

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

PATRÍCIA NAZARETH VALADARES

**A ENERGIA SOLAR E OS DESAFIOS PARA SUA CONSOLIDAÇÃO
NO BRASIL E NO MUNDO**

UBERLÂNDIA
2019

PATRÍCIA NAZARETH VALADARES

**A ENERGIA SOLAR E OS DESAFIOS PARA SUA CONSOLIDAÇÃO
NO BRASIL E NO MUNDO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Química.

Professor orientador: Luiz Gustavo Martins Vieira.

UBERLÂNDIA
2019

PATRÍCIA NAZARETH VALADARES

**A ENERGIA SOLAR E OS DESAFIOS PARA SUA CONSOLIDAÇÃO
NO BRASIL E NO MUNDO**

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de Uberlândia

25 de novembro de 2019

Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira (Orientador)
FEQUI/UFU

Profa. Sarah Arvelos
FEQUI/UFU

Dayana D'Arc de Fátima Palhares
Doutorado/PPGEQ/UFU

Agradeço a minha família pelo apoio e confiança no meu potencial. Agradeço também a Deus por ter me ajudado a encontrar os caminhos certos diante dos obstáculos.

RESUMO

Esse Trabalho de Conclusão de Curso aborda a temática da energia solar, com uma discussão sobre sua viabilidade econômica, além de apresentar os desafios existentes e algumas de suas aplicações. Com o intuito de avaliar o cenário atual dessa atividade, esse trabalho tem como objetivos analisar o potencial energético e alguns desafios encontrados para a ampliação do uso dessa matriz energética no Brasil e no mundo. Apesar da imensa disponibilidade de radiação, a energia solar depara-se com algumas barreiras que limitam sua utilização, como as condições para obtenção da matéria prima e a tecnologia necessária, mas pouco desenvolvida, para reciclagem dos materiais utilizados. Para reunir informações sobre esses tópicos, pesquisas foram feitas em artigos e periódicos publicados previamente. Concluiu-se com esse estudo que a energia solar é uma matriz energética viável, mas é preciso que um investimento maior seja feito em pesquisas para garantir que os desafios não limitem o crescimento e que o custo benefício seja cada vez melhor.

Palavras-chave: energia solar; desafios; aplicações; viabilidade econômica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Radiação solar no Brasil – média anual típica (Wh/m ² .dia)	11
Figura 2 – Comparação entre as fontes da matriz energética brasileira em 2016 e previsão para 2024.....	12
Figura 3 – Representação de funcionamento de um sistema fotovoltaico on-grid.....	16
Figura 4 – Princípio básico de funcionamento de uma usina heliotérmica.....	19
Figura 5 – Filme fotovoltaico orgânico.....	23
Figura 6 – Redução de preço das células de silício cristalino desde 1977 até 2014.....	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação da eficiência de células fotovoltaicas de diversos materiais.....	17
Tabela 2 - Abundância dos principais minerais na superfície terrestre.....	22

LISTA DE SÍMBOLOS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CdTe	Telureto de cádmio
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CIGS	Dislenieto de Cobre, Gálio e Índio
EVA	Acetato-vinilo de etileno
IEA	<i>International Energy Agency</i> , Agência Internacional de Energia
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i> , Agência Internacional de Energia Renovável
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i> , Laboratório Nacional de Energia Renovável
OPV	<i>Organic Photovoltaic</i> , filme fotovoltaico orgânico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
SiGM	Silício de grau metalúrgico
SiGS	Silício de grau solar
SiGE	Silício de grau eletrônico

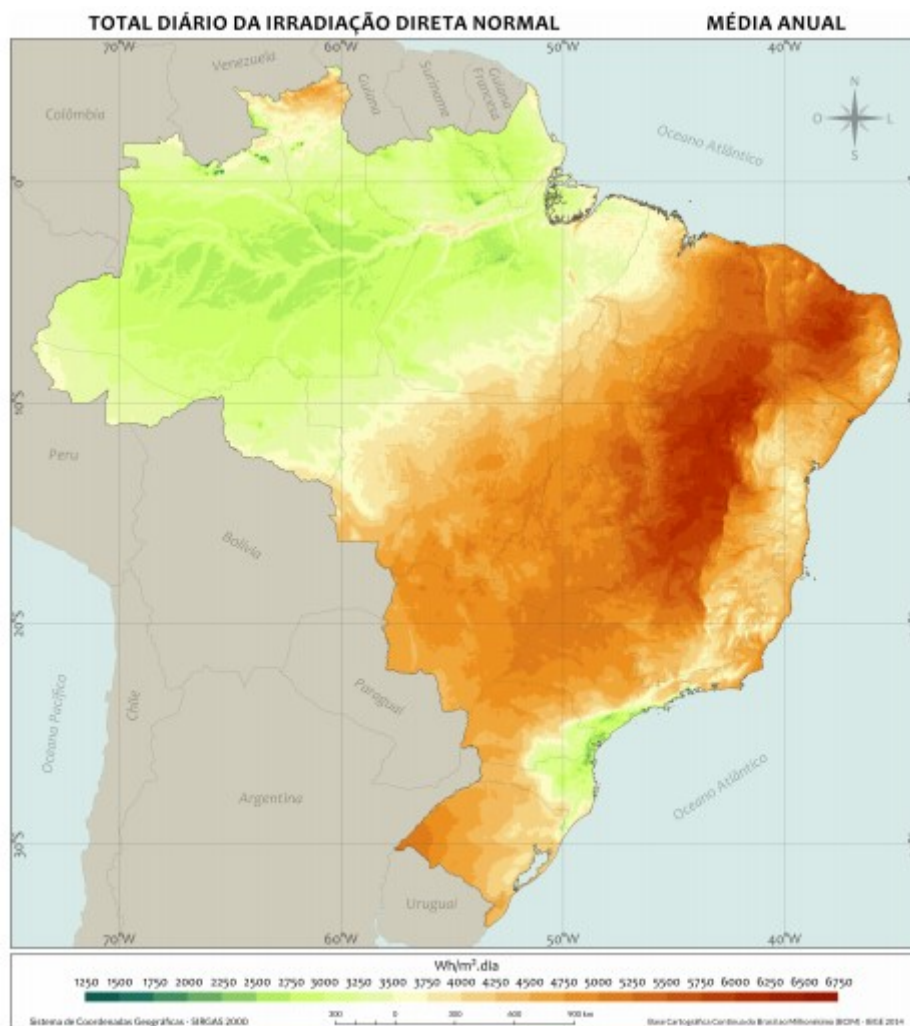
SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 Justificativa.....	13
1.2 Estrutura do Trabalho.....	14
2. A ENERGIA SOLAR	15
2.1 Painéis fotovoltaicos.....	15
2.2 Composição dos painéis.....	16
2.3 Classificação dos painéis fotovoltaicos.....	17
2.4 Heliotermia.....	18
2.5 Aquecedor Solar.....	19
3. DESAFIOS PARA ENERGIA SOLAR	21
3.1 Disponibilidade de matéria prima.....	21
3.2 Descarte das placas fotovoltaicas.....	23
3.3 Reciclagem dos painéis solares.....	24
4. INOVAÇÕES NO SETOR	26
4.1 Perspectivas para o futuro.....	26
5. Conclusão	28
Referências Bibliográficas	29

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda por água, combustíveis e energia devido ao crescimento populacional em ritmo acelerado, torna-se cada vez mais urgente a necessidade de investimento em fontes energéticas renováveis que tenham o menor impacto possível sobre o meio ambiente. Entre as opções disponíveis atualmente, destaca-se a energia solar, já que a radiação que atinge a superfície terrestre proveniente do Sol é inúmeras vezes maior do que a energia consumida pelos seres humanos. Na Figura 1 está representado o índice médio anual de radiação solar no país, em Watt-hora por metro quadrado ao dia ($\text{Wh/m}^2 \text{ dia}$), de acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017).

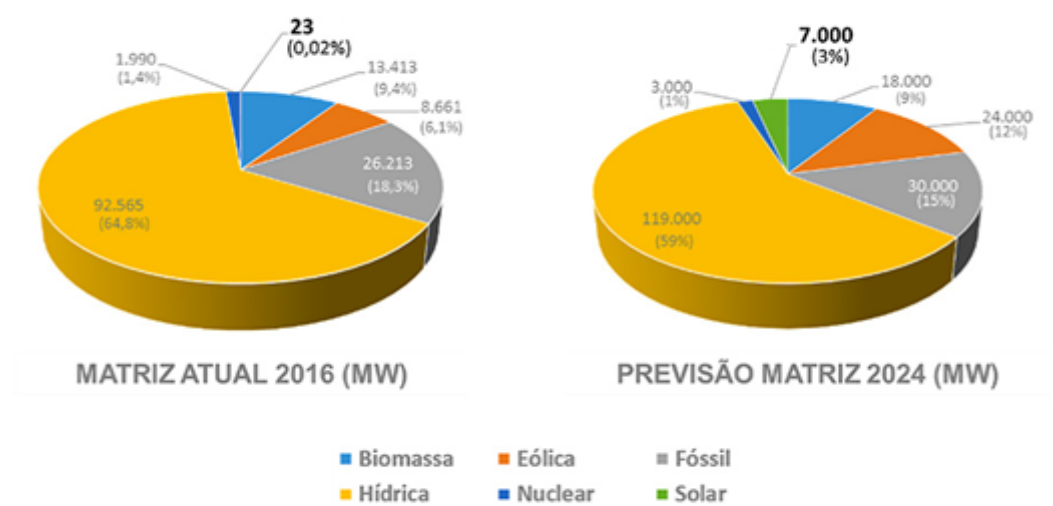
Figura 1 - Radiação solar no Brasil – média anual típica ($\text{Wh/m}^2 \text{ dia}$).



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2017.

Como pode ser observado, a região com os índices mais altos de radiação é a Nordeste, sendo que o Vale do São Francisco destaca-se nesse aspecto. Por outro lado, as áreas com menores taxas estão no litoral das regiões Sul e Sudeste e em grande parte da região Norte. Independente das disparidades observadas na Figura 1, convém ressaltar que a grande variedade de aplicações dessa fonte energética permite que locais com incidência menor de luz solar, como o Rio Grande do Sul, sejam beneficiados por essa tecnologia. O Estado gaúcho tornou-se em 2017 o segundo colocado no ranking nacional de potência instalada com 14,5% de toda a energia produzida por sistemas fotovoltaicos no Brasil. O primeiro colocado foi Minas Gerais com 22,9% de acordo com dados da Associação Brasileira de Energia Solar (ABSOLAR, 2018). Apesar de ser uma fonte extremamente atrativa no Brasil devido à alta radiação incidente sobre o país, a energia solar representava apenas 0,02% da matriz energética brasileira em 2015 (ou 23 MW), conforme a Figura 2.

Figura 2 - Comparação entre as fontes da matriz energética brasileira em 2016 e previsão para 2024.



Fonte: ANEEL 2015, adaptada.

As perspectivas para o futuro são otimistas, com um aumento de 100% ao ano na representatividade prevista para 2024, atingindo 7000 MW. Explicações plausíveis para essa expectativa de aumento significativo são o surgimento de novas formas de

aproveitamento da energia solar, o que impacta no crescimento das linhas de produção e também a concessão de incentivos governamentais para a aquisição de painéis solares, fatores que estão tornando essa fonte mais acessível para a população.

A geração de energia elétrica a partir da radiação solar é realizada pelos aquecedores solares, efeito fotovoltaico ou pela heliotermia. Os painéis fotovoltaicos são constituídos de várias peças acopladas e a principal delas é a célula fotovoltaica, pois é nela que ocorre a obtenção de energia a partir de fótons oriundos da radiação solar. A célula é feita de um material semicondutor, sendo que o mais utilizado é o silício, que também é bastante empregado na indústria eletrônica. Além da escassez de matéria prima para produção de painéis, outro problema que limita o mercado da energia solar é o descarte dos materiais utilizados. Os painéis começaram a ser usados em sistemas de aquecimento solar nos anos 1990 e têm uma vida útil de aproximadamente 25 anos, o que significa que a quantidade de material a ser descartado como resíduo eletrônico tende a aumentar em escala assustadora nos próximos anos. Um dado preocupante divulgado em 2016 alertou para o acúmulo previsto de painéis solares em 2030 e os dígitos podem ultrapassar dois milhões de toneladas de painéis ao redor do mundo. Esse dado foi divulgado em 2016 pela *International Energy Agency* (Agência de Energia Internacional, IEA). Convém ressaltar que existem outros problemas associados ao descarte dos resíduos eletrônicos. Como estão repletos de metais tóxicos, como chumbo, cádmio, cromo e bismuto, o descarte incorreto pode resultar em contaminação do solo e do lençol freático, além de intoxicações graves em seres humanos, por isso a reciclagem se torna uma alternativa cada vez mais urgente nesse contexto.

O Trabalho de Conclusão de Curso em questão visa a discutir os principais entraves (com foco na disponibilidade de matéria-prima para fabricação dos painéis, no descarte e na reciclagem) para a expansão e consolidação da energia solar nos mercados brasileiro e mundial, além de abordar o que tem sido feito para contorná-los. A pesquisa para elaboração desse trabalho foi feita em artigos científicos e em *sites* de empresas ou órgãos relacionados com energia no Brasil e no mundo, como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), a *International Energy Agency* (IEA). Com o intuito de enriquecer o projeto, profissionais e empresas do ramo de energia solar serão contatados para discutir a situação atual do mercado brasileiro e as perspectivas para os próximos anos nessa área.

1.1 Justificativa

Um dos desafios enfrentados pela indústria solar é a disponibilidade de matéria prima para fabricação das placas solares. O silício é usado na fabricação das células fotovoltaicas e precisa ser minerado. Por se tratar de um recurso não renovável, está sujeito a escassez severa que pode ameaçar a produção das placas fotovoltaicas.

Outro importante limitador é a reutilização e reciclagem das placas. Para garantir que o meio ambiente não sofra graves consequências a médio e longo prazo, a União Europeia incluiu os painéis fotovoltaicos na diretiva de Descarte do Equipamento Elétrico e Eletrônico segundo publicado no jornal oficial da União Europeia em 2012. Sendo assim, os fabricantes precisam recolher e reciclar as placas solares instaladas em território europeu. Pesquisadores (KANG, et. al, 2012) têm estudado a questão e uma das opções de reciclagem existente é a adição de produtos químicos para separação dos componentes das placas.

1.2 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está subdividido em 5 capítulos, sendo:

No Capítulo 1, apresenta-se uma introdução sobre o tema, a justificativa para sua escolha e o problema a ser discutido.

No Capítulo 2, tem-se uma apresentação das formas de utilização da energia solar no Brasil.

No Capítulo 3, são apresentados alguns entraves para o desenvolvimento da energia solar, como a utilização de matéria-prima e a reciclagem dos painéis fotovoltaicos.

No Capítulo 4, encontram-se algumas soluções adotadas para tornar a tecnologia mais acessível e com maior rendimento e perspectivas para o futuro.

No Capítulo 5, tem-se a conclusão do trabalho.

2 ENERGIA SOLAR

2.1 Painéis fotovoltaicos

Painéis ou módulos fotovoltaicos são placas em que ocorre a conversão da luz solar em energia elétrica, processo conhecido como efeito fotovoltaico. Esse efeito foi descoberto em 1839 por Edmond Becquerel (1820–1891). Contudo, as primeiras células foram construídas em 1883 por Charles Fritts (1850–1903), responsável por cobrir o selênio que foi usado como semicondutor com uma camada fina de ouro, formando junções. Atualmente grande parte das placas são fabricadas usando silício como material semicondutor (EBBING, 2014).

O Silício é um semimetal de símbolo Si pertencente ao grupo 14 da Tabela Periódica. Seu número atômico é 14, possuindo 4 elétrons na sua última camada e sua massa atômica é 28 u. Encontra-se no estado sólido na temperatura ambiente, fundindo-se à temperatura de 1414°C e entrando em ebulição a 3265°C. É um componente comumente encontrado em minerais como as argilas, feldspatos e quartzo na forma de sílica (SiO_2) e de silicatos (formados por silício, oxigênio e metais). O silício não é considerado um bom condutor de eletricidade, pois os elétrons estão compartilhados por ligações covalentes sem possibilidade de movimentação. O aproveitamento da corrente elétrica em um semicondutor depende da realização da dopagem. Esse processo consiste na perturbação da formação cristalina por meio da adição de elementos químicos que quebram ligações químicas e formam outras. Ao ser dopado com fósforo (que possui 5 elétrons na camada de valência), restará um elétron não compartilhado entre o fósforo e o silício e é possível movimentar essa carga negativa com fornecimento de um pouco de energia. O silício dopado com fósforo recebe o nome de tipo N (de carga negativa). Por outro lado, se o silício for dopado com boro (que possui 3 elétrons na última camada) sobrar uma lacuna desocupada, formando um silício do tipo P (de carga positiva). Na junção P-N pode ocorrer uma alteração no equilíbrio das cargas, formando um campo elétrico (EBBING, 2014).

O painel é composto de várias camadas, sendo que a principal é a camada formada por várias células fotovoltaicas interligadas, conforme mostrado no canto esquerdo da Figura 3, pois é na célula em que a energia da luz solar é transformada em energia fotovoltaica. Partículas de luz solar (os fótons) atingem as células fotovoltaicas,

provocando emissão de elétrons do material semicondutor (cristais de silício ultrapuro, por exemplo). Esse deslocamento de cargas negativas pode gerar uma corrente elétrica contínua nos painéis fotovoltaicos representados na etapa 1, que será convertida em energia elétrica na próxima etapa, que ocorre no inversor. A energia será distribuída pelo quadro de luz para ser utilizada na residência (etapas 3 e 4). Caso a produção de energia supere o consumo e o sistema esteja conectado à rede (*on-grid*), o excesso de energia será disponibilizado na rede elétrica e será usado na forma de “créditos de energia” na conta de luz para compensar o uso durante a noite ou em dias com pouca iluminação solar na etapa 5 (Villalva, 2015).

Figura 3 - Representação do funcionamento de um sistema fotovoltaico *on-grid*.



Fonte: Portal Solar, 2019.

Por outro lado, se o sistema fotovoltaico não estiver conectado à rede elétrica pública, a energia pode ser armazenada em baterias. Esse tipo de sistema fotovoltaico é conhecido como sistema isolado ou *off-grid*. Os componentes desse sistema são o banco de baterias, painel fotovoltaico, controlador de carga e o inversor (Villalva, 2015).

2.2 Composição dos painéis

Cada tipo de célula fotovoltaica absorve energia solar de um espectro diferente de radiação proveniente do Sol, o que influencia na quantidade de energia elétrica que será produzida. No caso das células de silício cristalizado, a faixa de absorção da radiação é estreita, logo poucos fótons atingem a placa com a energia ideal para ocorrência do efeito fotovoltaico. Caso o fóton tenha energia diferente do valor necessário, a quantidade não aproveitada será transformada em calor, que provocará redução da eficiência da célula devido à perda de tensão e, conseqüentemente, de potência (Villalva, 2015).

As células de segunda geração, também conhecidas como filme fino, surgiu para atender a uma necessidade do mercado de redução do preço das células. O grau de silício usado nos painéis é muito alto e para atingir esse patamar é necessário que a produção seja feita em altas temperaturas, o que encarece significativamente o processo de fabricação das células fotovoltaicas. Uma das tecnologias de filme fino é a do silício amorfo (sem forma, não apresenta uma estrutura cristalina e sim uma rede irregular). Apesar de possuir uma eficiência menor, em torno de 7,5% conforme a Tabela 1, a fabricação da célula de silício amorfo é mais barata e absorve energia em uma gama de luminosidade maior. Com isso as opções de aplicação são diferenciadas e essas células podem ser usadas em calculadoras solares abastecidas por iluminação interna do ambiente.

Já as células de Dislenieto de Cobre, Gálio e Índio (CIGS) possuem eficiência maior do que a de silício amorfo, porém possuem Cádmio, um metal perigoso. Esse modelo de módulo é o mais eficiente entre os de segunda geração, mas o uso do metal índio encarece de forma significativa o painel por ser um metal raro e altamente requisitado pela indústria de fabricação de telefones celulares. O último modelo dessa geração é a tecnologia Telureto de Cádmio (CdTe), que apresenta uma eficiência de 9%, superior à do silício amorfo. Porém como desvantagem está a toxicidade do cádmio durante a fabricação dos módulos, sendo necessário ter procedimentos rigorosos para evitar contaminação dos seres humanos e do meio ambiente (MOREIRA, 2019).

Segundo dados da Fraunhofer ISE, Universidade de Stuttgart, 26th IEEE PVSC, NREL, UNSW apresentados na Tabela 1, o rendimento de uma célula de silício monocristalino é de aproximadamente 14% para produção em série, enquanto o da célula policristalina é de 13%. Essa diferença é consequência das perdas durante a formação dos multicristais na fabricação da célula.

Tabela 1 - Comparação da eficiência de células fotovoltaicas de diversos materiais.

Material	Eficiência
Silício Mono	14%
Silício Poli	13%
Silício Amorfo	7,5%
CIGS	10%
CdTe	9%

Fonte: Autoria própria, 2019.

Além dos modelos citados na Tabela 1, existem as células fotovoltaicas híbridas, que são formadas por silício cristalino e uma ou mais camadas de uma película fina de silício amorfo. Por possuírem mais de um material, essas células aproveitam um espectro mais amplo da radiação solar, aumentando a eficiência na conversão da radiação para 18,5% aproximadamente. Apesar de serem mais eficientes, o custo de produção mais elevado torna esse modelo pouco atrativo no mercado.

2.3 Classificação dos painéis fotovoltaicos

Os módulos são classificados principalmente em relação a geração, podendo ser de 1ª, 2ª ou 3ª geração. Os módulos de primeira geração são os de silício cristalino, divididos em estrutura monocristalina ou policristalina e apresentam a melhor eficiência do mercado. Já os de segunda geração são conhecidos como filmes finos e são fabricados sobre um substrato, como o vidro ou aço inoxidável. O filme pode ser feito a partir de diversos materiais, como CIGS ou CdTe. Apesar de possuírem rendimento menor do que o modelo anterior, algumas empresas optam pelo filme fino por serem flexíveis, facilitando a aplicação em projetos arquitetônicos e por terem custo de produção menor. Por último, tem-se o módulo de terceira geração que pode ser formado por células fotovoltaicas orgânicas ou híbridas.

As células orgânicas fotovoltaicas (OPV) surgiram como uma opção para a utilização da energia solar com materiais abundantes na superfície terrestre e gasto energético baixo para sua produção. A técnica usada para processamento das células

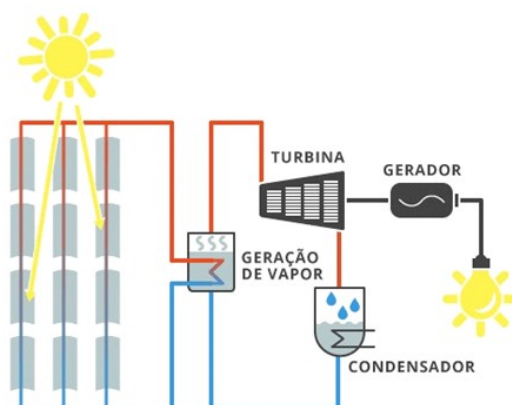
solúveis orgânicas é conhecida como rolo a rolo e ocorre a baixa temperatura, reduzindo o custo de produção (SOLAR ENERGY TECHNOLOGIES OFFICE, 2019).

Uma típica célula OPV é formada de várias camadas de materiais fotoativos colocadas entre dois eletrodos. O material fotoativo de uma extremidade absorve fótons e ocorrerá o deslocamento dos elétrons devido ao excesso de energia da camada doadora para a aceitadora de elétrons. Dessa forma os elétrons serão direcionados para um eletrodo, enquanto os prótons se moverão no sentido contrário para o outro eletrodo (KAUR et. al, 2014).

2.4 Heliotermia

Heliotermia é a produção indireta de energia elétrica a partir da luz solar. É um processo considerado indireto porque a energia solar não será convertida diretamente em energia elétrica como no efeito fotovoltaico, mas sim armazenada, convertida em energia mecânica e depois em eletricidade. A captação da energia proveniente do Sol é feita por espelhos, coletores ou heliostatos, que se orientam pela posição do Sol, refletem a luz e direcionam-na para um único ponto, em que é colocado um receptor com um fluido térmico. O calor acumulado aquece o fluido, que em seguida promoverá a evaporação da água. O vapor d'água movimentará as turbinas da forma como ocorre em uma usina termoelétrica, produzindo a energia elétrica (TOLMASQUIM, 2003), conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Princípio básico de funcionamento de uma usina heliotérmica.



Fonte: Portal Solar, 2019.

O Brasil é um país com alto potencial para instalação das usinas heliotérmicas. Regiões consideradas ideais são as que apresentam poucas nuvens, altos índices de radiação e áreas planas, sendo assim o Nordeste brasileiro destaca-se como sendo uma região bastante promissora para instalação das usinas (TOLMASQUIM, 2003).

2.5 Aquecedores solares

Uma outra forma de aproveitamento da energia solar é por meio da utilização de aquecedores solares nos telhados das residências. O sistema é composto por placas coletoras e um reservatório. As placas possuem serpentinas de cobre ou alumínio em seu interior e isoladas externamente. O reservatório é feito de cobre ou inox e isolado termicamente para garantir que a água permaneça aquecida.

O funcionamento do sistema é simples. As placas são instaladas no telhado próximas da caixa d'água, de forma que a água fria desce até o reservatório e depois para as placas. A luz solar incide sobre as placas e aquece a água durante a passagem do líquido pelas serpentinas. Ao ser aquecida, a densidade da água diminui e o líquido sobe para o reservatório que é colocado acima das placas, onde permanece até ser utilizada. Em dias chuvosos ou nublados, um sistema de aquecimento elétrico ou a gás pode ser acionado, garantindo água quente para os moradores da residência em qualquer situação (HINRICHS, KLEINBACH, REIS, 2014).

A empresa brasileira InteliSol inovou ao oferecer um sistema automatizado em que a água quente não entra em contato com a água fria no reservatório. Por meio de sensores interligados ao sistema, a água fria desce da caixa d'água a medida que os coletores ou o reservatório estiverem com nível baixo. Outro sensor instalado após as placas mede a temperatura da água quente e, ao atingir a temperatura desejada, a água aquecida subirá para o reservatório, liberando espaço para entrada de água fria.

A vantagem da utilização de um aquecedor solar é a economia na conta de energia elétrica de até 40%. Isso ocorre devido à redução do gasto de energia pra suprir a necessidade de água quente no chuveiro. Por se tratar de uma opção mais acessível financeiramente do que os painéis fotovoltaicos, o aquecedor solar é uma alternativa viável para uma parcela maior da população. Enquanto o investimento em painéis solares

para uma residência com 4 pessoas é de 10 mil reais aproximadamente, a quantia necessária para instalar o sistema de aquecimento é de 1/5 desse valor (Soletrol, 2015).

Segundo dados da IEA a energia gerada mundialmente pelos aquecedores solares era de aproximadamente 200 TWh em 2010 e dobrou em oito anos. Apesar do crescimento expressivo, a geração nos aquecedores foi ultrapassada pela dos painéis fotovoltaicos, cuja geração de energia aumentou em torno de 900% no mesmo período, atingindo quase 600 TWh em 2018. Já a geração por usina heliotérmica teve um aumento pouco expressivo comparado com o das duas tecnologias citadas anteriormente. O foco desse trabalho são os painéis fotovoltaicos por serem a maior fonte de aproveitamento da energia solar no Brasil e no mundo atualmente.

3 DESAFIOS PARA ENERGIA SOLAR

3.1 Disponibilidade de matéria prima

A crosta terrestre é composta por 27,7% de silício, sendo o segundo elemento mais abundante na superfície terrestre, estando o oxigênio em primeiro (ATKINS, JONES, 2012). Porém essa informação deve ser avaliada com cuidado, já que nem todo silício disponível é adequado para as mais diversas aplicações. Devido às suas propriedades abrasivas, o silício é largamente usado em ferramentas de corte, na forma de sílica pode ser utilizado para fabricar materiais refratários, também pode ser aplicado nas indústrias metalúrgica, construção civil e na indústria eletrônica.

Apesar de ser muito abundante na crosta terrestre, o processo de purificação do silício impõe algumas limitações, como o gasto excessivo de energia, alto custo de instalação do parque de purificação, além da exigência de pureza para que seja utilizado em placas fotovoltaicas ou na indústria eletrônica. Convém ressaltar que a energia solar é considerada uma energia limpa, porém a produção dos painéis poderia ser mais sustentável. A energia usada na fabricação é, geralmente, proveniente da queima do carvão que libera compostos orgânicos voláteis na atmosfera e outras toxinas, como o mercúrio.

Outra ressalva importante é em relação à disponibilidade de reservas de quartzo, que podem ser encontradas somente em alguns países, entre eles o Brasil. O quartzo é formado pelos elementos silício e oxigênio conforme mostrado na Tabela 2. Por outro lado, os demais minerais apresentam outros componentes, o que reduz a concentração de silício nessas rochas e torna o processo de purificação inviável economicamente. Sendo assim, o quartzo é mais adequado para utilização na indústria fotovoltaica do que os outros minerais mostrados. Além disso, verifica-se pela Tabela 2, elaborada com dados do CGEE, que apenas uma pequena parcela do silício se encontra na forma de quartzo, ou seja, a quantidade de silício encontrado na natureza em condições adequadas de utilização em aplicações que exigem alta pureza é bem menor do que os 27,7% mencionados no início desse tópico.

Tabela 2 - Abundância dos principais minerais na superfície terrestre.

Mineral	Fórmula	Ocorrência
Feldspato	$KAlSi_3O_8(Ca,Na)AlSi_3O_8$	60
Piroxênio	$(Mg,Fe)_2SiO_4$	17
Anfibólio	$Ca_2(Fe,Mg)_5Si_8O_{22}(OH)_2$	
Quartzo	SiO_2	12
Mica	$K(Mg,Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$ $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	4
Outros (silicatos e não silicatos)	diversos	7
Total		100

Fonte: Autoria própria, 2019.

A partir de 2003, a demanda por silício de grau solar (SiGS, silício com pureza suficiente para ser usado na indústria fotovoltaica) aumentou consideravelmente e algumas fontes alternativas começaram a ser usadas para suprir a necessidade do mercado. A primeira envolve o desenvolvimento de processos que são usados para obter o SiGE (silício para indústria eletrônica) a fim de produzir um silício de qualidade um pouco inferior, mas que atenda a indústria solar. A segunda opção é o aprimoramento das etapas de purificação do SiGM (silício usado no setor metalúrgico), processo conhecido como rota metalúrgica de obtenção do SiGS. Ressalta-se que dentre os três tipos (SiGM, SiGS e SiGE) o de grau metalúrgico é o de menor pureza e o de grau eletrônico é o mais puro. Algumas universidades brasileiras, como a UNICAMP, trabalham em parceria com empresas para desenvolver a rota metalúrgica no Brasil, já que os processos usados são semelhantes aos empregados na indústria metalúrgica (CARVALHO; MESQUITA; ROCIO, 2014).

Pesquisas foram feitas para obter o silício com a pureza desejada a partir do gerenciamento de resíduos de outros setores. Para controlar a escassez de SiGS, a empresa multinacional IBM começou a desenvolver em 2007 o processo de reciclagem de chips de silício presentes em computadores para utilizá-los em painéis solares. Ao utilizar o metal recuperado, as fabricantes economizam pelo menos 30% do que seria gasto para adquirir novas peças do semimetal para utilização nas placas solares (IBM, 2007). Já no setor agrícola, pesquisas estão sendo desenvolvidas para propor uma outra

saída para o fornecimento de silício: o uso de resíduos alimentares, já que algumas espécies vegetais possuem concentração significativa de sílica, como trigo, bagaço de cana de açúcar e milho (ADEBISI, 2017).

Outro exemplo de inovação nessa área é o da empresa brasileira Sunew, que trabalha com um filme fotovoltaico orgânico de terceira geração, também conhecido como OPV (*Organic Photovoltaic*, filme fotovoltaico orgânico) conforme mostrado na Figura 5. O filme é feito de eletrodos impressos em um polímero e pode ser aderido a vários tipos de materiais, criando superfícies inteligentes geradoras de energia. Como o processo de fabricação do adesivo ocorre a baixa temperatura, o gasto energético é bem inferior ao necessário para fabricação das placas fotovoltaicas, em torno de 20 vezes menor. Além disso, é possível compensar a emissão dos poluentes liberados na fabricação do material em dois meses, enquanto para os painéis são necessários 12 anos.

Figura 5 - Filme fotovoltaico orgânico.



Fonte: Sunew, 2018.

Por ser um adesivo, o OPV permite uma otimização de espaço maior em relação aos modelos tradicionais de aproveitamento da energia solar. Com isso, a variedade de aplicações aumenta e a empresa instalou seu produto em fachadas de edifícios, em árvores solares e até mesmo no teto de carros e de ônibus.

3.2 Descarte das placas fotovoltaicas

Os estudos sobre o gerenciamento de resíduos dos módulos solares estão mais desenvolvidos em certos países do que no Brasil. Entretanto, as legislações ainda estão

engatinhando no que tange à definição dos procedimentos para o descarte adequado e da responsabilidade pela sua realização. No caso da União Europeia, foi publicada em 2012 a Diretiva 2012/19/EU que inclui os painéis na classificação de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos. A obrigação de coletar, tratar e monitorar as placas foi concedida aos produtores.

Por outro lado, nos Estados Unidos, as placas solares usadas são consideradas resíduos comuns ou, se a quantidade de metais pesados for elevada, resíduos perigosos. Dentre os estados norte-americanos, a Califórnia está criando uma lei que classifica os painéis como resíduos universais, que são produtos para descarte que possuem substâncias nocivas para os seres humanos ou para o meio ambiente. É obrigatório que esse tipo de resíduo seja descartado em locais específicos para resíduos perigosos. Além disso, os produtores são incentivados a otimizar o processo de produção para reduzir os impactos ambientais durante o ciclo de vida das placas e também se tornaram responsáveis pela gestão dos resíduos gerados. Além da Califórnia, os estados de Nova York e Carolina do Norte estão propondo leis para regular o descarte dos painéis.

A legislação brasileira estipula que o poder público e os fornecedores são responsáveis pelo gerenciamento de resíduos elétricos, eletrônicos e perigosos de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) divulgada em 2010. Além disso, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) publicou em 2012 a Lista Brasileira de Resíduos Sólidos com o intuito de aumentar e avaliar a eficácia da gestão dos diversos tipos de resíduos sólidos produzidos no Brasil. Entretanto, as placas fotovoltaicas pós consumo ainda não foram citadas em nenhuma legislação, sendo consideradas resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos.

3.3 Reciclagem dos painéis solares

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2013), a reciclagem é o processo de reaproveitamento de materiais que foram descartados, de forma que possam ser reinseridos no ciclo produtivo. É considerada uma estratégia muito vantajosa para amenizar os problemas gerados pelo acúmulo de resíduos sólidos, pois permite que a quantidade de lixo seja drasticamente reduzida. Além disso, contribui com a diminuição da exploração de recursos naturais como petróleo, água e minérios e gera empregos para milhares de pessoas.

A vida útil dos painéis é geralmente definida por meio da decomposição pela luz solar do filme encapsulante (constituído de acetato-vinilo de etileno, conhecido como EVA), danos ao vidro temperado e desgaste na laminação. Após 25 anos de uso, a geração de energia no painel reduz para aproximadamente 80%, sendo recomendada a troca nesse estágio.

Os painéis usados são considerados resíduos eletrônicos (mesma categoria dos celulares, televisores e afins) e grande parte deles são enviados para países pobres do sudeste asiático para serem descartados incorretamente. Inicialmente a estratégia era enviar os módulos com eficiência reduzida para países com poder aquisitivo mais baixo, o que permitia o aproveitamento do módulo que ainda estava em bom estado de conservação. Porém com o aumento da produção chinesa, que possui preço mais acessível e qualidade inferior, essa tática se tornou inviável. Enquanto o processo de reciclagem não for vantajoso financeiramente, o Instituto de Pesquisa de Energia Elétrica dos Estados Unidos recomendou em um relatório publicado em 2016 que os painéis sejam acondicionados em *containers* de forma que os impactos ambientais e sociais sejam controlados.

Existem várias formas de realizar a reciclagem dos painéis de silício, por meio de processos mecânicos, químicos, térmicos, com uso de *laser* ou com uma combinação de técnicas. Os polímeros e o vidro podem ser separados por processos térmicos e a célula de silício pode ser purificada com a utilização de *laser*. Após o tratamento térmico, é recomendável fazer o tratamento químico da célula fotovoltaica com lixiviações para aumentar o reaproveitamento do metal (RADZIEMSKA, et. al 2010).

As empresas Veolia e PV Cycle inauguraram a primeira planta europeia de reciclagem de painéis em julho de 2018. O processo permite o reaproveitamento de todos os componentes, desde o vidro até os metais. A separação e reciclagem dos materiais é vantajosa para diversos setores da indústria: o alumínio retorna para as refinarias, o silício pode ser reutilizado nas linhas de produção de metais preciosos, enquanto os cabos e conectores podem ser vendidos para a indústria eletrônica. A capacidade de reaproveitamento planejada para os próximos anos é de 4 toneladas de materiais com rendimento de 95%, sendo que em 2018 a quantidade foi de 1,8 toneladas.

4 EVOLUÇÕES NO SETOR

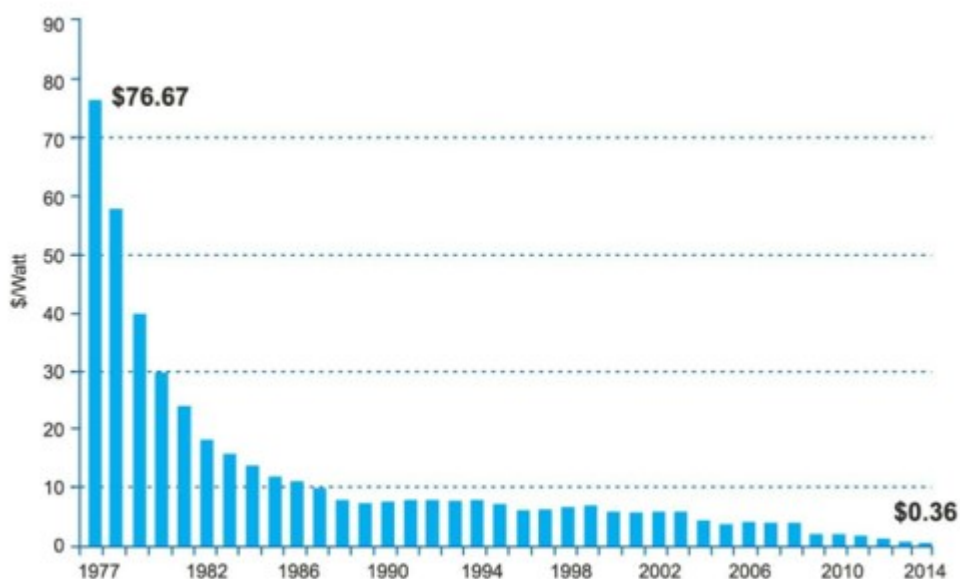
O setor de energia solar está se desenvolvendo continuamente e as empresas estão buscando formas de tornar os produtos cada vez mais acessíveis à população e alinhados com as necessidades de cada cliente. Uma opção que está se destacando no mercado para as empresas que desejam economizar na conta de energia são as fazendas solares. Essa alternativa é especialmente atrativa para as empresas que não dispõem de espaço ou verba para investimento nos modelos convencionais, já que a empresa interessada aluga um lote da fazenda e pode usufruir da energia gerada sem investir na instalação ou manutenção do sistema.

Projetos estão sendo feitos em lagoas e nas hidrelétricas brasileiras para avaliar uma outra modalidade: as fazendas solares flutuantes, que são capazes de produzir até 14% mais energia do que painéis instalados na terra ou no telhado devido ao resfriamento das placas pela lâmina d'água. Outra vantagem dos modelos flutuantes é a otimização do espaço terrestre para outros fins, além de conter a evaporação da água da lagoa em até 70% da área coberta. Em agosto de 2019, foi inaugurada a primeira etapa da Usina Solar Flutuante da Hidrelétrica de Sobradinho, na Bahia. As placas foram instaladas no reservatório da hidrelétrica e a energia gerada será suficiente para abastecer 2 mil casas populares.

4.1 Perspectivas para o futuro

As melhorias no processo de fabricação das células fotovoltaicas estão promovendo uma redução significativa no preço das placas solares. Conforme apresentado na Figura 6, o preço das células de silício sofreu uma queda progressiva desde 1977, época em que a célula custava \$76, valor muito mais alto do que os \$0,36 cobrados em 2014. Como o valor da célula representa aproximadamente 60% do preço total do painel, houve uma redução significativa no preço das placas. Segundo o *National Renewable Energy Laboratory* (Laboratório Nacional de Energia Renovável, NREL), o custo da placa de silício multicristalino era de \$1,80/Watt em 2010 e caiu para \$0,35/Watt em 2017.

Figura 6 - Redução de preço das células de silício cristalino desde 1977 até 2014.



Fonte: Bloomberg National Energy Finance, 2015.

Como consequência houve um aumento significativo na quantidade de painéis instalados e também na geração de energia fotovoltaica. Uma pesquisa realizada pelo Ibope Inteligência em 2017 apontou que 89% dos brasileiros entrevistados deseja gerar a própria energia e evitar as oscilações entre bandeiras na conta de luz. Algumas leis estão tramitando no Congresso Brasileiro com objetivo de aumentar a concessão de incentivos fiscais e a facilitar o acesso da população à geração distribuída de energia. Com isso, a estimativa da ABSOLAR é de que a quantidade de sistemas fotovoltaicos em funcionamento atinja 1 milhão em 2024, número bem superior aos 20 mil painéis instalados em 2018.

5 CONCLUSÃO

O impacto ambiental causado pela produção dos painéis é muito grande se comparado com a eficiência da geração de energia fotovoltaica. As placas precisam gerar energia por aproximadamente doze anos para compensar o impacto ambiental da produção do material, ou seja, metade do seu tempo de vida útil estimado.

A iniciativa do governo federal brasileiro de subsidiar a instalação de painéis é uma estratégia interessante de incentivo ao crescimento da energia renovável no país. Entretanto, o retorno poderia ser maior se o investimento fosse direcionado para pesquisa e desenvolvimento de métodos de produção com impacto menor para o meio ambiente e também de reciclagem do material. A curto prazo, o uso de tecnologias orgânicas e mais sustentáveis de absorção da energia proveniente do Sol é mais viável e pode contribuir de forma mais significativa com a preservação do meio ambiente do que a utilização dos painéis. Pesquisadores ao redor do mundo estão estudando as células OPV e analisando as diferenças na performance diante de alterações na estrutura e composição dos módulos. (ERB, et al 2005).

A médio e longo prazo, a melhor alternativa é investir na pesquisa e desenvolvimento da fabricação e reciclagem dos componentes das placas. À medida que os países implantarem e fiscalizarem o cumprimento de leis cada vez mais rígidas de políticas de logística reversa dos painéis solares, é possível que o investimento em pesquisas seja priorizado e as placas fotovoltaicas tenham um custo benefício financeiro e ambiental realmente atrativo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEBISI, J.a. et al. Potential of producing solar grade silicon nanoparticles from selected agro-wastes: A review. *Solar Energy*, [s.l.], v. 142, p.68-86, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.001>. Acesso em 1º de outubro de 2019.

Agência Brasil. Governo inaugura usina solar flutuante no reservatório de Sobradinho. Disponível em: <https://www.diariodepernambuco.com.br/noticia/brasil/2019/08/governo-inaugura-usina-solar-flutuante-no-reservatorio-de-sobradinho.html>. Acesso em 29 de setembro de 2019.

ATKINS, P., JONES, L. **Princípios de Química**: questionando a vida moderna e o meio ambiente. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Matriz de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>. Acesso em: 26 de outubro de 2018.

CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Produção de silício grau solar no Brasil. Nota Técnica Estudo Prospectivo em Energia Fotovoltaica. 2009. Disponível em: https://www.cgEE.org.br/documents/10195/734063/Produção+de+silício+grau+solar+no+Brasil_Nota+Técnica+CGEE_13_5304.pdf/838757da-f731-4520-8f0d-5016fad66f19?version=1.0. Acesso em: 1º de outubro de 2019.

Directive 2012/19/eu of the european parliament and of the council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). Disponível em <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:197:0038:0071:en:PDF>. Acesso em: 15 de setembro de 2019.

EBBING, D. D. **Química Geral** – Volume 2. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

Electric Power Research Institute, PV Life Cycle Analysis, 2016. Disponível em: https://www.solarpowerinternational.com/wp-content/uploads/2016/09/N253_9-14-1530.pdf. Acesso em: 26 de junho de 2019.

“Energia Heliotérmica”. Disponível em: <http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/energia-heliotermica/o-que-e-energia-heliotermica>. Acesso em: 28 de setembro de 2019.

ERB, T.; ZHOKHAVETS, U.; GOBSCH, G.; RALEVA, S.; STUHN, B.; SCHILINSKY, P.; WALDAUF, C.; BRABEC, C.J. Correlation between structural and optical properties of composite polymer/fullerene films for organic solar cells. *Adv. Funct. Mater.* **2005**, *15*, 1193–1196.

Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. Organic Photovoltaic Research. Disponível em <https://www.energy.gov/eere/solar/organic-photovoltaics-research>. Acesso em 10 de janeiro de 2020.

HINRICHS, R. A, KLEINBACH, M. REIS, L.B. **Energia e Meio Ambiente**. 5. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

"IBM Turning Silicon Waste Into Solar Panels; By using reclaimed silicon, solar cell manufacturers can save between 30% and 90% of the energy they would have expended using new silicon materials, IBM said." *InformationWeek*, 30 de Outubro 2007. *Academic OneFile*, disponível em <http://link.galegroup.com/apps/doc/A170441570/AONE?u=capes&sid=AONE&xid=982c58bd>. Acesso em: 16 de novembro 2018.

International Energy Agency, Photovoltaic Power Systems Programme. Trends in PV Module Recycling Technologies, 2016. Disponível em: <http://www.iea-pvps.org/index.php?id=459>. Acesso em: 22 de junho de 2019.

International Energy Agency, 2019 https://webstore.iea.org/download/direct/2890?fileName=Solar_Energy_Mapping_the_road_ahead.pdf. Acesso em: 5 de outubro de 2019.

SHINA, J. PARKB, J. PARKA, N. A method to recycle silicon wafer from end-of-life photovoltaic module and solar panels by using recycled silicon wafers. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Elsevier, 162, 1-6, Janeiro 2017.

KANG, S. YOO, S. LEE, J. BOO, B. RYU, H. Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules. *Renewable Energy* 47 (2012) 152-159.

KAUR, N. SINGH, M. PATHAK, D. WAGNER, T. NUNZI, J.M. Organic materials for photovoltaic applications: Review and mechanism. *Synthetic Metals* 190 (2014) 20-26.

Kit Smart Control para Aquecimento Solar. Disponível em: <http://www.intelisol.com.br/produtosenergia.html>. Acesso em 10 de outubro de 2019.

Living Circular. "The first recycling plant in Europe for solar panels". Disponível em: <https://www.livingcircular.veolia.com/en/industry/first-recycling-plant-europe-solar-panels>. Acesso em 6 de outubro de 2019.

"Mapeamento nacional aponta minas como líder na geração de energia solar fotovoltaica no país". 2018. Disponível em <http://absolar.org.br/noticia/noticias-externas/mapeamento-nacional-aponta-minas-como-lider-na-geracao-de-energia-solar-fotovoltaica-no-pais.html> . Acesso em: 2 de novembro de 2018.

Ministério do Meio Ambiente. "Reciclagem". Disponível em: <https://www.mma.gov.br/informma/item/7656-reciclagem>. Acesso em 26 de junho de 2019.

MOREIRA, Fátima. Fundação Osvaldo Cruz "Toxicidade dos metais – Cádmiio." Disponível em http://www.inmetro.gov.br/painelsetorial/palestras/Efeitos-toxicol%C3%B3gicos-dos-metais-c%C3%A1dmio-e-chumbo_Dra-Maria-de-F%C3%A1tima.pdf. Acesso em 28 de novembro de 2019.

PEREIRA, E.; et. al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2 ed. São José dos Campos, 2017. Disponível em: http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao.pdf. Acesso em 2 de novembro de 2018.

Poupança Solar – comparativo de investimento para o aquecedor solar. Disponível em: <https://www.soletrol.com.br/extras/poupanca-solar/>. Acesso em 20 de outubro de 2019.

RADZIEMSKA, E., et. Al. Chemical, thermal and laser processes in recycling of photovoltaic silicon cellular cells and modules . Ecological Chemistry and Engineering S. Vol 17 , No 3. 2010.

Share energy. Disponível em: <https://shareenergy.com.br/o-preco-da-energia-solar-esta-caindo/>. Acesso em: 5 de outubro de 2019.

Solar Waste/European WEEE Directive. “Collection & recycling”. Disponível em: <http://www.solarwaste.eu/collection-and-recycling/>. Acesso em: 19 de novembro de 2018.

Solar energy technologies office. Organic Photovoltaics Research. Disponível em <https://www.energy.gov/eere/solar/organic-photovoltaics-research>. Acesso em 15 de dezembro de 2019.

TOLMASQUIM, M.T. **Fontes renováveis de energia no Brasil**. 1. ed. Rio de Janeiro, Interciência: 2003.

TYAGI, V. V.; et. al. Progress in solar PV technology: Research and achievement. Renew. Sustain. Energy Rev., v. 20, p. 443–461, 2013.

VILLALVA, M. G. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e aplicações. 2. Ed. São Paulo. Editora Saraiva: 2015.