



ENERGIA TÉRMICA EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS: CAUSAS E SOLUÇÕES

Vinicius de Oliveira Menezes Sirqueira, oliveirabrvini@uesc.br¹
Ingrid Heloisa da Silva Alves, ihsalves@uesc.br¹

¹Universidade Estadual de Santa Cruz-UESC, Campus Soane Nazaré de Andrade, Rod. Jorge Amado, Km 16 - Salobrinho, Ilhéus - BA, 45662-900,

Resumo A energia fotovoltaica tem se tornado uma alternativa limpa e viável para a atual demanda energética do mundo. Porém, seu desempenho depende das condições térmicas e de irradiação solar dos locais de implantação. Esse artigo tem como finalidade apresentar alguns dos fatores que causam a geração de energia térmica em módulos fotovoltaicos, que é refletido no aumento de temperatura dos mesmos e a consequente queda de desempenho, e soluções para inibir esses causadores. Para isso foi realizado uma revisão bibliográfica em livros, artigos e sites. Ao fim do trabalho foram elencadas formas de controle da energia térmica gerada nos painéis, sendo uma delas a utilização de coletores térmicos.

Palavras chave: Módulo fotovoltaico. Energia solar. Temperatura. Eficiência.

1. INTRODUÇÃO

Com o progresso e desenvolvimento da sociedade e uma maior demanda de energia, a discussão sobre energia sustentável tem ganhado força e a energia solar é um dos carros chefes desse debate. A energia solar é uma energia limpa e renovável, com baixo custo de manutenção, que pode ser aproveitada diretamente na iluminação, aquecimento de fluidos e ambientes, geração de potência mecânica ou elétrica. Uma das formas de conversão de energia solar em energia elétrica ocorre com a utilização de painéis fotovoltaicos que transformam diretamente a radiação luminosa em eletricidade. Essa conversão é chamada de efeito fotovoltaico (Nascimento, 2017).

As células fotovoltaicas são fabricadas com materiais semicondutores, estes com características intermediárias entre um condutor e um isolante (Nascimento, 2014). Esses materiais se caracterizam por possuírem uma banda de valência totalmente preenchida por elétrons e uma banda de condução “vazia”, sem elétrons, em temperaturas perto do zero absoluto (0 K). Nessas condições, um semicondutor se comporta como um isolante a 0 K (Pinho e Galdino, 2014). O material mais utilizado e com o maior rendimento nas células fotovoltaicas é o silício, o qual não tem elétrons livres e por isso é realizado o processo de dopagem. A dopagem do silício é realizada geralmente com duas substâncias, que são o fósforo e o boro. No processo de dopagem com o fósforo obtém-se um material com elétrons livres, ou seja, materiais portadores de carga negativa. Tal dopagem é chamada de silício tipo N. O mesmo processo é realizado com o boro, obtendo-se um material com características inversas, ou seja, falta de elétrons ou material com cargas positivas. Esse tipo de dopagem é chamado de silício tipo P (Nascimento, 2014).

A descoberta do efeito fotovoltaico por Edmond Becquerel, em 1839, deu às indústrias mundiais uma nova perspectiva na produção de energia (Pinho e Galdino, 2014). A produção energética derivada da radiação solar no mundo tem aumentado todos os anos e no começo de 2016 conseguiu chegar à marca de 305GW. O maior produtor e investidor de energia fotovoltaica é a China, chegando a ter a capacidade de geração de energia de 78,1GW (ABSOLAR, 2017). O Brasil, conforme o Ministério de Minas e Energia (2017), possuía no final de 2016, 81MW de energia solar fotovoltaica instaladas, tendo 24MWp para geração centralizada e 57MWp para distribuição. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (2012), o Brasil possui altos níveis de insolação e grandes reservas de quartzo, o que pode gerar grande vantagem competitiva para a produção de silício com alto grau de pureza (Nascimento, 2017). Na Bahia a energia fotovoltaica ainda é pouco aproveitada se analisado o potencial que o estado tem. Com estudos realizados pelo governo do estado da Bahia em áreas de alto rendimento, a produção de energia no estado pode chegar a 100GW para a tecnologia de silício cristalino e estrutura fixa (AWS Truepower et al, 2018).

As maiores dificuldades na implantação da energia fotovoltaica estão em seu preço e seu rendimento. Porém, os custos de investimentos vêm apresentando queda, em 2018 ocorreu uma queda de aproximadamente 30% no preço dos painéis fotovoltaicos (Reis, 2019). Os módulos fotovoltaicos têm uma baixa eficiência que exemplificado na Figura 1. Essa baixa eficiência é causada por vários fatores, tendo como um deles a temperatura. O aumento de temperatura no módulo causa uma queda considerável em seu rendimento que vai ser discutido nesse artigo.

Figura 1. Eficiência das melhores células fotovoltaicas fabricadas em laboratórios até 2012 (Pinho e Galdino, 2014)

Tecnologia		Eficiência (%)
Silício	Monocristalino	25,0 ± 0,5
	Policristalino	20,4 ± 0,5
	Filmes finos transferidos ⁴	20,1 ± 0,4
Compostos III A-VA (ou 13-15)	GaAs (filme fino)	28,8 ± 0,9
	GaAs (policristalino)	18,4 ± 0,5
	InP (monocristalino)	22,1 ± 0,7
Calcogênios Compostos II B-VI A (ou 12-16)	CIGS (CuIn _x Ga _(1-x) Se ₂) (filme fino)	19,6 ± 0,6
	CdTe (filme fino)	18,3 ± 0,5
Silício amorfo / nanocristalino	Amorfo (a-Si) (filme fino)	10,1 ± 0,3
	Nanocristalino (nc-Si)	10,1 ± 0,2
Células Sensibilizadas por Corantes (DSSC)		11,9 ± 0,4
Células Orgânicas (filme fino)		10,7 ± 0,3
Multijunção	InGaP/GaAs/InGaAs	37,7± 1,2
	a-Si/nc-Si/nc-Si (filme fino)	13,4± 0,4

Nesse trabalho, é realizado um levantamento de vários trabalhos de pesquisas, livros e artigos sobre os fatores que causam esse aumento de temperatura e conseqüentemente a queda no rendimento das placas fotovoltaicas além de algumas formas de inibir.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A produção de energia de um módulo fotovoltaico depende da intensidade luminosa que chega no painel, essa irradiação luminosa com as propriedades do material da placa causam o efeito fotovoltaico e a geração de energia. A irradiação solar também gera um aumento de temperatura na placa e com isso perda de eficiência.

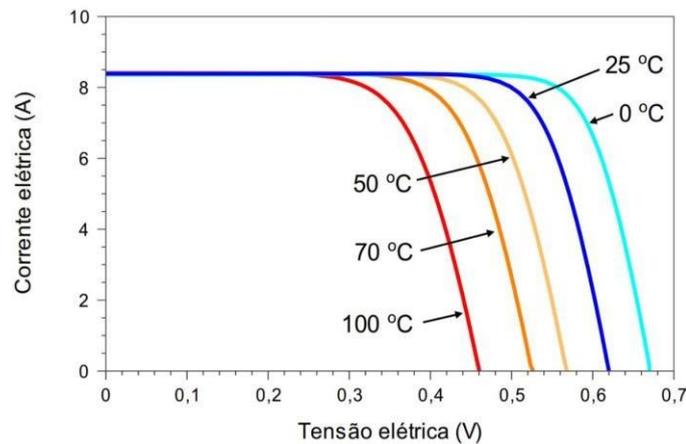
2.1. Irradiação

O desempenho de módulos fotovoltaicos depende da temperatura da placa. Esta temperatura pode ser determinada de maneira teórica com um balanço de energia ou com sensores de temperatura no módulo. A energia solar que não é convertida em eletricidade, é convertida em calor sendo este dissipado para a placa e dela para o meio ambiente. Em grandes sistemas fotovoltaicos instalados em série, onde a dissipação para o meio ambiente não é o suficiente, deve-se utilizar meios para que o calor seja removido (Kalogirou, 2013).

A irradiação solar é um fator muito importante nas placas fotovoltaicas e na temperatura da mesma. Com a temperatura de 25°C, a corrente elétrica aumenta linearmente com o aumento da irradiância solar, enquanto que a tensão de circuito aberto aumenta de forma logarítmica. Por outro lado, com o aumento da irradiação solar, a temperatura da placa e do ambiente também sofrem um aumento e com isso a placa tem uma queda na eficiência. Isto acontece devido ao fato de a tensão da placa diminuir significativamente com o aumento da temperatura, já a sua corrente sofre uma elevação desprezível (Pinho e Galdino, 2014).

A Figura 2 apresenta a variação da corrente e voltagem com o aumento de temperatura em uma célula fotovoltaica sofrendo irradiação de 1000 W/m².

Figura 2. Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V para irradiação de 1.000W/m² (Pinho e Galdino, 2014)



Para encontrar a variação da potência das placas com a temperatura é necessário determinar o coeficiente térmico das placas. O coeficiente (β) da variação tensão de circuito aberto (V_{oc}) com a temperatura é obtido com a Eq. (1):

$$\beta = \frac{\Delta V_{oc}}{\Delta T} \quad (1)$$

Em que o ΔV_{oc} é a variação da tensão de circuito aberto para a variação da temperatura da placa ΔT .

O cálculo da $V_{oc}(T)$ que é a tensão de circuito aberto com determinada temperatura depende da $V_{oc_{stc}}$ que é a tensão de circuito aberto em condições padrão de ensaio. Esse cálculo é realizado por meio da Eq. (2):

$$V_{oc}(T) = V_{oc_{stc}}(1 + \beta(T - 25)) \quad (2)$$

O coeficiente (α) de variação da corrente de curto com a temperatura é dado pela Eq. (3):

$$\alpha = \frac{\Delta I_{sc}}{\Delta T} \quad (3)$$

O coeficiente (γ) de variação da potência máxima (potência de pico) do módulo com a temperatura é dado pela Eq. (4):

$$\gamma = \frac{\Delta P_{MP}}{\Delta T} \quad (4)$$

Para os demais coeficientes α da corrente de curto circuito e γ da potência máxima do módulo é utilizado a Eq. (2) de forma análoga para encontrar $I_{sc}(T)$ e $P_{MP}(T)$.

Com os coeficientes é possível determinar a potência máxima em função da temperatura com a Eq. (5):

$$P_{MP}(T) = V_{MP}(T) \times I_{MP}(T) \quad (5)$$

Para esta equação o (α) para a I_{sc} e para a I_{MP} são idênticos e que o coeficiente de temperatura da tensão V_{MP} é βV_{MP} (Cantor, 2017).

A temperatura de operação de um módulo fotovoltaico pode ser determinada com um cálculo simplificado em determinadas condições ambientais utilizando a Eq. (6):

$$T_{mod} = T_{amb} + K_t \times G \quad (6)$$

Onde:

$T_{mod}(\text{°C})$ – temperatura do módulo;

$T_{amb}(\text{°C})$ – temperatura ambiente;

$G(\text{W/m}^2)$ – irradiância incidente sobre o módulo;

$K_t(\text{°C/W.m}^2)$ – coeficiente térmico para módulo, podendo ser adotado o valor padrão de 0,03, se não for conhecido.

Com essa equação podemos ver algebricamente que a irradiação influencia diretamente na temperatura do módulo e consequentemente em sua eficiência (Pinho e Galdino, 2014).

Além da irradiação solar existem outros fatores que causam o aumento de temperatura da placa fotovoltaico e um deles é o ponto quente.

2.2. Ponto quente

O ponto quente ou *hot-point* é o fenômeno de falha que consiste no aquecimento generalizado da célula fotovoltaica ou apenas de uma porção da célula que fica sujeita a uma temperatura superior. Os pontos quentes ocorrem em placas fotovoltaicas quando uma ou mais células associadas em série se encontram danificadas ou, na maioria dos casos, sombreadas (Anjos, 2016).

Este sombreamento ou defeito na placa além de causar perda de potência no gerador fotovoltaico, há risco de danos ao módulo parcialmente sombreado, uma vez que o potencial elétrico gerado não está sendo entregue ao consumo e é dissipado no módulo afetado. É com essa energia dissipada que acontece o ponto quente na célula. Esse calor gerado pode causar até ruptura do vidro e fusão de polímeros e metais (Pinho e Galdino, 2014).

Existem outros fatores fora o sombreamento que causam o hot-point:

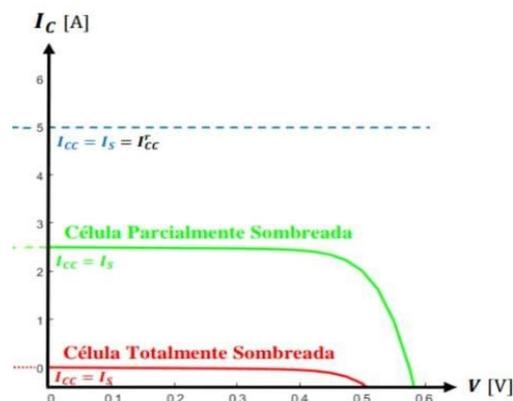
- Defeito das células ou dos módulos;
- Diferentes características técnicas das células ou módulos associados em série (coeficiente térmico alto);
- Instalação incorreta dos módulos;
- Células ou módulos danificados.

Os sistemas fotovoltaicos implementados em ambientes urbanos estão mais sujeitos à ocorrência de sombreamento do que sistemas fotovoltaicos instalados em zonas rurais mais isoladas. Os efeitos do meio ambiente que geralmente dão origem à condição do sombreamento sobre o módulo fotovoltaico são (Anjos, 2016):

- Deposição de folhas, neve, poeiras e dejetos de pássaros;
- Sombras provocadas por nuvens, arvoredos, edifícios e outras estruturas próximas.

Na Fig. 3 é apresentada a queda na corrente e voltagem de uma célula parcialmente e totalmente sombreada.

Figura 3. Curva I-V da célula totalmente e parcialmente sombreada (Anjos, 2016).



O último causador de aumento de temperatura apresentado nessa revisão bibliográfica é causado por influência de ventos em painéis.

2.3. Influência do vento

Na troca de calor entre os módulos fotovoltaicos e o ambiente, existem dois tipos de convecção que atuam nos módulos fotovoltaicos, os quais são a convecção natural e a convecção forçada; esta última é fortemente ligada com a velocidade do vento na vizinhança dos módulos (Cantor, 2017).

A convecção é o modo de transferência de energia entre a superfície sólida e a líquida ou gasosa adjacente em movimento. Quanto mais rápido o movimento do fluido, maior será a transferência de calor por convecção. A convecção forçada acontece quando o fluido é forçado a fluir sobre a superfície por meios externos, como ventilador, bomba ou vento. Quando a velocidade do vento é menor que 1 m/s a convecção é chamada de natural ou livre. A chamada convecção natural acontece se o movimento do fluido é causado por forças de flutuação induzidas por diferença de densidade, decorrente da variação de temperatura no fluido. No caso do ar e do módulo vai acontecer a subida do ar mais quente (e,

portanto, mais leve) próximo à superfície e a descida do ar mais frio (e, portanto, mais pesado) para preencher o seu lugar (Cengel e Ghajar, 2009).

O vento leva as moléculas quentes na superfície do módulo fotovoltaico, tentando equilibrar a temperatura da vizinhança do módulo com a temperatura ambiente. Segundo Tamizh Mani (2003), o vento pode reduzir a temperatura do módulo em até 1,45°C por cada m/s de velocidade do vento. É por isso que se recomenda a instalação de sistemas fotovoltaicos em coberturas de prédios ou casas onde o passar do vento não é interrompido. Quanto maior a altura dos módulos, maior será a velocidade dos ventos e com isso menor a temperatura do módulo e melhor a eficiência (cantor, 2017).

Dessa forma, com a convecção forçada, o calor é removido com o vento e a eficiência do módulo é otimizada. Segundo Skoplaki et. al. (2008), para velocidades do vento entre 1,2 m/s e 4 m/s a temperatura de trabalho do módulo pode diminuir entre 1,6°C e 6,5°C, para valores de irradiação entre 600 e 1000 W/m².

Na Figura 4 é apresentada a variação da velocidade do vento em relação a altura e assim a importância da instalação de módulo em lugares mais altos

Figura 4. Altura x Velocidade média (Hemione e Silva, 2012)



3. METODOLOGIA

O presente artigo baseia-se no método de pesquisa bibliográfica que procura a solução de um problema por meio de referenciais teóricos publicados, analisando e discutindo as contribuições científicas (Boccatto, 2006), visando realizar o estado de arte acerca da temática dos fatores que causam aumento de temperatura em módulos fotovoltaicos e como evitá-los.

Ao realizar pesquisa em artigos, livros, monografias e sites de ambos os temas, foi possível criar um paralelo entre os fatores de geração de energia térmica e métodos de evitar esse aumento de temperatura decorrente e, em seguida, apontar: consequências do aumento de temperatura que causam uma queda na eficiência dos módulos, técnicas e tecnologias para solucionar o aumento de temperatura. Para isso, a pesquisa foi baseada em publicações relevantes na área de energia solar de autores como Kalogirou (2013), Pinho e Galdino (2014), Nascimento (2017), entre outros de grande pertinência.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao analisar que a temperatura causa uma queda na eficiência de módulos fotovoltaicos e fatores que causam o aumento de temperatura, pode-se discutir métodos e ferramentas de solucionar cada um dos fatores citados no presente artigo.

4.1. Irradiação

A irradiação solar que chega ao módulo fotovoltaico varia em relação ao horário, a estação do ano e ao clima do local de instalação, assim é necessário ser feito um estudo de caso da irradiação solar do local aonde o módulo vai ser instalado e um dimensionamento correto para manter o módulo na temperatura nominal de operação (NOCT) (Cantor, 2017).

Caso a irradiação solar no local deixe o módulo fora da temperatura nominal de operação é preciso utilizar outros métodos para diminuir a temperatura do painel. O calor deve ser removido por alguns meios mecânicos, como circulação de ar forçada ou por um coletor térmico utilizando água com contato na parte de trás do módulo. Neste caso o calor pode ser usado para uma vantagem térmica, que é o aquecimento de água, esses sistemas são chamados híbridos, sistemas fotovoltaicos / térmicos (PV / T) (Kalogirou, 2013), abordados também no tópico 4.3.

4.2. Pontos quente

O sombreamento do módulo fotovoltaico que é um dos fatores que causa o ponto quente pode ser prevenido com um bom dimensionamento e limpeza do módulo. A instalação deve ser feita em lugares em que o módulo não fique parcialmente ou totalmente sombreada. o módulo deve ser limpo e preservado para que folhas, neve ou outras sujeiras não acabem bloqueando a incidência da radiação luminosa e assim causando o ponto quente (Carneiro, 2010).

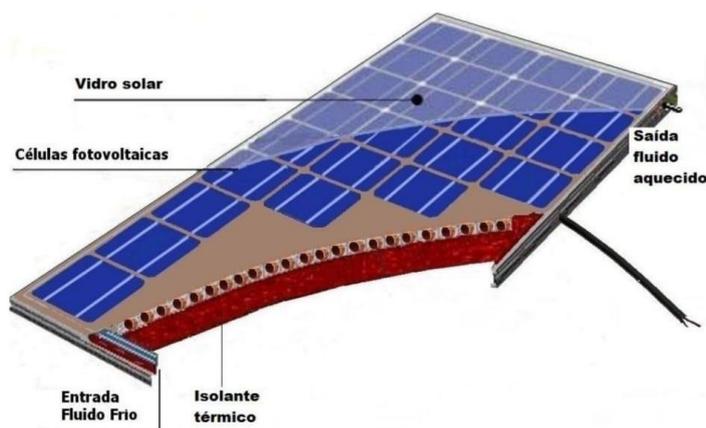
O ponto quente pode ser evitado utilizando o diodo de desvio (*by-pass*), para proteger o módulo que oferece um caminho alternativo para a corrente, assim, limitam a dissipação de potência no conjunto de células sombreadas. Isso reduz a perda de energia, risco de danos irreversível das células afetadas e o aumento de temperatura.

Outro diodo que é usado na proteção dos módulos é o diodo de bloqueio, esse diodo é usado em conexões de módulos ou conjunto de série de módulos em paralelo, e tem a função de impedir o fluxo de corrente de um conjunto série com tensão maior para um com tensão menor (Pinho e Galdino, 2014).

4.3. Influência do vento

Para manter o módulo fotovoltaico sobre a influência de vento uma solução é a instalação em lugares altos, onde a passagem do vento é constante com maior velocidade (Cantor, 2017). Caso não tenha fluxo de vento no ambiente em que o módulo vai ser instalado uma solução para evitar o aquecimento é a utilização de coletores térmicos. No caso dos módulos fotovoltaicos os coletores térmicos usam água ou ar em tubos passando por baixo do módulo fazendo a troca de calor entre o painel e o fluido. Esse esquema é chamado de híbrido (Oliveira, et al, 2017). Na figura 5 é mostrado um esquema do módulo funcionando com um coletor térmico.

Figura 5. Desenho esquemático de um módulo híbrido térmico fotovoltaico (Ancines e Krenzinger, 2016)



Nos sistemas PV/T-líquidos, um coletor térmico é inserido ao módulo PV, ficando na parte inferior do módulo. Geralmente os coletores térmicos são do tipo serpentina ou com tubos paralelos. Esses sistemas melhoram o desempenho do módulo na produção de energia em 4 a 5%.

Assim como no sistema PV/T-líquidos, no sistema PV/T-Ar a parte inferior do módulo sofre resfriamento. Ambos os sistemas são semelhantes, diferindo apenas no fluido utilizado no resfriamento do módulo. O sistema PV/T-Ar são mais baratos devido sua simplicidade (Medeiros, 2017), porém menos eficientes devido as propriedades do ar. O coletor térmico além de aumentar a eficiência do módulo, permite que se aproveite a energia térmica para necessidade diversas, como conforto térmico, aquecimento de água, calor de processo, entre outros.

5. CONCLUSÃO

Dado o potencial da energia fotovoltaica no Brasil e no mundo, o mercado tem procurado formas de otimizar sua utilização. É verificado que os módulos fotovoltaicos perdem eficiência e podem ser danificados com o aumento da temperatura. Os fatores irradiação, ponto quente e influência do vento são alguns dos causadores do aumento de temperatura no módulo que podem ser evitados de várias maneiras. Entre elas o dimensionamento do módulo e limpeza. O aumento de temperatura pode ser usado até como provedor de energia térmica. A tecnologia dos módulos fotovoltaicos vem melhorando e se reformulando com o decorrer do tempo. Os módulos híbridos (PV/T), são um exemplo dessa evolução que tem aumentado a eficiência do módulo e utilizando a energia térmica do módulo para outras finalidades.

Para trabalhos futuros serão realizadas pesquisas e experimentos abordando coletores térmicos de baixo custo para melhorar o rendimento de módulos fotovoltaicos e utilização da energia térmica produzida pelo módulo.

6. REFERÊNCIAS

- ABSOLAR, 2017. Energia Solar Fotovoltaica: Panorama, Oportunidades e Desafios. 06 jun. 2019 <<http://www.aneel.gov.br/documents/10184/15266087/painel+3+ap+7+2017.10.19+ABSOLAR+-+Energia+Solar+Fotovoltaica+-+Dr.+Rodrigo+Lopes+Sauaia.pdf/54f8b161-751b-0639-bd04-77a60cac45c3>>.
- Anjos, R. S. D., 2016. *Análise e simulação de pontos quentes em painéis fotovoltaicos*. Dissertação de mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.
- AWS Truepower, Camargo Schubert Engenheiros Associados, 2018. *Atlas solar: Bahia*. Curitiba: Camargo Schubert; Salvador: SECTI; SEINFRA; CIMATEC/SENAI, FIEB/SENAI
- Bocato, V. R. C., 2006. Metodologia da pesquisa bibliográfica na área odontológica e o artigo científico como forma de comunicação. *Rev. Odontol. Univ. Cidade São Paulo, São Paulo*.
- Cantor, G. A. R., 2017. *Influência dos Fatores Climáticos no Desempenho de Módulos Fotovoltaicos em Regiões de Clima Tropical*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.
- Carneiro, J., 2010. *Electromagnetismo b módulos fotovoltaicos características e associações*. Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J., 2009. *Transferência de Calor e Massa*. Amgh Editora, 4ª edição.
- Kalogirou, S. A., 2013. *Solar energy engineering: processes and systems*. Academic Press.
- Hermione, Drielen; Silva, Jefferson R. Sobral da, 2012. *Estudo da Possibilidade de Implantação do Sistema de Aerogerador para Atender a Necessidade Energética sa Empresa PQA– Produtos Químicos Aracruz LTDA*. Trabalho de conclusão de curso, Faculdades integradas de Aracruz, Aracruz, Espírito Santo.
- Medeiros, R. R. B., 2017. *Estudo de desempenho de um sistema híbrido fotovoltaico/térmico*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte.
- Do Nascimento, C. A., 2004. *Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica*. Monografia de especialização, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais.
- Nascimento, R. L., 2017. *Energia solar no Brasil: situação e perspectivas*. Estudo tecnico, Camara dos Deputados, Brasil.
- Oliveira, Sandra Tatiane Martins, Miranda, Amanda, Klepa, Rogério Bonette, Santana, José Carlos Curvelo, 2017. Energia Híbrida e suas aplicações em sistemas fotovoltaicos. *Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e Sustentabilidade*, São Paulo, p. 06-07.
- Pinho, J. T., & Galdino, M. A., 2014. *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Grupo de Trabalho de Energia Solar (GTES)*. Rio de Janeiro.
- Portal da Energia, 2019. Preços dos painéis soláries fotovoltaico caem a pique. Portal Energia. 05 jul. 2019 <<https://www.portal-energia.com/custos-energia-solar-fotovoltaica-caem-a-pique-146049/>>.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.