pelo contato entre a água fria e os módulos quentes. Além disso, deve-se tomar cuidado para não riscar o vidro de proteção do painel, com abrasivos, durante a limpeza, bem como evitar apoiar-se nos módulos, pois uma carga maior do que a projetada poderá danificá-los. Segundo Pinho e Galdino (2014), já foram verificadas perdas de até 10%, no desempenho de módulos instalados em regiões com presença de muita poeira, sendo, portanto, recomendada, nesses casos, uma limpeza com maior periodicidade.

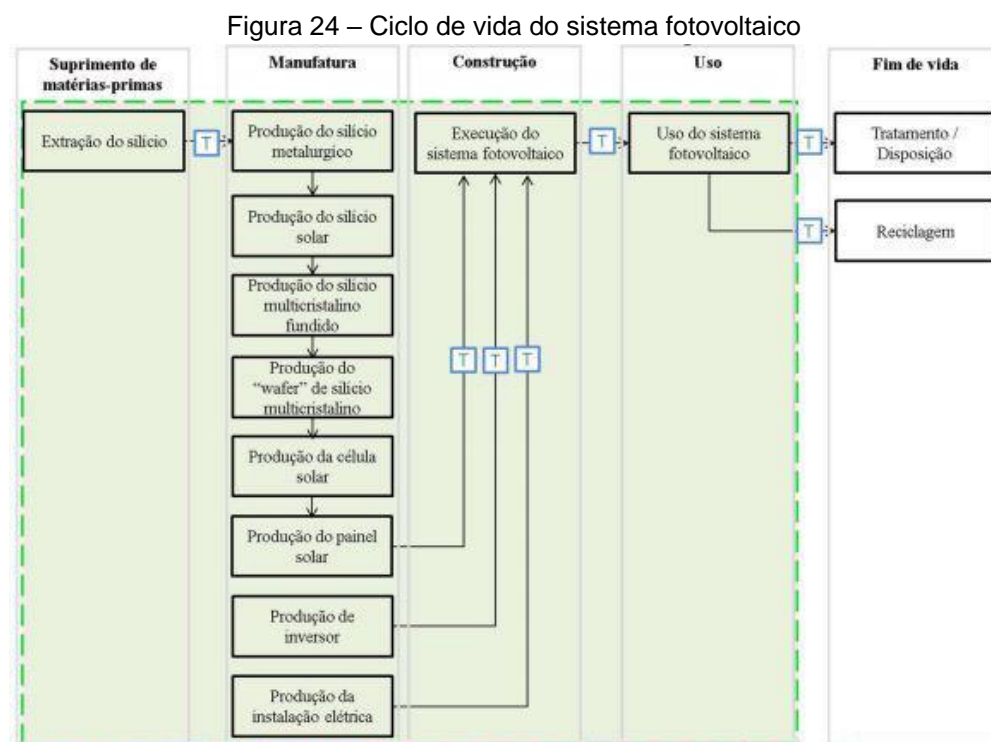
Quanto aos inversores, a manutenção, normalmente sugerida ao usuário, é a de ficar atento a qualquer som distinto do comumente emitido pelo equipamento. Caso isso venha a ocorrer, o usuário deve entrar em contato com um profissional capacitado, e este, então, poderá realizar os reparos.

### 3 PENSAMENTO DO CICLO DE VIDA

O pensamento do ciclo de vida é um estudo aprofundado dos impactos econômicos, sociais e ambientais de produtos e serviços. É feita uma análise, identificando e quantificando energia, materiais utilizados e resíduos descartados, ao longo de todo o ciclo de vida do processo ou atividade. As fases analisadas incluem: aquisição de matérias-primas; fabricação; distribuição; uso; e disposição final. Esta abordagem, tem como objetivo, uma tomada de decisões mais conscientes, que gerem impactos positivos no meio ambiente, na sociedade e na economia (SEBRAE, 2017).

#### 3.1 CICLO DE VIDA DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

A figura 24 apresenta o ciclo de vida do sistema fotovoltaico de primeira geração. Na ilustração, as etapas avaliadas neste estudo estão delimitadas pela linha tracejada verde.

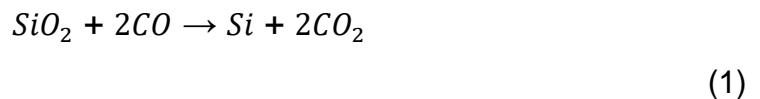


Fonte: Leite e Silva (2018, p. 5)

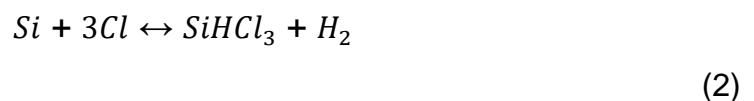
O ciclo de vida do sistema fotovoltaico, se inicia com a mineração das matérias-primas. São obtidos: a **areia** de quartzo, que contém a sílica, utilizada na produção dos vidros de proteção dos painéis, e de onde provém o silício, usado na produção dos painéis fotovoltaicos; o **cobre**, utilizado nos cabos elétricos; o **ferro** e o **zinco**, utilizados nos componentes estrutura de fixação, entre outros.

O explosivo  $C_6H_2CH_3(NO_2)_3$ , conhecido pela sigla TNT (trinitrotolueno), é usado na mineração das matérias-primas. Durante a mineração, certa quantidade de dióxido de carbono é emitida, decorrente da detonação do TNT (HOU *et al.*, 2016). Após a extração, ocorre o transporte da matéria-prima para o local onde ela passará pelas etapas de processamento e purificação.

No caso do **silício** utilizado em células solares, o primeiro passo do processo de purificação consiste em produzir silício de grau metalúrgico. O **silício metalúrgico** é obtido pela redução do  $SiO_2$ , encontrado no quartzo, com o carbono, em um forno de alta temperatura, entre 1.400°C e 1.750°C (PAVLOVIC, 2020). A equação química do processo é apresentada a seguir:



Segue, então, a etapa de purificação do silício metalúrgico, realizada a 300°C, a fim de levá-lo ao nível de pureza de semicondutor:



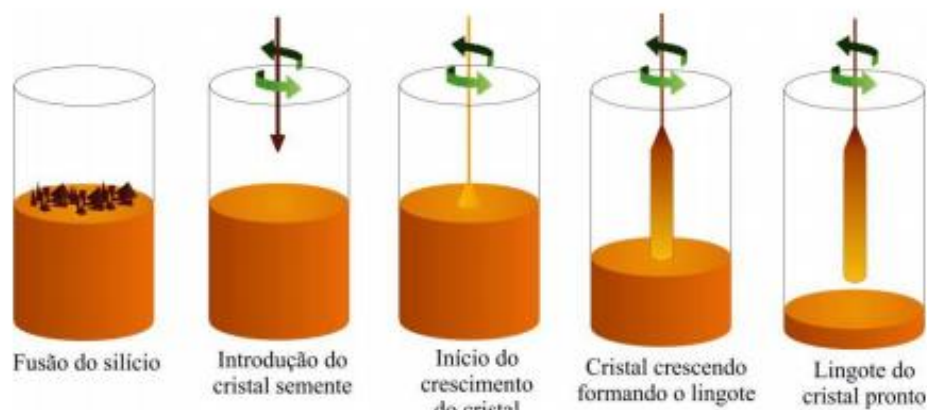
O silício semicondutor de alta pureza, ou **silício de grau solar**, como é também chamado, é obtido por destilação fracionada múltipla e decomposição térmica do  $SiHCl_3$ , obtido na etapa anterior. Esse processo ocorre a 1.200°C.

Até esta etapa, o silício está no estado **policristalino**, sendo necessária a aplicação de um método industrial, como o de tração de Czochralski, para que ele passe ao estado monocristalino. Nesse processo, o material inicial, policristalino, é fundido em um cadinho, a cerca de 1.420°C. Um cristal semente, que apresenta uma



orientação monocristalina definida, é mergulhado no silício fundido. Esse cristal é lentamente rotacionado e puxado para fora do cadinho, a uma velocidade de cerca de 2 a 3 cm por hora. Devido à diferença de temperatura entre o cristal e o silício fundido, este segundo se deposita em torno do cristal semente, orientando seus próprios cristais, de modo a formar **silício monocristalino**. O processo está ilustrado na figura 25, a seguir:

Figura 25 – Método da tração de Czochralski



Fonte: Machado e Miranda (2014)

Por meio desse processo, obtém-se um lingote de silício monocristalino, de vários metros de comprimento. Esses cilindros são cortados, de modo a formar **wafers**, de 200 ~ 300  $\mu\text{m}$  de espessura. Após o corte, os *wafers* são polidos e limpos, em uma solução diluída de ácido clorídrico e nítrico.

Durante a formação do silício monocristalino, no processo de Czochralski descrito anteriormente, boro é adicionado ao silício fundido, de modo que a parte interna do *wafers* constitua a região P do semiconductor. Já, a região N é criada por meio da difusão de gás de fósforo, inserindo-o em um forno de difusão, a uma temperatura entre 800°C e 900°C. Por meio desse processo, a superfície superior do *wafers* fica dopada, criando, então, a junção P-N. Tem-se, assim, a **célula fotovoltaica**.

As células são conectadas física e eletronicamente. São aplicados os materiais auxiliares encapsulantes, como um filme adesivo de EVA e um vidro de proteção, e outros elementos elétricos. Assim, está formado o **módulo fotovoltaico**.

A próxima etapa consiste no transporte dos painéis solares, acompanhados do balanço do sistema (*balance of system* – BOS), para o depósito, onde ficarão até o

momento de sua aquisição. O balanço do sistema consiste nas estruturas de montagem, cabeamento e inversores. O consumo de energia e as emissões de gases do efeito estufa (GEE), presentes nessa etapa do ciclo de vida, incluem o processamento de materiais do BOS e os combustíveis fósseis queimados no transporte do sistema.

A conversão da luz solar em energia elétrica, pelas células fotovoltaicas, é um processo totalmente físico, sem qualquer reação química envolvendo carbono. Portanto, nenhum poluente é emitido e nenhuma energia adicional é consumida. No entanto, ao longo da vida útil do sistema, é possível que seja necessária a substituição de módulos solares, ou de outros elementos elétricos, em decorrência de problemas. Durante a operação de manutenção dos painéis fotovoltaicos, há consumo de energia e emissão de GEE; porém, em escala inferior ao que ocorre em outras etapas.

Quando a vida útil de um módulo fotovoltaico termina, ele deve ser desativado. Esse é o processo final do ciclo de vida do sistema fotovoltaico, que normalmente envolve desconstrução, descarte e reciclagem dos componentes. A reciclagem de esquadrias de alumínio, suportes de aço inoxidável, cabos e inversores pode compensar, parcialmente, as emissões de GEE de etapas anteriores. Entretanto, o próprio processo de reciclagem consome energia e causa emissões de GEE.

## 3.2 ÍNDICES AVALIATIVOS

A fim de analisar o impacto ambiental total causado pelo uso de um sistema fotovoltaico, a Agência Internacional de Energia (International Energy Agency– IEA) (2019) utiliza o tempo de retorno de energia e o tempo de retorno de dióxido de carbono equivalente, como índices avaliativos do ciclo de vida do sistema. Este estudo também considera um terceiro índice, que é o retorno financeiro, por ser de grande interesse ao usuário do sistema fotovoltaico.

### 3.2.1 Tempo de retorno da energia

Durante a avaliação do ciclo de vida, os índices são definidos tendo por base o objetivo do estudo. Para sistemas fotovoltaicos, por serem geradores de eletricidade, o índice de tempo de retorno da energia (*energy payback time* – EPBT) é comumente

avaliado. O EPBT expressa o tempo (meses ou anos) que um sistema leva para recuperar, por meio de sua própria produção de eletricidade, o consumo de energia associado ao seu ciclo de vida. Uma equação usada para estimar o EPBT é mostrada a seguir:

$$EPBT = \frac{E_{mat} + E_{manuf} + E_{trans} + E_{inst} + E_{fdv}}{\left(\frac{E_{ger}}{\eta_G}\right) - E_{oma}} \quad (3)$$

Onde:

- EPBT: índice de retorno de energia.
- $E_{mat}$ : demanda de energia primária, para produzir os materiais que integram o sistema fotovoltaico.
- $E_{manuf}$ : demanda de energia primária requerida para fabricar o sistema fotovoltaico, em si.
- $E_{trans}$ : demanda de energia primária, para transportar materiais integrados ao sistema fotovoltaico, durante o ciclo de vida.
- $E_{inst}$ : demanda de energia primária para instalar o sistema.
- $E_{fdv}$ : demanda de energia primária para as atividades associadas ao final da vida útil do sistema fotovoltaico.
- $E_{ger}$ : geração anual de eletricidade.
- $E_{oma}$ : demanda anual de energia para operação e manutenção, em termos de energia primária.
- $\eta_G$ : eficiência da rede, isto é, a eficiência média de conversão de energia primária em eletricidade.

### 3.2.2 Tempo de retorno do dióxido de carbono equivalente

A taxa de emissão de gases de efeito estufa é outro índice utilizado para determinar a eficácia de um sistema fotovoltaico, em termos de impacto ambiental. Normalmente, esse índice é analisado por meio do tempo de retorno do  $CO_2eq$  ( $CO_2eq$  *payback time*), obtendo-se o tempo necessário à produção de energia, equivalente

aos gases poluentes emitidos durante as diversas etapas da vida útil do sistema. Sendo consideradas apenas as emissões diretas na atmosfera, não relacionadas a geração de energia elétrica utilizada.

A relação entre energia produzida e emissão de poluentes é expressa pela quantidade, em quilogramas, de dióxido de carbono equivalente liberada na geração de 1kWh de energia. Esse valor varia de país para país, por conta de sua matriz elétrica, sendo caracterizado como o **fator de emissão da rede** (*grid emission factor* – GEF). No caso do Brasil, país onde os painéis avaliados neste estudo estão instalados, fator de emissão de rede tem valor de 0,539 kg  $CO_2$ /kWh (INSTITUTE FOR GLOBAL ENVIRONMENTAL STRATEGIES, 2020).

### 3.2.3 Retorno financeiro

O retorno financeiro do investimento não integra, usualmente, a avaliação do ciclo de vida, cujo foco é voltado aos impactos ambientais. Entretanto, para o indivíduo comum, ou empresa que investiu na instalação dessa tecnologia fotovoltaica, visando reduzir gastos e obter lucro no longo prazo, esse índice é de alta relevância.

Neste estudo foram utilizados dois métodos de análise: o *payback* descontado e o valor presente líquido (VPL). Ambos os métodos fazem uso da taxa mínima de atratividade (TMA), que representa a taxa mínima de retorno que um investidor aceita receber, quando aplica seu capital em algum empreendimento (CIÊNCIA E NEGÓCIOS, 2017). Essa é uma forma de comparar investimentos de maior risco, como a aquisição do sistema fotovoltaico, sobre o qual há interesse em conhecer se resultará em retorno para o investimento a ser realizado.

No Brasil, o investimento considerado o mais seguro é o Tesouro Direto, que tem o governo federal como pagador dos títulos. Como o governo federal nunca, em sua história deu calote na dívida interna do país, essa opção de investimento tem sua atratividade associada à garantia oferecida ao investimento (GUIAINVEST, 2017). Tendo isso em vista, a taxa adotada foi a Selic, atrelada ao Tesouro Selic, principal papel do Tesouro Direto. Essa é a taxa básica de juros, definida pelo Banco Central e que, no mês de outubro de 2019, era de 5,4% a.a. (BANCO CENTRAL, 2020).

O valor presente líquido (VPL) é um método que consiste em trazer para a data presente, todo o fluxo de caixa de um projeto de investimento, adicionando-o ao valor do investimento inicial, usando, como taxa de desconto, a TMA. Um VPL positivo indica que o projeto propicia lucro para o investidor. Entretanto, se for negativo, identificará um prejuízo (WR PRATES, 2016a). A equação, a seguir, é usada para o cálculo do VPL:

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+r)^t} \quad (4)$$

Onde:

- $FC_t$  = fluxo de caixa, no tempo t
- $r$  = taxa de desconto
- t = tempo

O *payback* é definido como o tempo, em anos, meses ou semanas, necessário para recuperar o investimento inicial de um projeto. Quando se considera uma taxa de juros que desconta o fluxo de caixa, como o TMA, tem-se o *payback* descontado. Esse método apresenta um problema associado à grande sensibilidade do resultado, em relação ao fluxo de caixa, pois, como não há garantia de que esse fluxo será regular, ao longo de todo o período considerado, ou seja, o resultado real pode diferir muito do estipulado, podendo levar a uma estimativa equivocada (WR PRATES, 2016b).

### 3.3 DIRETRIZES PARA PENSAMENTO DO CICLO DE VIDA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Diretrizes publicadas pelo Programa Sistema de Energia Fotovoltaica da Agência Internacional de Energia (*Photovoltaic Power Systems Programme of the International Energy Agency – IEA*), poderão auxiliar na padronização das análises (FRISCHKNECHT *et al.*, 2015). Entre elas, merecem destaque a expectativa de vida útil, os dados de irradiação, a taxa de desempenho e a taxa de degradação.

### 3.3.1 Expectativa de vida útil

Segundo a *International Energy Agency* (2011), é difícil quantificar a vida útil de painéis solares, pois a maioria dos sistemas fotovoltaicos em operação foi produzida nos estágios iniciais do desenvolvimento da tecnologia, inexistindo dados concretos sobre as tecnologias mais recentes. A literatura sobre o tema aponta para um período de 20 a 30 anos. Os valores adotados como expectativa, neste trabalho, são mostrados no quadro 1, a seguir.

Quadro 1 – Expectativa de vida útil para o sistema fotovoltaico e componentes

Item	Vida Útil (Anos)
Painéis fotovoltaicos	25
Inversores para residências	15
Estrutura de fixação montada em telhado	30
Cabeamento	30

Fonte: adaptado de Ito (2011)

Cabe observar que a expectativa de vida útil do sistema fotovoltaico, segundo Ito (2011), é de 30 anos. Para este estudo, no entanto, ela foi estimada em 25 anos, por ser este o valor mais frequentemente referido na literatura, assim como aquele apontado pela *International Energy Agency*.

### 3.3.2 Dados de irradiação

Os dados de irradiação variam de acordo com o local de instalação do sistema e inclinação dos módulos.

### 3.3.3 Desempenho

O desempenho de um sistema fotovoltaico depende do tipo de instalação. Em geral, ele cresce, diante de temperaturas mais baixas, e sempre que houver um monitoramento dos sistemas fotovoltaicos, para a detecção precoce de defeitos. A recomendação da *International Energy Agency* é de que se adote um desempenho de 75%, para instalações montadas em telhados e de 80%, para instalações montadas no solo, considerando-se latitudes ideais. A *International Energy Agency* recomenda que sejam utilizados dados reais de desempenho, sempre que disponíveis.

### 3.3.4 Degradação

A degradação é um aspecto em contínua pesquisa, já que a maioria dos módulos fotovoltaicos se degrada ao longo do tempo. No entanto, com base nos dados coletados até o presente, a consideração do valor de 0,5% de perda, ao ano, aparenta ser uma taxa de degradação adequada para módulos fotovoltaicos de silício cristalino, sendo esse o valor adotado para as diretrizes que definem a taxa de degradação de módulos fotovoltaicos de placa plana.

## 4 ESTUDO DE CASO: RESIDÊNCIA FAMILIAR

O estudo de caso apresentado, a seguir, está dividido em seis etapas. Primeiramente, é realizada a caracterização do sistema fotovoltaico em análise. Em seguida, são apresentados os cálculos e resultados associados à geração de energia. No próximo passo, é quantificado o impacto ambiental associado ao sistema fotovoltaico, sendo estimados o gasto energético e a quantidade de gases poluentes liberados. Por fim, tendo sido quantificada a energia produzida e os impactos causados, é feita a comparação entre esses valores, sendo calculado o tempo que o sistema necessita para compensar os resultados, tanto ambientais, quanto financeiros.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

O sistema fotovoltaico, objeto deste estudo, está instalado, em uma residência, localizada no município de Feliz, no Rio Grande do Sul (Figura 26). O município dista cerca de 80 km de Porto Alegre e, segundo estimativa do IBGE (2019), apresentava uma população de 13.547 habitantes, em 2019.

Figura 26 – Edificação estudada



Fonte: autor (2020)



A edificação está situada na região urbana central do município, na Avenida Doutor Dóris José Schlatter, e seu sistema de geração de energia fotovoltaica está ligado à rede de distribuição da companhia elétrica local. Seu custo total, na data de aquisição, outubro de 2019, considerando: compra dos módulos; inversor; estrutura de fixação; transporte; e instalação, foi de R\$ 19.228,00.

Figura 27 – Módulos fotovoltaicos instalados

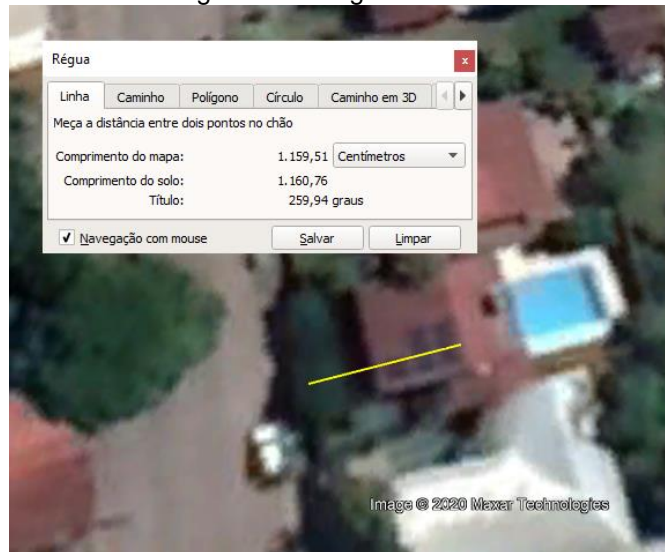


Fonte: autor (2020)

Os dez módulos fotovoltaicos instalados são do modelo L-G5.0.G Q.Peak Monocristalina, da marca sul-coreana Q Cells, com potência nominal de 365 W, cada. Somados, ocupam uma área de 18 m<sup>2</sup>. Os painéis são cobertos com uma camada de vidro termicamente pré-tensionado, com 3,2 mm de espessura, do tipo “antirreflexo”, estando dispostos sobre um filme composto.

Para o melhor aproveitamento da energia solar, os painéis fotovoltaicos devem ser instalados com uma inclinação que apresente valor próximo ao da latitude do local de instalação, e com orientação solar norte, para painéis localizados do hemisfério sul (PORTAL ENERGIA, 2018). Assim, os valores ideais para ângulo de inclinação e ângulo azimutal, dos módulos fotovoltaicos estudados seriam, respectivamente, 29° e 0°. Considerando a edificação estudada, os módulos foram instalados com 20° de inclinação e o ângulo azimutal, obtido com auxílio do *software* Google Earth PRO, é de 260°, como indica a figura 28.

Figura 28 – Ângulo Azimutal



Fonte: Google Earth PRO (2020)

Cada módulo é composto por 72 células monocristalinas, com possibilidade de operação na faixa de temperatura entre  $-40^{\circ}\text{C}$  e  $+85^{\circ}\text{C}$ , possuindo uma eficiência de 18,8%, com uma taxa de desempenho, garantida pelo fabricante, de 97% da potência nominal, no primeiro ano de funcionamento. É prevista uma redução máxima de 0,6% de potência, ao ano.

Figura 29 – Inversor instalado



Fonte: autor (2020)

O inversor utilizado é do modelo REFUone 3K-2T, da marca REFUsol. O inversor apresenta tensão máxima de entrada de 600 V, máxima corrente de entrada, de 11 A, e máxima corrente de curto de entrada, de 13,2 A. A tensão nominal de saída é 220 V, a corrente nominal de saída é 13,7 A, a frequência nominal de saída é de 50 Hz/60 Hz e a potência nominal de saída é de 3000 W. A faixa de voltagem do MPPT vai de 90 V a 580 V, e a faixa de temperatura de operação vai de -25°C até +65°C, com o inversor apresentando uma eficiência máxima de 98%.

Os demais itens do sistema são: a estrutura de fixação; cabos elétricos com proteção UV, para interligação dos módulos; cabos solares, de seção 4 mm<sup>2</sup>, utilizados para ligação entre painel solar e inversor; cabos e fios de cobre, para demais ligações, disjuntores CA e CC; fusíveis de proteção; conectores; e terminais elétricos.

#### 4.2 GERAÇÃO DE ENERGIA: PROCEDIMENTOS PARA ESTIMATIVAS E RESULTADOS

Para o cálculo da energia total gerada pelos painéis, foi utilizada a seguinte fórmula (cujos resultados são baseados nas condições padrões de teste; 1000 W/m<sup>2</sup>; AM 1,5; temperatura 25°C; velocidade do vento 1 m/s):

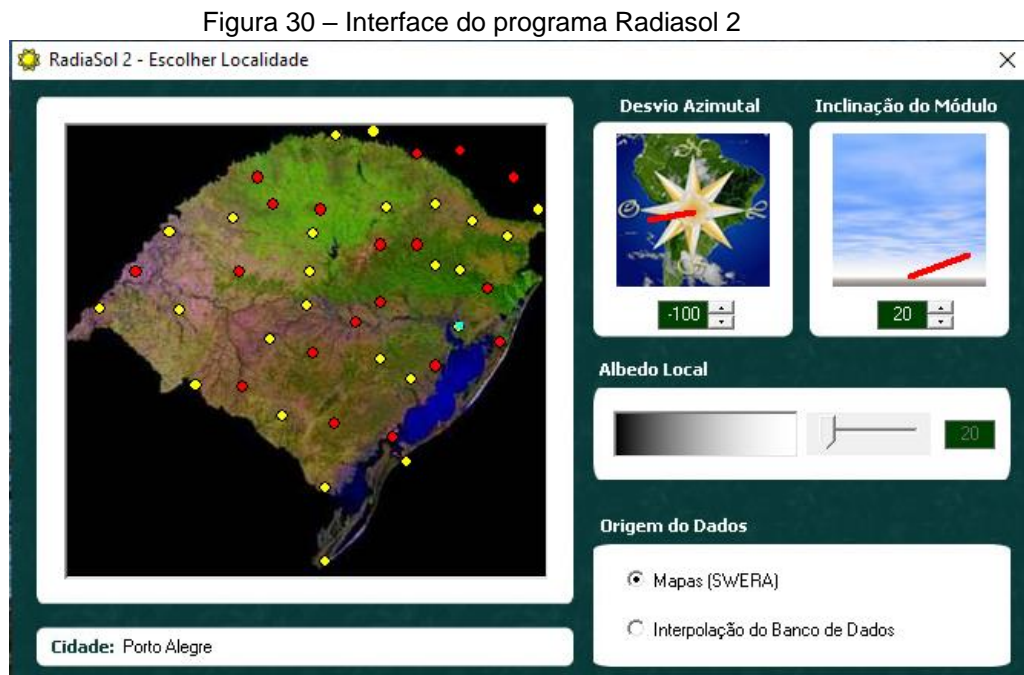
$$E = A \times r \times H \times PR \quad (5)$$

Onde:

- E = energia
- A = área total dos painéis fotovoltaicos
- r = eficiência do painel fotovoltaico
- H = irradiação solar anual média
- PR = taxa de desempenho

A irradiação média da localidade foi obtida com auxílio do *software* Radiasol 2, desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Neste programa, pode-se simular com maior precisão a radiação local

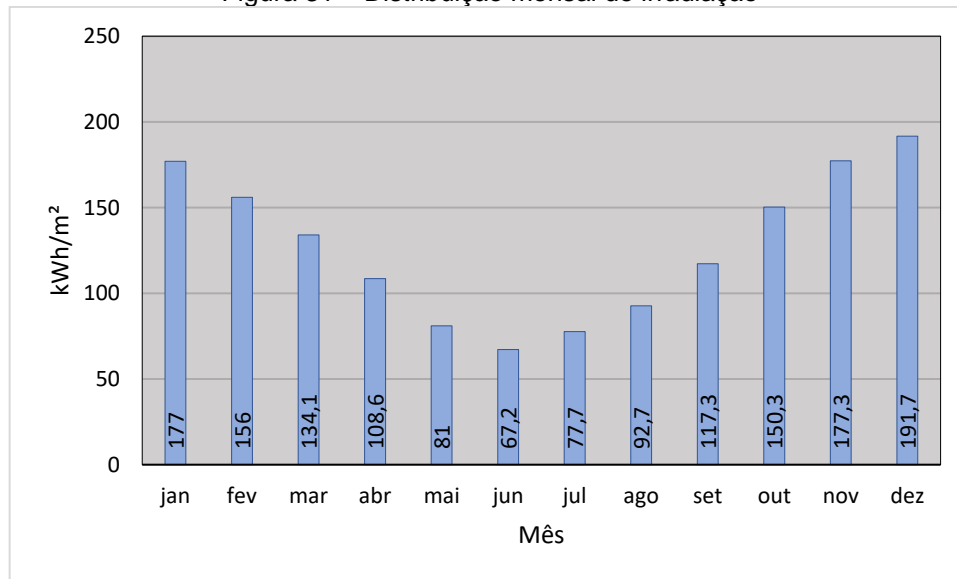
que atinge os painéis solares, pois, são considerados fatores como ângulo azimutal, inclinação de instalação dos módulos fotovoltaicos e condições climáticas locais. No banco de dados do programa não consta a cidade de Feliz, portanto, foram utilizados os dados de radiação solar da cidade de Porto Alegre. Devido à proximidade, existe pouca divergência entre os dados de radiação das duas localidades.



Fonte: RadiaSol 2 (2020)

A irradiação global inclinada anual, obtida com auxílio do programa RadiaSol 2, é de 1.530,9 kWh/m<sup>2</sup>, e está distribuída ao longo dos meses do ano, conforme indicado na figura 31.

Figura 31 – Distribuição mensal de irradiação



Fonte: autor (2020)

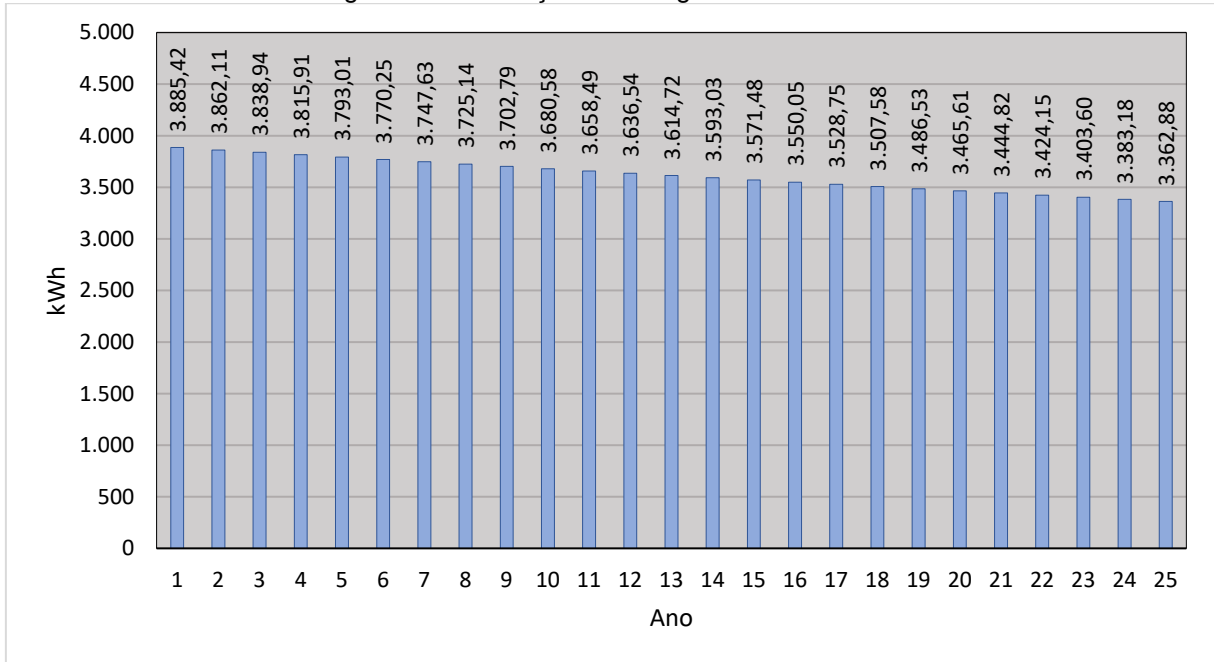
A área e a eficiência dos painéis instalados são de 18 m<sup>2</sup> e 18,8%, respectivamente. A taxa de desempenho, que considera diversas perdas (por calor, sujidade, sombreamento, entre outras), é definida, em 75% (INTERNATIOANL ENERGY AGENCY, 2019), como valor padrão para painéis instalados em telhados, ou seja, 25% da potência nominal é perdida. Substituindo os valores na equação 6, obtém-se:

$$E = 18 \times 0,188 \times 1530,9 \times 0,75 = 3.885,42 \text{ kWh}$$

(6)

O valor 3.885,42 kWh é teórico, para o primeiro ano de funcionamento. Caso seja considerada uma perda de 0,6% de capacidade, a cada ano, segundo a taxa de desempenho indicada pela fabricante dos painéis, chega-se à estimativa da produção de energia anual, ao longo de 25 anos de vida útil, ilustrada na figura 32, a seguir.

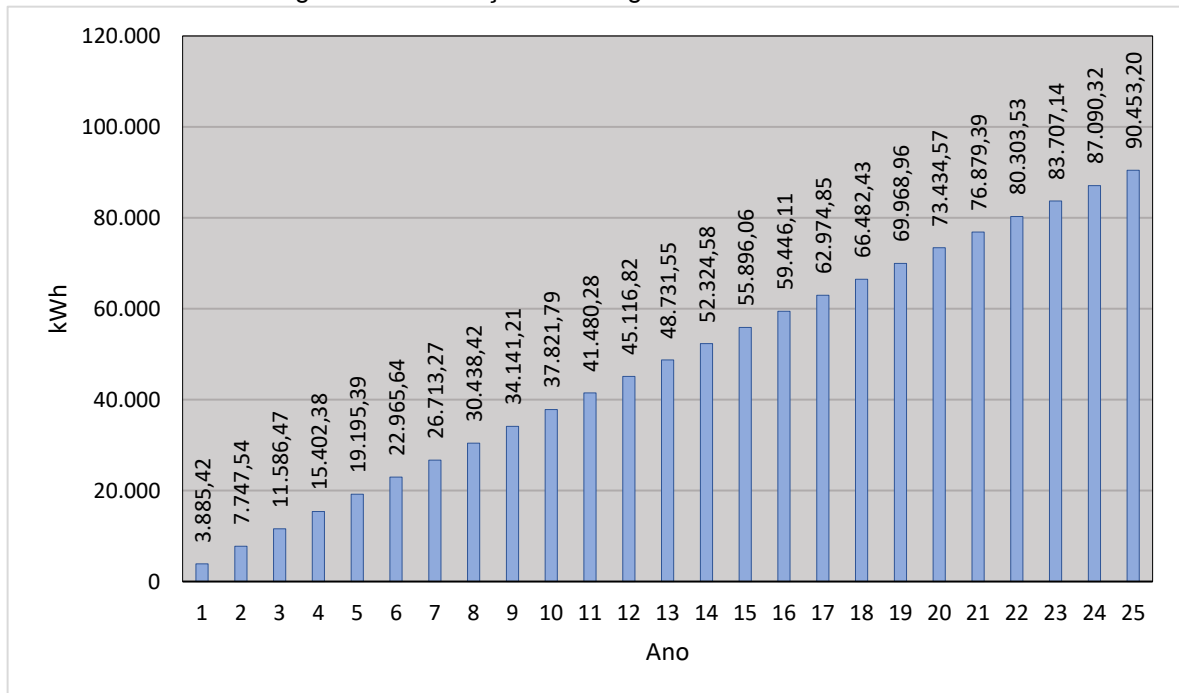
Figura 32 – Produção de energia anual estimada



Fonte: autor (2020)

Com esses dados, pode-se chegar a uma estimativa da produção de energia acumulada, durante os 25 anos de vida útil, ilustrada na figura 33.

Figura 33 – Produção de energia acumulada estimada



Fonte: autor (2020)

#### 4.3 IMPACTOS DO CICLO DE VIDA: PROCEDIMENTOS PARA ESTIMATIVAS E RESULTADOS

Os dados apresentados neste estudo foram obtidos no estudo realizado por Leite e Silva (2018), que utilizaram a base de dados Ecoinvent 3.4. O estudo de Leite e Silva consiste na avaliação do ciclo de vida de um sistema fotovoltaico, instalado no município de Feliz/RS. No estudo é feita a identificação dos impactos ambientais gerados, desde a produção do sistema até a fase de uso, considerando um conjunto de painéis com vida útil de 25 anos.

Por se tratar de um estudo semelhante sobre o ciclo de vida de sistemas fotovoltaicos, realizado na mesma localidade, o município de Feliz, e tendo como objeto de estudo módulos fabricados na China, é possível a criação de paralelos entre os dois estudos.

No quadro 2, a seguir, é identificada a energia consumida em cada uma das etapas do ciclo de vida do sistema fotovoltaico, desde a sua fabricação, até a instalação.

Quadro 2 – Energia elétrica consumida por etapa do ciclo de vida do sistema fotovoltaico composto por dez módulos

<b>Etapa do processo</b>	<b>Total</b>
Produção do silício metalúrgico	1.979,73 kWh
Produção do silício solar	4.810,25 kWh
Fusão do silício	1.027,13 kWh
Produção dos <i>wafers</i>	3.779,48 kWh
Produção das células	1.617,96 kWh
Produção do painel	3.065,03 kWh
Produção do inversor	1.236,19 kWh
Instalação elétrica	485,39 kWh
Transporte marítimo	139,98 kWh
Transporte rodoviário	36,36 kWh

Fonte: adaptado de Leite e Silva (2018)

Nota-se, primeiramente, que a produção do silício de grau solar, e a produção dos *wafers*, são as etapas do processo que mais consomem energia. Em seguida, somando-se os valores de energia referentes à fabricação dos painéis, considerando todas as etapas compreendidas entre a produção do silício metalúrgico e a produção/montagem do painel, tem-se quase 90% da energia total gasta no ciclo de vida.

No quadro 3, a seguir, elenca-se a quantidade total de energia utilizada, e uma classificação, por categoria de energia. Neste quadro, fica evidente o impacto causado pelo gasto energético, uma vez que 84% do total é proveniente de fontes não renováveis.

Quadro 3 – Energia total para produção e instalação do sistema fotovoltaico, considerando painéis produzidos na China

Categoria de energia		Total
Fóssil	Não renováveis	14.262,06 kWh
Biomassa		0,61 kWh
Nuclear		1.465,33 kWh
<b>Total parcial</b>		<b>15.728,00 kWh</b>
Biomassa	Renováveis	297,24 kWh
Hidro		255,85 kWh
Eólica, solar e geotérmica		136,24 kWh
<b>Total parcial</b>		<b>2.991,32 kWh</b>
<b>Total</b>		<b>18.719,32 kWh</b>

Fonte: adaptado de Leite e Silva (2018)

Para o cenário de transporte, representado no quadro 4, foram estimadas as distâncias aproximadas a serem percorridas e o modal de transporte utilizado, desde o local onde se situa a indústria de produção dos módulos fotovoltaicos, até o local de sua instalação. A etapa do transporte da matéria-prima, do local de extração para o local de produção, não foi considerada, devido à dificuldade de encontrar informações a respeito. Para este estudo, considerou-se um endereço para a indústria de manufatura, admitindo-se que esta tenha ocorrido na Q Cells, na China.



Quadro 4 – Cenário de transporte considerado

Trajetos	Tipo de Transporte	Pontos de Partida e Chegada	Distância (km)
Indústria China – Porto China	Rodoviário	Partida: Hanwha Q Cells Technology Co., Ltd., 66 Dapu Road, Lianyungang, Jiangsu, China	500
		Chegada: Shanghai International Port Co., Ltd., 825 Gangjan Rd, Pudong, Xinqu, Shanghai Shi, China	
Porto China – Porto Brasil	Marítimo	Partida: Shanghai International Port Co., Ltd., 825 Gangjan Rd, Pudong, Xinqu, Shanghai Shi, China	21.500
		Chegada: Av. Honório Bicalho, s/n, CP 198, Rio Grande, RS, Brasil, CEP 96201-020	
Porto Brasil – Local de instalação	Rodoviário	Partida: Av. Honório Bicalho, s/n, CP 198, Rio Grande, RS, Brasil, CEP 96201-020	395
		Chegada: Feliz, RS, Brasil, CEP 95770-000	

Fonte: adaptado de Leite e Silva (2018)

Quanto à liberação direta de gases de efeito estufa, o trabalho de Leite e Silva (2018) estima que, durante todo ciclo, seriam liberados, cerca de 3.773,2 kg de  $CO_2eq$ . Mesmo que se considere tais distâncias extremas, já que é considerada a localização da indústria no extremo diametralmente oposto do planeta, ainda assim, a etapa de transporte é a etapa de menor liberação de gases poluentes.

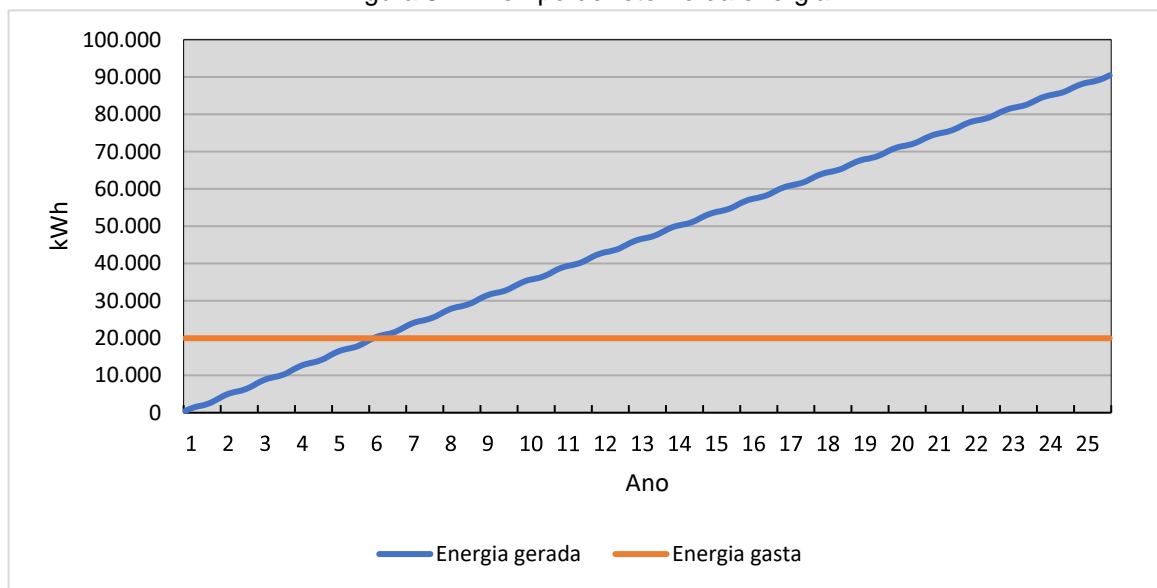
#### 4.4 TEMPO DE RETORNO DA ENERGIA: PROCEDIMENTOS PARA ESTIMATIVAS E RESULTADOS

A quantidade total de energia gasta no ciclo de vida foi calculada como sendo 18.719,32 kWh, como referido anteriormente. Entretanto, como o inversor possui uma vida útil inferior à do sistema fotovoltaico (a vida útil do inversor é de 15 anos; a do sistema fotovoltaico foi considerada como sendo 25 anos), ele deverá ser trocado. Logo, a quantidade de energia consumida na produção de um segundo inversor deve ser somada ao total. Como a produção de um inversor requer o consumo de 1.236,19 kWh, soma-se esse valor à quantidade de energia anteriormente consumida, que

considera apenas um inversor para o sistema fotovoltaico (18.719,32 kWh), obtendo-se um novo valor total: 19.955,51 kWh.

Assim, com base nos dados obtidos anteriormente – referentes à energia empregada para a produção, transporte e instalação, dos componentes do sistema fotovoltaico, e comparando-os à estimativa de eletricidade, a cada ano gerada, foi elaborada a figura 34, a seguir.

Figura 34 – Tempo de retorno da energia



Fonte: autor (2020)

Como se pode observar na figura 34, as retas identificando a energia gerada com a energia consumida se cruzam no sexto ano; isto é o que corresponde a cerca de um quarto da vida útil das placas solares. Nesse momento, o sistema terá produzido apenas a energia equivalente àquela consumida desde o início de sua fabricação do sistema fotovoltaico, até a sua instalação no telhado da residência estudada.

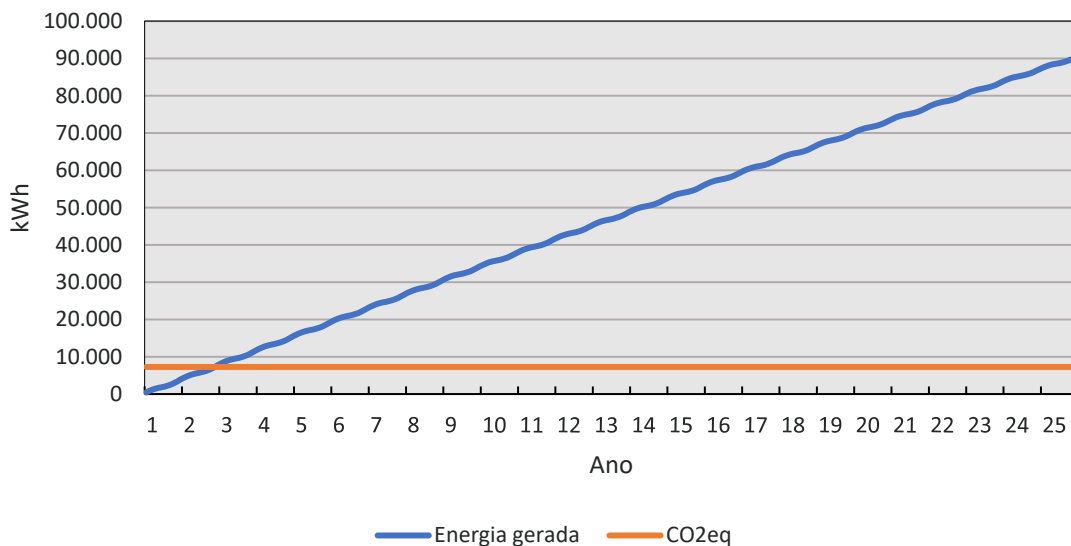
#### 4.5 TEMPO DE RETORNO DO DIÓXIDO DE CARBONO EQUIVALENTE: PROCEDIMENTOS PARA ESTIMATIVAS E RESULTADOS

Considerando a localização dos painéis instalados, de acordo com os valores indicados anteriormente, a geração de 1 kWh resulta na produção de 0,539 kg de

dióxido de carbono equivalente. Conforme já referido, estima-se como necessário a troca do inversor, após 15 anos de sua instalação junto ao sistema fotovoltaico.

Segundo Leite e Silva (2018), são emitidos, diretamente, 145,45 kg de  $CO_2eq$ , associados à etapa de produção de um inversor. Soma-se, então, a quantidade de dióxido de carbono, emitida na fabricação de um segundo inversor, com a quantidade total inicial, emitida durante o ciclo de vida sistema fotovoltaico (3.773,2 kg), que considera apenas um inversor. Assim, obtém-se um total final de 3.918,65 kg de  $CO_2eq$  emitidos diretamente. Agora, convertendo esse valor final, de quilograma para quilowatt-hora, utilizando o fator de emissão de rede, mencionado anteriormente, de 0,539  $kgCO_2/kWh$ , tem-se 7.270,6 kWh. A figura 35 demonstra o tempo de retorno de  $CO_2eq$ .

Figura 35 – Tempo de retorno do  $CO_2eq$



Fonte: autor (2020)

Como se pode observar na figura 35, as retas se interseccionam ao final do segundo ano de funcionamento do sistema. Isso significa que o sistema produziu, nesse tempo, uma quantidade de energia limpa equivalente a todo o dióxido de carbono equivalente liberado diretamente em seu ciclo de vida. Nulificando, assim, sua pegada de carbono.

#### 4.6 RETORNO FINANCEIRO: PROCEDIMENTOS PARA ESTIMATIVAS E RESULTADOS

Para calcular o tempo de retorno do investimento, foram considerados: o custo de compra e instalação do sistema fotovoltaico (R\$ 19.228,00); o custo do inversor, de mesmo modelo, a ser substituído após o fim da sua vida útil (R\$5.279,00); e o preço do quilowatt-hora (R\$ 0,734). Chegou-se a esse preço do quilowatt-hora, considerando o seu valor médio, ao longo do período de operação do sistema fotovoltaico, até o momento da elaboração deste estudo, outubro de 2019 a agosto de 2020. Dessa maneira foi identificado o valor de R\$ 0,315, para a tarifa de energia (TE), e, de R\$ 0,419/kwh, para a tarifa de uso do sistema de distribuição (TUSD).

Segundo dados da ANEEL (2020), no período entre 2010 e 2020, o custo da energia elétrica distribuída pela concessionária local, RGE Sul, teve um aumento de, em média, 1% ao ano. Esse aumento anual foi considerado para os cálculos.

O valor economizado, a cada ano (admitindo-se os preços de energia como invariáveis ao longo do período analisado), com a geração de eletricidade por meio do sistema fotovoltaico, está elencado no quadro 5, a seguir.

Quadro 5 – Economia anual estimada, com o emprego de sistema fotovoltaico

<b>Ano</b>	<b>Economia</b>	<b>Ano</b>	<b>Economia</b>
1	R\$ 2.851,90	14	R\$ 3.001,48
2	R\$ 2.863,14	15	R\$ 3.013,31
3	R\$ 2.874,42	16	R\$ 3.025,18
4	R\$ 2.885,74	17	R\$ 3.037,10
5	R\$ 2.897,11	18	R\$ 3.049,06
6	R\$ 2.908,53	19	R\$ 3.061,08
7	R\$ 2.919,99	20	R\$ 3.073,14
8	R\$ 2.931,49	21	R\$ 3.085,25
9	R\$ 2.943,04	22	R\$ 3.097,40
10	R\$ 2.954,64	23	R\$ 3.109,60
11	R\$ 2.966,28	24	R\$ 3.121,86
12	R\$ 2.977,97	25	R\$ 3.134,016
13	R\$2.989,70		

Fonte: autor (2020)

Esses valores serviram de referência, como fluxo de caixa, para o cálculo do VPL e do *payback* descontado, a seguir analisado.

#### 4.6.1 Valor presente líquido

Utilizando a equação 4, com o fluxo de caixa e o investimento inicial, tem-se o seguinte VPL.

Quadro 6 – Valor presente líquido

Ano	VPL acumulado	Ano	VPL acumulado
0	- R\$ 19.228,00	13	R\$ 7.478,34
1	- R\$ 16.522,21	14	R\$ 8.915,71
2	- R\$ 13.944,93	15	R\$ 7.886,29
3	- R\$ 11.490,07	16	R\$ 9.190,36
4	- R\$ 9.151,79	17	R\$ 10.432,49
5	- R\$ 6.924,52	18	R\$ 11.615,63
6	- R\$ 4.803,14	19	R\$ 12.742,58
7	- R\$ 2.782,48	20	R\$ 13.816,00
8	- R\$ 857,76	21	R\$ 14.838,43
9	R\$ 975,53	22	R\$ 15.812,31
10	R\$ 2.721,75	23	R\$ 16.739,93
11	R\$ 4.385,03	24	R\$ 17.623,50
12	R\$ 5.969,31	25	R\$ 18.465,10

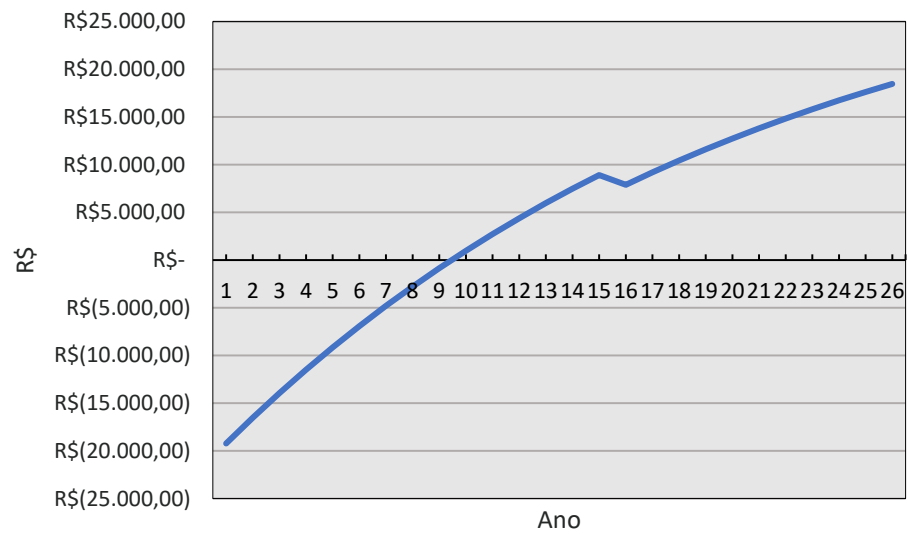
Fonte: autor (2020)

Verificou-se que, com o VPL positivo, o que, ao final dos 25 anos, levaria ao valor de R\$ 18.465,10, o projeto seria viável.

#### 4.6.2 *Payback* descontado

A figura 36, a seguir, considera os custos e o fluxo de caixa anual, referidos anteriormente, o que permite chegar ao *payback* descontado.

Figura 36 – Payback descontado



Fonte: autor (2020)

A figura precedente, permite verificar que o retorno do investimento ocorreria no nono ano. Mesmo descontando-se deste, o custo requerido pela compra de um novo inversor, o lucro estimado associado ao emprego de painéis solares, até a data acima referida, seria suficiente para compensá-lo. O tempo de *payback*, portanto, seria de 9,53 anos.

## 5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, foi possível chegar à conclusão de que o investimento em um sistema solar fotovoltaico resultou positivo, tanto na esfera ambiental, quanto em termos financeiros, indo ao encontro dos resultados de outros estudos semelhantes

O estudo realizado permitiu perceber que, em um curto período o sistema fotovoltaico alcança um saldo positivo, tanto em termos de energia gerada, quanto no concernente a gases de efeito estufa gerados diretamente no processo de produção, nas etapas de manufatura, transporte, instalação e operação.

Quanto ao aspecto financeiro, comprovou-se que o investimento inicial é elevado, fazendo com que este se constitua no maior impedimento para a aplicação mais ampla desse sistema em nosso país. Todavia, como foi verificado, o retorno do dinheiro investido ocorre em um prazo relativamente reduzido (inferior à metade do tempo estimado de vida útil do sistema), que faz com que, no longo prazo, o saldo positivo seja ainda mais substancial. Cabe ressaltar que, a instalação não foi feita respeitando o ângulo de inclinação e orientação solar ideais. Fosse este o caso, em condições ideais de instalação, o resultado seria melhor, com tempos de retorno ainda menores.

Entende-se que a ampliação dos investimentos nessa área deverá contribuir para o surgimento de novas tecnologias, que promoverão, ainda mais o aproveitamento da energia solar. Em paralelo, tais investimentos, uma vez realizados, deverão promover benefícios adicionais, como a diminuição do custo do sistema fotovoltaico, facilitando, assim, o acesso mais amplo a essa opção de geração de energia elétrica.

Diante das crises sendo enfrentadas pelo planeta, especialmente aquelas associadas ao aquecimento global, que requerem ações no sentido da priorização de uso de energias limpas, a utilização do grande potencial solar se mostra, de fato, uma ótima alternativa. Os sistemas fotovoltaicos, oferecem um potencial incomparável para o aproveitamento da imensa quantidade de energia solar incidente diariamente sobre nosso planeta, que, ademais, constitui uma das raras formas disponíveis de energia limpa, são um excelente meio de se proporcionar um futuro mais verde.



## REFERÊNCIAS

- ALI, H. A. Al-W., et al. **Photovoltaic/Thermal (PV/T) Systems: principles, design, and applications**. Suíça: Springer, 2019
- ANEEL. **Resolução Normativa n° 482**. Brasília: ANEEL, 2012.
- ANEEL. **Resolução Normativa n° 687**. Brasília: ANEEL, 2015.
- ANEEL. **Relatório Evolução das Tarifas Residenciais**. 2020. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/relatorio-evolucao-tarifas-residenciais>. Acesso em: 13 nov. 2020
- BANCO CENTRAL. **Taxas de juros básicas – histórico**. 2020. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>. Acesso em: 14 jul. 2020
- BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE. **Latin America Hit a New Clean Energy Investment Record, 2019**. 2019. Disponível em: <https://about.bnef.com/blog/latin-america-hit-new-clean-energy-investment-record-2019/>. Acesso em: 07 mai. 2020
- BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE. **Clean Energy Investment Trends, 2019**. 2020. Disponível em <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BloombergNEF-Clean-Energy-Investment-Trends-2019.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2020
- BRITO, S. **Teoria Eletromagnética: eletrostática**. 2014. Disponível em: <https://www.slideshare.net/samara.brito/seminario-teoria-eletromagnética-eletrostática/4>. Acesso em: 09 mai. 2020
- CARNEIRO, J. **Módulos Fotovoltaicos Características e Associações**. 2010. 18f. Monografia de apoio às aulas teóricas da UC de Electromagnetismo B do Mestrado Integrado em Engenharia Civil – Universidade do Minho, Portugal. 2010.
- CARVALHO M. **Life Cycle Analysis as a Decision Criterion for the Implementation of Solar Photovoltaic Panels in as Northeast Brazil Hospital**. Suíça: Springer, 2016
- CHINA ENERGY PORTAL. **Tracking China’s transition to sustainable energy**. 2020. Disponível em: <https://chinaenergyportal.org/en/2019-electricity-other-energy-statistics-preliminary/>. Acesso em: 12 nov. 2020
- CIÊNCIA E NEGÓCIOS. **O que é TMA (Taxa Mínima de Atratividade)?**. 2017 Disponível em: <https://cienciaenegocios.com/o-que-e-tma-taxa-minima-de-atratividade/>. Acesso em: 12 nov. 2020
- CLIMATE CHANGE CONNECTION. **CO2 Equivalentents**. 2020 Disponível em: <https://climatechangeconnection.org/emissions/co2-equivalentents/> Acesso em: 12 nov. 2020

DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR SONNENENERGIE. **Planning and Installing Photovoltaic Systems**. 2. Ed. Reino Unido: Earthscan, 2008.

ECO FORTIS. **Solar Panel Cleaning**. 2020. Disponível em: <http://www.ecofortis.co.uk/renewables/solar-power/solar-panel-cleaning/>. Acesso em: 17 jul. 2020

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2019 – Ano base 2018**. 2019. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>. Acesso em: 03 mai. 2020.

ENFITEC JUNIOR. **Entenda: Diodo Emissor de Luz (LED)**. 2018. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/enfitecjunior/2018/04/19/diodo-emissor-de-luz-led/>. Acesso em: 08 mai. 2020

FREUNDLICH, A. et al. **Photovoltaic Solar Energy: from fundamentals to applications**. 1.Ed. Reino Unido: Wiley, 2017.

FRISCHKNECHT, R. et al. **Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems**. 2015. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/324727414\\_Task\\_12\\_Life\\_Cycle\\_Inventories\\_and\\_Life\\_Cycle\\_Assessments\\_of\\_Photovoltaic\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/324727414_Task_12_Life_Cycle_Inventories_and_Life_Cycle_Assessments_of_Photovoltaic_Systems). Acesso em: 09 abr. 2020

GLOBAL SOLAR ATLAS. **Global Solar Atlas Map**. 2020. Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/map>. Acesso em: 12 mai. 2020.

GOOGLE EARTH PRO. Software de pesquisa e visualização de mapas e imagens de satélite. Disponível em: <https://www.google.com/earth/>. Acesso em: 18 set. 2020

GUIAINVEST. **Quais os Riscos do Tesouro Direto?**. 2017 Disponível em: <https://site.guiainvest.com.br/riscos-do-tesouro-direto/#:~:text=Existem%20dois%20riscos%20do%20Tesouro,que%20envolve%20to da%20a%20sociedade>. Acesso em: 12 nov. 2020

HOU, G., et al. **Life cycle assessment of grid-connected photovoltaic power generation from crystalline silicon solar modules in China**. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.023>. Acesso em: 10 jun. 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity**. 2011. Disponível em: [https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/rep12\\_11.pdf](https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/rep12_11.pdf). Acesso em: 20 mai. 2020

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Investment 2019**. 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/wei2019/>. Acesso em: 07 mai. 2020

IBGE. **Censo**. 2019. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/feliz/panorama>. Acesso em: 25 abr. 2020

- INSTITUTE FOR GLOBAL ENVIRONMENTAL STRATEGIES. **List of Grid Emission Factors**. 2020. Disponível em <https://www.iges.or.jp/en/pub/list-grid-emission-factor/en>. Acesso em: 12 jul. 2020
- ITO, M. **Life Cycle Assessment of PV Systems**. 2011. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/crystalline-silicon-properties-and-uses/life-cycle-assessment-of-pv-systems>. Acesso em: 11 jun. 2020
- KRAUTER, S. C. W. **Solar Electric Power Generation: Photovoltaic Energy Systems**. Países Baixos: Springer, 2006
- LEITE, B. L. F.; SILVA, J. L. **Avaliação do Ciclo de Vida de sistema de produção energética por painel fotovoltaico**. Relatório produzido para a disciplina de Introdução ao ACV, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura – UFRGS, Porto Alegre, 2018
- MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. **Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão**. 2014. Disponível em: <http://static.sites.s bq.org.br/rvq.s bq.org.br/pdf/v7n1a08.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2020
- MACROTRENDS. **Brazil Carbon (CO<sub>2</sub>) Emissions 1960-2020**. 2020. Disponível em: <https://www.macrotrends.net/countries/BRA/brazil/carbon-co2-emissions>. Acesso: 12 nov. 2020
- MUNDO DA ELÉTRICA. **O que é um diodo?** 2017. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-e-um-diodo/>. Acesso em: 09 abr. 2020
- PAVLOVIC, T. **The Sun and Photovoltaic Technologies**. 1. Ed. Suíça: Springer, 2020
- PHILLIPS, S., WARMUTH, W. **Photovoltaics Report**. 2020. Disponível em: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2020.
- PINHO, J.T; GALDINO, M. A. **Manual De Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, 2014.
- PORTAL ENERGIA. **Como saber a inclinação do painel solar fotovoltaico?**. 2018. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/como-saber-inclinacao-painel-solar-fotovoltaico/>. Acesso em: 12 nov. 2020
- PV-TECH. **Top 10 solar cell producers of 2018**. 2019. Disponível em: <https://www.pv-tech.org/editors-blog/top-10-solar-cell-producers-of-2018>. Acesso: 23 abr. 2020
- RADIASOL 2. Software para geração de dados horários de radiação solar. Porto Alegre, 2020. Disponível em: <http://www.solar.ufrgs.br/#softwares>. Acesso: 19 ago. 2020

REES, M. **Enciclopédia Ilustrada do Universo: o Sistema Solar**. 1 Ed. São Paulo: Duetto Editorial, 2012.

REMMERS, K. H. **Inverter, Storage and PV System Technology: Industry Guide 2013**. 2013. Disponível em: <https://fddocuments.in/document/inverter-storage-and-pv-system-technology-industry-guide-2013.html>. Acesso em: 21 abr. 2020

RÜTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas interligada à rede elétrica pública no Brasil**. Florianópolis: UFSC/LABSOLAR, 2004.

SEBRAE. **Pensamento do ciclo de vida: negócios conscientes à caminho da sustentabilidade**. 2017. Disponível em: [https://www.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/UFs/AP/Anexos/Sebrae\\_Ciclo\\_de\\_Vida.pdf](https://www.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/UFs/AP/Anexos/Sebrae_Ciclo_de_Vida.pdf). Acesso em: 18 nov 2020

SOLSTÍCIO ENERGIA. **Como funciona uma célula fotovoltaica?** 2017. Disponível em <https://www.solsticioenergia.com/2017/08/17/como-funciona-celula-fotovoltaica/> Acesso em: 09 jun. 2020

WR PRATES. **O que é VPL (Valor Presente Líquido)?** 2016a. Disponível em: <https://www.wrprates.com/o-que-e-vpl-valor-presente-liquido/>. Acesso em: 13 ago. 2020


WR PRATES. **Qual a diferença entre payback simples e descontado?** 2016b. Disponível em: [https://www.wrprates.com/qual-e-a-diferenca-entre-payback-simples-e-descontado/#O\\_que\\_e\\_payback\\_descontado](https://www.wrprates.com/qual-e-a-diferenca-entre-payback-simples-e-descontado/#O_que_e_payback_descontado). Acesso em: 13 ago. 2020

## **ANEXO A – ORÇAMENTO DO INVERSOR**



BLOG | FINANCIAMENTO ENERGIA SOLAR | CALCULADORA SOLAR | CAMPANHAS | PARCEIROS | VENDA DIRETA | CURSOS E TREINAMENTOS

ENERGIA SOLAR | INFORMÁTICA | DRONES

HOME / INVERSOR SOLAR FOTOVOLTAICO REFUSOL (45942-3)



**REFUSOL**  
ENGINEERED  
MADE IN  
GERMANY  
REFUSOL



Código: 45942-3

**INVERSOR SOLAR FOTOVOLTAICO REFUSOL (45942-3)**  
801P003200 3KW MONOFASICO 220V 2MPPT MONITORAMENTO

**R\$ 5.279,00**

PREÇO SUGERIDO AO CONSUMIDOR FINAL

1 [COMPRAR](#)

Múltiplo: 1 UNIDADE(S)  
Origem: 1-IMPORTAÇÃO DIRETA

## **ANEXO B – FICHA TÉCNICA DO PAINEL FOTOVOLTAICO**



The **Q.ANTUM** solar module **Q.PEAK L-G5.O.G** with power classes up to 370Wp is the strongest module of its type on the market globally. Powered by 72 **Q.ANTUM** solar cells **Q.PEAK L-G5.O.G** was specially designed for large solar power plants to reduce BOS costs. Only **Q CELLS** offers German engineering quality with our unique **Q CELLS** Yield Security.



#### LOW ELECTRICITY GENERATION COSTS

Higher yield per surface area and lower BOS costs thanks to higher power classes and an efficiency rate of up to 19.3%.



#### INNOVATIVE ALL-WEATHER TECHNOLOGY

Optimal yields, whatever the weather with excellent low-light and temperature behavior.



#### ENDURING HIGH PERFORMANCE

Long-term yield security with Anti LID Technology, Anti PID Technology<sup>1</sup>, Hot-Spot Protect and Traceable Quality Tra.Q™.



#### EXTREME WEATHER RATING

High-tech aluminum alloy frame, certified for high snow (5400 Pa) and wind loads (2400 Pa).



#### A RELIABLE INVESTMENT

Inclusive 12-year product warranty and 25-year linear performance warranty<sup>2</sup>.



#### THE IDEAL SOLUTION FOR:



Ground-mounted solar power plants

Engineered in **Germany**

**Q CELLS**

<sup>1</sup> APT test conditions according to IEC/TS 62804-1:2015, method B (-1500 V, 168 h)

<sup>2</sup> See data sheet on rear for further information.



**MECHANICAL SPECIFICATION**

<b>Format</b>	1960 mm × 991 mm × 35 mm (including frame)
<b>Weight</b>	22.5 kg ± 5 %
<b>Front Cover</b>	3.2 mm thermally pre-stressed glass with anti-reflection technology
<b>Back Cover</b>	Composite film
<b>Frame</b>	Anodised aluminium
<b>Cell</b>	6 × 12 monocrystalline Q.ANTUM solar cells
<b>Junction box</b>	66-77 × 90-115 × 15-20 mm, Protection class ≥ IP67, with bypass diodes
<b>Cable</b>	4 mm <sup>2</sup> Solar cable; (+) ≥ 1200 mm, (-) ≥ 1200 mm
<b>Connector</b>	Intermateable connector with H4, MC4, IP67 or IP68

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

POWER CLASS		355	360	365	370	
<b>MINIMUM PERFORMANCE AT STANDARD TEST CONDITIONS, STC<sup>1</sup> (POWER TOLERANCE +5W / -0W)</b>						
<b>Minimum</b>	<b>Power at MPP<sup>2</sup></b>	<b>P<sub>MPP</sub></b>	355	360	365	370
	<b>Short Circuit Current*</b>	<b>I<sub>SC</sub></b>	9.63	9.69	9.75	9.81
	<b>Open Circuit Voltage*</b>	<b>V<sub>OC</sub></b>	47.58	47.87	48.16	48.45
	<b>Current at MPP*</b>	<b>I<sub>MPP</sub></b>	9.12	9.19	9.27	9.35
	<b>Voltage at MPP*</b>	<b>V<sub>MPP</sub></b>	38.94	39.16	39.38	39.59
	<b>Efficiency<sup>2</sup></b>	<b>η</b>	≥ 18.3	≥ 18.5	≥ 18.8	≥ 19.0
<b>MINIMUM PERFORMANCE AT NORMAL OPERATING CONDITIONS, NOC<sup>3</sup></b>						
<b>Minimum</b>	<b>Power at MPP<sup>2</sup></b>	<b>P<sub>MPP</sub></b>	262.7	266.4	270.1	273.8
	<b>Short Circuit Current*</b>	<b>I<sub>SC</sub></b>	7.77	7.81	7.86	7.91
	<b>Open Circuit Voltage*</b>	<b>V<sub>OC</sub></b>	44.51	44.78	45.05	45.32
	<b>Current at MPP*</b>	<b>I<sub>MPP</sub></b>	7.16	7.23	7.29	7.36
	<b>Voltage at MPP*</b>	<b>V<sub>MPP</sub></b>	36.68	36.86	37.04	37.22

<sup>1</sup>1000 W/m<sup>2</sup>, 25 °C, spectrum AM 1.5 G    <sup>2</sup>Measurement tolerances STC ±3%; NOC ±5%    <sup>3</sup>800 W/m<sup>2</sup>, NOCT, spectrum AM 1.5 G    \* typical values, actual values may differ

**Q CELLS PERFORMANCE WARRANTY**

At least 97 % of nominal power during first year. Thereafter max. 0.6 % degradation per year.  
 At least 92 % of nominal power up to 10 years.  
 At least 83 % of nominal power up to 25 years.

All data within measurement tolerances. Full warranties in accordance with the warranty terms of the Q CELLS sales organisation of your respective country.

**PERFORMANCE AT LOW IRRADIANCE**

Typical module performance under low irradiance conditions in comparison to STC conditions (25 °C, 1000 W/m<sup>2</sup>).

**TEMPERATURE COEFFICIENTS**

<b>Temperature Coefficient of I<sub>SC</sub></b>	<b>α</b>	<b>[%/K]</b>	+0.04	<b>Temperature Coefficient of V<sub>OC</sub></b>	<b>β</b>	<b>[%/K]</b>	-0.28
<b>Temperature Coefficient of P<sub>MPP</sub></b>	<b>γ</b>	<b>[%/K]</b>	-0.39	<b>Normal Operating Cell Temperature</b>	<b>NOCT</b>	<b>[°C]</b>	45 ± 3

**PROPERTIES FOR SYSTEM DESIGN**

<b>Maximum System Voltage</b>	<b>V<sub>sys</sub></b>	<b>[V]</b>	1500	<b>Safety Class</b>	II
<b>Maximum Reverse Current</b>	<b>I<sub>r</sub></b>	<b>[A]</b>	20	<b>Fire Rating</b>	C / TYPE 1
<b>Push/Pull Load (in accordance with IEC 61215)</b>		<b>[Pa]</b>	5400/2400	<b>Permitted Module Temperature On Continuous Duty</b>	-40 °C up to +85 °C

**QUALIFICATIONS AND CERTIFICATES**

IEC 61215 (Ed.2); IEC 61730 (Ed. 1), Application class A  
 This data sheet complies with DIN EN 50380.

**PARTNER**

**NOTE:** Installation instructions must be followed. See the installation and operating manual or contact our technical service department for further information on approved installation and use of this product.

**Hanwha Q CELLS (Qidong) Co., Ltd.**  
 No. 888 Linyang Road, Qidong City, Jiangsu Province, China | **EMAIL** sales@hanwha-qcells.com | **WEB** www.q-cells.com

Engineered in **Germany**



Specifications subject to technical changes © Hanwha Q CELLS Q.PEAK L-G5.0.G\_385-370\_2017.10\_Rev01.1EN

## **ANEXO C – FICHA TÉCNICA DO INVERSOR**

## REFUone 3K...7K-2T

Inversores de string monofásicos para uso doméstico

**REFU**sol

- Duplo rastreamento MPPT preciso
- Rastreamento por convecção natural
- Gerenciamento inteligente da rede



Devido a faixa de tensão, os inversores de string monofásicos nas classes de potência de 3 a 7,5kW são particularmente adequados para sistemas pequenos. Eles cumprem com todos os requisitos para proteção IP 65 – sua carcaça fornece proteção confiável contra poeira e água e, portanto, permite a instalação ao ar livre sem qualquer problema.

Os inversores de string são fáceis de manusear e compactos, as tampas de alumínio que não enferrujam, bem como as conexões Plug&Play permitem uma fácil instalação. A operação e o monitoramento são fáceis, com a ajuda do display gráfico, a interface RS485 integrada e a conexão WiFi/GPRS opcional.

Os inversores monofásicos atingem uma eficiência de até 98 %, mesmo com baixa irradiação. O sistema independente de duplo rastreamento MPPT é altamente e preciso com uma eficiência superior a 99,9 %. Permite uma melhor adaptação a diferentes desenhos de telhados.

Os inversores permitem um gerenciamento inteligente da rede através da capacidade de potência reativa e da possibilidade de limitar a potência de saída, quer como potência zero quer como potência ajustável para limitar a exportação.



## DADOS TÉCNICOS

REFU<sup>sol</sup>

REFUone 3K-2T      REFUone 5K-2T      REFUone 7K-2T

## ESPECIFICAÇÕES DE ENTRADA CC

Máx. potência pico STC (Wp)	4.5	7.5	11.3
Tensão CC máxima (Vcc)		600	
Tensão nominal de entrada CC (Vcc)		360	
Faixa MPPT (Vcc)		90 ... 580	
Faixa de tensão CC em potência nominal (Vcc)	160 ... 520	250 ... 520	250 ... 520
Tensão CC de start-up (Vcc)		120	
Máxima potência CC em cada MPPT (kW)	2.0 / 2.0	3.0 / 3.0	5.5 / 2.75
Número de MPPTs independentes		2	
Corrente operacional máxima CC por MPPT 1/2 (A)	11 / 11	11 / 11	22 / 11
Corrente máxima de curto-circuito ISC por MPPT 1/2 (A)	14 / 14	14 / 14	28 / 14
Nº de entradas CC por MPPT 1/2	1 / 1	1 / 1	2 / 1

## ESPECIFICAÇÕES DE SAÍDA CA

Potência CA nominal (kVA)	3.0	5.0	7.5
Conexão de rede CA		L/N/PE	
Tensão CA nominal (Vca)		220, 230, 240	
Faixa de tensão CA (Vca)		180 ... 276 [de acordo com as normas locais]	
Fator de potência nominal		1 [ajustável +/- 0.8]	
Frequência nominal (Hz)		50, 60	
Faixa de frequência (Hz)		47 ... 55, 54 ... 66 [de acordo com as normas locais]	
Faixa de ajuste de energia ativa (%)		0 ... 100	
Corrente máxima CA (A)	13.7	22.8	32.6
THD (%)		< 3	
Eficiência máxima (%)	97.6	97.8	98.2
Eficiência europeia (%)	97.2	97.3	97.6
Eficiência MPPT (%)		> 99.9	
Origem da alimentação/Perdas em stand-by (W)		50 / < 1	
Exportação de limite de potência		exportação zero ou ajustável	

## CONDIÇÕES AMBIENTAIS

Resfriamento		convecção natural	
Temperatura ambiente (°C)		-25 ... +60	
Umidade relativa do ar (%)		0 ... 100	
Ruído (dBA)		< 25	
Elevação máxima (m acima do nível do mar)		2,000	
Tipo de proteção (IEC 60529)		IP65	

## DADOS GERAIS

Topologia		sem transformador	
Exibição de status		Display LCD	
Interfaces		RS485, WiFi/GPRS (opcional), SD card	
Dimensões L x A x P (mm)	405 x 315 x 135	405 x 315 x 135	467 x 352 x 157
Peso (kg)	11.5	11.5	18.0
Certificações	INMETRO (ABNT NBR 16149:2013, ABNT NBR 16150:2013, ABNT NBR IEC 62116:2012), IEC 62116, IEC 61727, IEC 61683, IEC 60068 (1,2,14,30), IEC 62109-1/2, VDE 0126-1-1:2013		

A empresa não assume qualquer responsabilidade pelos dados fornecidos. Dados sujeitos a alterações.

REFU Elektronik GmbH | www.refu.com

20191016\_REFUone\_3K...7K-2T\_Datasheet\_POR\_V03