

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

RICHARD HEINRICH STAMBUK

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE OPERAÇÃO NO
DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2017

RICHARD HEINRICH STAMBUK

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE OPERAÇÃO NO
DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Monografia de Especialização apresentada ao Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Gerson Máximo Tiepolo

CURITIBA

2017

TERMO DE APROVAÇÃO

RICHARD HEINRICH STAMBUK

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE OPERAÇÃO NO DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Esta Monografia de Especialização foi apresentada no dia 21 de agosto de 2017, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Energia Renováveis – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior
Coordenador de Curso de Especialização em Energias Renováveis

Prof. Romildo Alves dos Prazeres
Chefe do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gerson Máximo Tiepolo
Orientador - UTFPR

Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior
UTFPR

Prof. Esp. Carlos Henrique Karam Salata
UTFPR

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso

Dedico esse trabalho aos meus pais Douglas Stambuk e Zita Stambuk e a minha esposa Isabelle Stambuk pelo apoio durante a realização do curso.

RESUMO

STAMBUK, Richard Heinrich. **Influência da temperatura no desempenho de sistemas fotovoltaicos**. 2017. 57 páginas. Monografia de Especialização em Energias Renováveis - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

A temperatura de operação é um dos principais fatores que influenciam no rendimento de sistemas fotovoltaicos. Nesse trabalho é demonstrado o processo físico que leva ao aquecimento dos módulos fotovoltaicos e as soluções que podem ser adotadas por projetistas para reduzir o impacto da temperatura de operação no desempenho do sistema através da escolha dos materiais, instalação ou através do resfriamento dos módulos com ar ou água. São apresentados também o funcionamento dos painéis fotovoltaicos térmicos híbridos onde o ganho de eficiência na produção de energia elétrica pode chegar a 8% além dos ganhos energéticos através do reaproveitamento do calor gerado pelas células fotovoltaicos que é o grande diferencial desse sistema.

Palavras-chave: 1. Sistemas Fotovoltaicos 2. Temperatura 3. Módulos Híbridos

ABSTRACT

STAMBUK, Richard Heinrich. **Influence of temperature on the performance of photovoltaic systems**. 2017. 57 pages. Renewable Energy Degree Specialization - Federal Technology University - Paraná. Curitiba, 2017.

The operating temperature is one of the main factors influencing the performance of photovoltaic systems. This work demonstrates the physical process that leads to the heating of photovoltaic modules and the solutions that can be adopted by designers to reduce the impact of operating temperature on system performance through choice of materials, installation or by cooling the modules with air or water. The hybrid thermal photovoltaic panels are also shown where the efficiency gain in the production of electric energy can reach 8% in addition to the energy gains through the reuse of the heat generated by the photovoltaic cells, which is the great differential of this system.

Keywords: 1. Photovoltaic Systems 2. Temperature 3. Hybrid Modules (PV/T)

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Radiação solar incidente na Terra	14
Figura 2 - Componentes da radiação solar	15
Figura 3 - Espalhamento dos raios solares em diferentes superfícies	16
Figura 4 - Irradiação solar x Latitude	17
Figura 5 - O espectro solar	18
Figura 6 - Estrutura de bandas de energia em condutores, semicondutores e isolantes	18
Figura 7 - Geração de pares elétron-lacuna pela incidência de fótons no material semicondutor, chamado efeito fotocondutivo.....	19
Figura 8 - Comprimento de onda x Energia.....	20
Figura 9 - Célula fotovoltaica, camadas PN	21
Figura 10 - Limite de Shockley-Queisser.....	22
Figura 11 - Aproveitamento do espectro solar na conversão fotovoltaica	23
Figura 12 - Tecnologias Fotovoltaicas.....	25
Figura 13 - Evolução da tecnologia fotovoltaica x eficiência	26
Figura 14 - Detalhe construtivo do módulo fotovoltaico.....	27
Figura 15 - Vista em corte do painel fotovoltaico.....	28
Figura 16 - Influência da Irradiância da célula fotovoltaica na curva I-V...29	
Figura 17 - Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V	30
Figura 18 - Condições de operação de um módulo instalado na Itália	31
Figura 19 - Comportamento da temperatura de acordo com a montagem	32
Figura 20 - Comportamento da eficiência de diversas tecnologias fotovoltaicas em relação a temperatura de operação.....	33
Figura 21 – a) Potencial energético mundial sem considerar a influência da temperatura de operação; b) Potencial energético mundial considerando a influência da temperatura de operação.....	34
Figura 22 - Potencia relativa em função da temperatura de operação das células fotovoltaicas de acordo com a tecnologia de fabricação	35
Figura 23 - Coeficiente de temperatura após modificação	36

Figura 24 - Balanço de energia global.....	38
Figura 25 - Edifício Solar XXI	39
Figura 26 - Detalhe do módulo fotovoltaico integrado no Edifício Solar XXI	39
Figura 27 - Esquema de funcionamento do sistema fotovoltaico com aproveitamento térmico do Edifício Solar XXI	40
Figura 28 - Modulo PV/T ar	41
Figura 29 - Modelos PV/T ar	41
Figura 30 - Coletor solar hibrido PV/T	42
Figura 31 - Vista em corte de um painel fotovoltaico híbrido com e sem cobertura.	43
Figura 32 - Desenho esquemático de um sistema fotovoltaico hibrido PV/T	44
Figura 33 - Tela do Software TRNSYS.....	45
Figura 34 - Diagrama de blocos para o sistema fotovoltaico hibrido	46
Figura 35 - Bancada de Teste - Coletor Fotovoltaico Térmico	47
Figura 36 - Comparação da eficiência térmica do sistema.....	48
Figura 37 - Comparação do modulo Hibrido x Modulo convencional	49
Figura 38 - Comparação do modulo Hibrido x Modulo convencional durante o ano	49
Figura 39 - Fração Solar.....	50
Figura 40 - Quantidade de módulos fotovoltaicos híbridos necessários para atingir 60% de fração solar por região do Brasil.....	51
Figura 41 - A diferença de eficiência elétrica antes e depois do resfriamento compilada de diversos autores	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens das soluções para resfriamento ..	37
Tabela 2 - Aumento da eficiência fotovoltaica	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	TEMA E SUA DELIMITAÇÃO	11
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS	11
1.3	OBJETIVOS	12
1.3.1	Objetivo Geral.....	12
1.3.2	Objetivos Específicos	12
1.4	JUSTIFICATIVA	12
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	13
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	RADIAÇÃO SOLAR.....	14
2.2	ENERGIA FOTOVOLTAICA.....	17
2.2.1	A radiação solar.....	17
2.2.2	Efeito Fotocondutivo.....	18
2.2.3	Células Fotovoltaicas	20
2.2.4	Limite de Shockley-Queisser.....	22
2.2.5	Tecnologias Fotovoltaicas	24
2.2.6	Painel Fotovoltaico	26
3	DESENVOLVIMENTO	29
3.1	EFEITO DA IRRADIÂNCIA SOLAR	29
3.2	EFEITO DA TEMPERATURA.....	30
3.2.1	Coeficiente de temperatura	34
3.3	SOLUÇÕES ADOTADAS PARA REDUZIR A TEMPERATURA DE OPERAÇÃO.....	36
3.3.1	Painel fotovoltaico-térmico híbrido.....	38
3.3.2	Painel fotovoltaico-térmico híbrido/ar.....	38
3.3.3	Painel fotovoltaico híbrido/água.....	42
4	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

O aumento da demanda energética mundial e a preocupação com a preservação do meio ambiente está impulsionando ao desenvolvimento e implantação de tecnologias alternativas de energia menos poluentes, renováveis e com pouco impacto ambiental (Pereira *et al.*, 2006).

Dentre as tecnologias que estão sendo implantadas para este fim, se destaca a energia solar. O Brasil por ser um país localizado na sua maior parte na região intertropical, possui um grande potencial para o aproveitamento da energia solar durante todo ano (PEREIRA *et al.*, 2006).

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (efeito fotovoltaico), sendo a célula fotovoltaica, um dispositivo semicondutor, a unidade fundamental desse processo de conversão (PINHO e GALDINO, 2014).

É conhecido que a temperatura afeta o desempenho dos painéis fotovoltaicos, mas a pesquisa no campo da energia elétrica fotovoltaica tem sido principalmente focada na redução de perdas óticas e elétricas (DUPRÉ *et al.*, 2016).

O estudo da influência da temperatura de operação se torna ainda mais relevante se for observar que após um domínio europeu na implantação da tecnologia, que tendem a operar em uma temperatura mais baixa devido a suas características climáticas, países em desenvolvimento situados em regiões mais próximas da linha do equador e com média de temperatura mais altas estão se destacando na implantação da energia fotovoltaica como China, Índia, México e países do Oriente Médio (SOLAR POWER EUROPE, 2016).

Fabricantes de módulos fotovoltaicos apresentam seu produto destacando a potência de saída através do STC (*Standard Test Conditions*) onde a temperatura da célula opera a 25° C, temperatura que não é constante em um cenário real. Essa temperatura tipicamente esta situada entre 20° C à 40° C maior que a temperatura ambiente (OVERSTRAETEN e MERTENS, 1996). Apesar de nas folhas de dados do produto alguns fabricantes também informarem suas características à temperatura nominal de operação da célula (NOTC), projetistas podem facilmente cometer um erro por não levar em consideração a temperatura e subdimensionar a planta, já que

a queda de rendimento pode representar, por exemplo, 0,5% por grau Celsius acima da STC para os módulos de silício cristalino (PINHO E GALDINO, 2014).

Desta forma, é necessário conhecer os motivos que levam a esse aumento de temperatura para que os projetistas possam tomar ações para minimizar os efeitos da temperatura no desempenho da planta fotovoltaica e maximizar o desempenho energético.

1.1 TEMA E SUA DELIMITAÇÃO

O tema deste projeto está relacionado a demonstrar a influência da temperatura no desempenho de sistemas fotovoltaicos, analisar a causa desse problema e demonstrar algumas medidas adotadas para a redução da temperatura de operação através de sistemas fotovoltaicos térmicos híbridos.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Os fabricantes de módulos fotovoltaicos geralmente divulgam as características elétricas de seus produtos testados sob a STC (Condição padrão de teste) onde a temperatura da célula é submetida a 25° C. Pesquisadores afirmam que os módulos fotovoltaicos podem operar com uma temperatura de 20° C a 40° C maior que a temperatura ambiente. Esse aumento significativo de temperatura leva a uma queda de rendimento na ordem de 0,5% por cada ° C acima dos 25° C. É necessário conhecer os motivos dessa queda de rendimento e as possíveis ações mitigadoras para um melhor desempenho do sistema. Sistemas fotovoltaicos híbridos que utilizam água como meio refrigerante, tendem a ter melhor desempenho do que os sistemas fotovoltaicos convencionais, uma vez que as células trabalham em uma temperatura mais baixa, diminuindo as perdas no sistema.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar a influência da temperatura de operação no desempenho de sistemas fotovoltaicos e pesquisar as soluções adotadas no mercado de forma a minimizar estas perdas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Revisar a bibliografia relacionada ao tema da monografia;
- Apresentar a causa do aumento de temperatura de um sistema fotovoltaico;
- Apresentar as soluções mais utilizadas no mercado para reduzir o efeito da temperatura no desempenho do sistema fotovoltaico;

1.4 JUSTIFICATIVA

O responsável pelo projeto de um sistema fotovoltaico deve conhecer a influência da temperatura ambiente no sistema para que possa inserir essa variável no cálculo do desempenho final do sistema. Algumas ações para diminuir a influência da temperatura no rendimento da planta estão sendo tomadas atualmente, de forma a melhorar o desempenho geral do sistema. Por outro lado, cabe ao projetista a decisão de dimensionar um sistema maior assumindo essa perda de rendimento em função do aumento da temperatura, de forma a garantir a geração de energia que o cliente contratou, o que não é uma tarefa simples.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Quanto ao procedimento de pesquisa adotado, considera-se este trabalho uma pesquisa aplicada, Segundo Gil (2010, p. 27) “está voltada a aquisição de conhecimento com vistas à aplicação numa situação específica”.

O trabalho também foi desenvolvido com base em pesquisa bibliográfica e documental, conforme definição de Marconi e Lakatos (2010), a pesquisa referente a influência da temperatura no desempenho de plantas fotovoltaicas.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

As etapas observadas no desenvolvimento desse trabalho consistem em:

Capítulo 1: É apresentada a introdução do trabalho, o tema da pesquisa, definido os problemas e premissas, os objetivos a serem alcançados, justificativas e a metodologia adotada.

Capítulo 2: É apresentada a fundamentação teórica onde descreverá o embasamento teórico da pesquisa como o funcionamento da célula fotovoltaica e suas principais características.

Capítulo 3: É o desenvolvimento no trabalho onde é demonstrado a influência da temperatura no desempenho de sistemas fotovoltaicos apresentando suas causas, consequências e medidas adotadas para reduzir a temperatura de operação do módulo fotovoltaico.

Capítulo 4: Neste capítulo é apresentado as considerações finais e conclusão.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

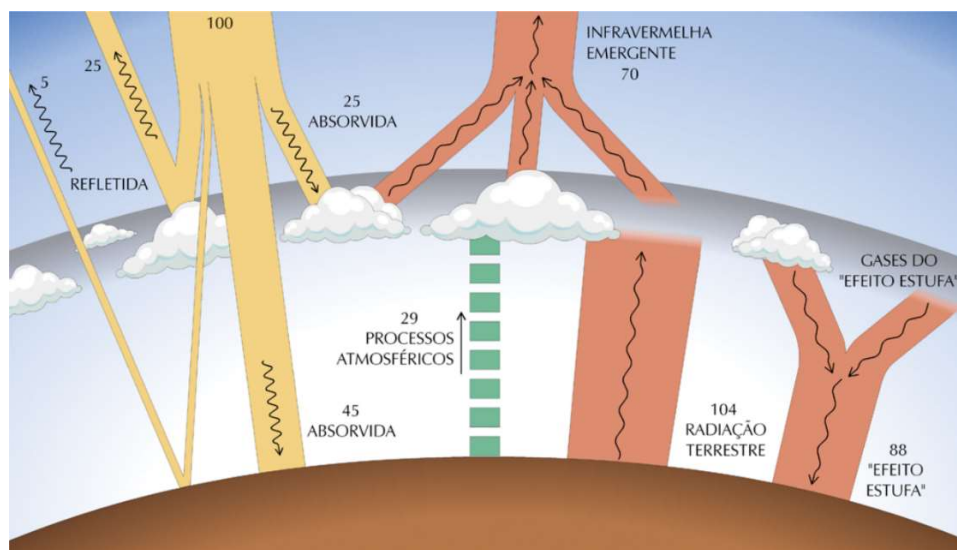
Este capítulo tem como objetivo demonstrar como a energia solar fotovoltaica é gerada, características das tecnologias fotovoltaicas existentes e fatores que podem influenciar na geração de energia fotovoltaica.

2.1 RADIAÇÃO SOLAR

O conhecimento da radiação solar incidente na Terra desempenha papel fundamental em muitas atividades humanas como, por exemplo, na agricultura, na arquitetura e no planejamento energético. A radiação solar constitui uma opção limpa e renovável de produção de energia (PEREIRA *et al.*, 2006).

Ao atravessar a atmosfera, a radiação solar é atenuada por processos físicos decorrentes das características da atmosfera e superfície do planeta. As nuvens, os gases, partículas atmosféricas e a superfície refletem cerca de 30% da radiação incidente no topo da atmosfera e apenas 45% é absorvida pela superfície terrestre conforme demonstrado na Figura 1 (PEREIRA *et al.* 2006).

Figura 1 - Radiação solar incidente na Terra

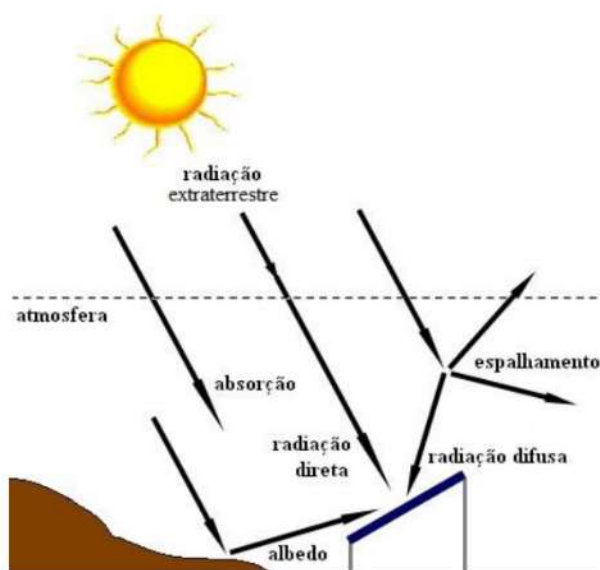


Fonte: Pereira *et al.* (2006)

Segundo Pinho e Galdino (2014) a radiação solar que chega à superfície terrestre e incidente sobre uma superfície receptora para geração de energia, tem-se que ela é constituída por uma componente direta (ou de feixe) e por uma componente difusa. A radiação direta é aquela que provêm diretamente da direção do Sol e produz sombras nítidas. A difusa é aquela proveniente de todas as direções e que atinge a superfície após sofrer espalhamento pela atmosfera terrestre. Mesmo num dia totalmente sem nuvens, pelo menos 20% da radiação que atinge a superfície é difusa. Já em um dia totalmente nublado, não há radiação direta, e 100% da radiação é difusa. Se a superfície estiver inclinada com relação à horizontal, haverá uma terceira componente refletida pelo ambiente do entorno (solo, vegetação, obstáculos, terrenos rochosos, etc). Este coeficiente de reflexão destas superfícies é denominado “albedo”.

A Figura 2 apresenta as componentes citadas da radiação solar sobre uma superfície receptora, sendo que a resultante da soma das parcelas direta, difusa e devido ao albedo (quando a superfície é inclinada) é denominada radiação global.

Figura 2 - Componentes da radiação solar



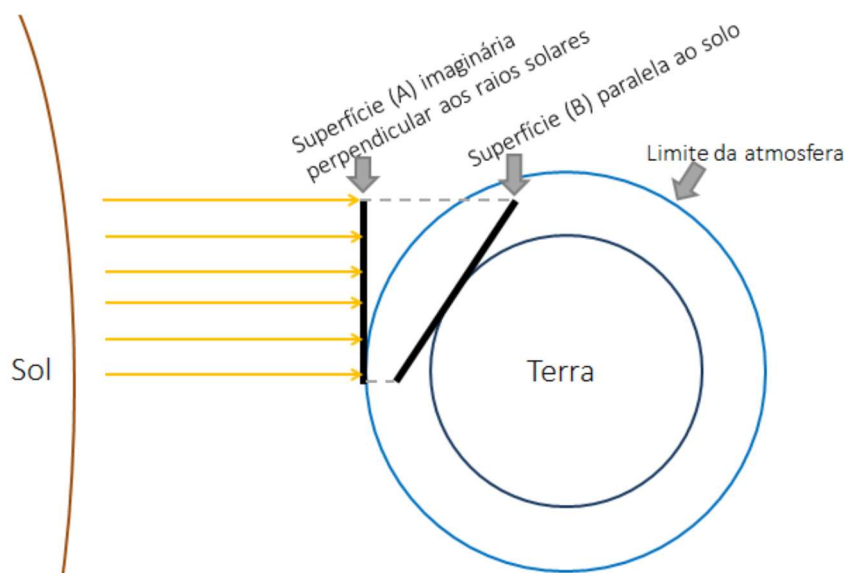
Fonte: Pinho e Galdino (2014)

O recurso solar não pode ser considerado como constante dada sua variação ao longo do tempo de acordo com a localidade. Grande parte destas variações se deve à geografia terrestre e seus movimentos astronômicos de rotação e translação, os quais possibilitam certa previsibilidade do recurso. No entanto, a estas variações

somam-se aquelas causadas por fenômenos climáticos, as quais são mais difíceis de prever (TOMASQUIM, 2016).

Dadas as proporções entre o Sol e a Terra, é possível afirmar que os raios solares atingem a Terra paralelamente, e com uma intensidade praticamente constante numa superfície imaginária perpendicular aos raios, na borda da atmosfera terrestre. No entanto, nem toda superfície na Terra é perpendicular aos raios solares, o que diminui a irradiância num plano horizontal. Como pode ser visto na Figura 3, a incidência solar que atinge as duas superfícies é a mesma. Porém, a área da superfície B é maior que a superfície A, fazendo com que a intensidade por unidade de área (irradiância) na superfície B seja menor. Esse fenômeno é conhecido como efeito cosseno (TOMASQUIM, 2016).

Figura 3 - Espalhamento dos raios solares em diferentes superfícies

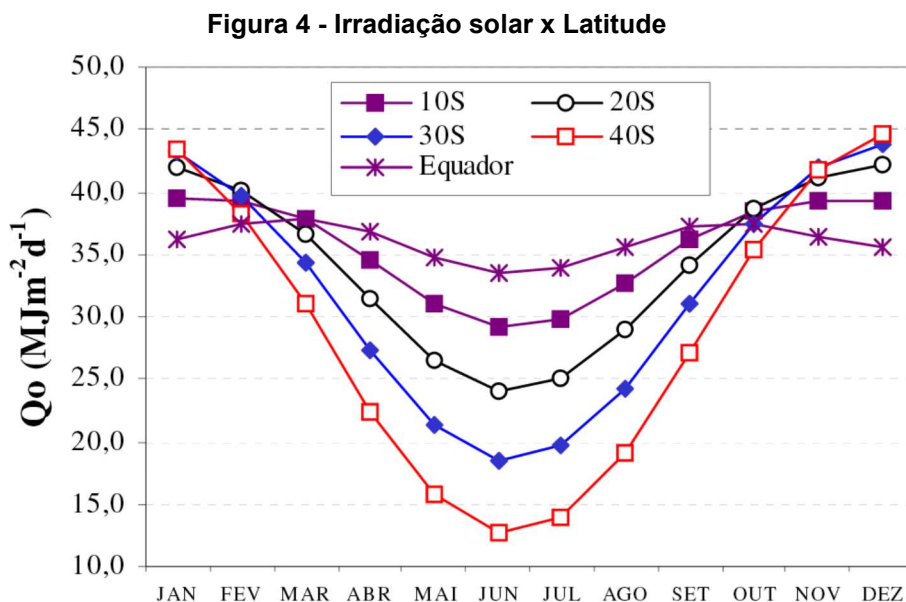


Fonte: Tomasquim (2016)

Assim sendo, regiões próximas à linha do equador apresentam menor variação da irradiação ao longo do ano, enquanto localidades em grandes latitudes apresentam os maiores valores de irradiação em meses do verão, mas durante o inverno apresentam os menores, de modo que a energia anual total recebida seja menor nas maiores latitudes (TOMASQUIM, 2016).

A irradiância solar varia de acordo com a posição terrestre e conseqüentemente, o ângulo de incidência dos raios solares, conforme demonstrado por Tomasquim (2016) onde é representada a linha do equador e as latitudes em referência a

quantidade de energia captada, expressa em megajoule por metro quadrado por dia ($\text{MJ}/\text{m}^2.\text{dia}$) na Figura 4.



Fonte: Tomasquim (2016)

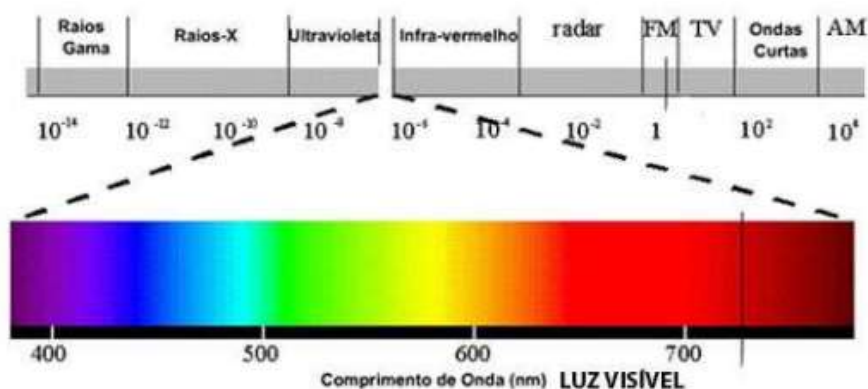
2.2 ENERGIA FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz do sol em eletricidade e tem como base o efeito fotovoltaico. O efeito fotovoltaico, relatado por Edmond Becquerel em 1839, é o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz (TOMASQUIM 2016).

2.2.1 A radiação solar

A radiação solar é recebida na superfície da Terra em sua grande parte (43%) na região visível da radiação eletromagnética, possuindo parcelas ultravioleta e infravermelha, onde cada comprimento de onda corresponde a uma frequência e a uma energia. Quanto menor o comprimento de onda, maior é o índice de frequência e da energia. Uma pequena parcela do espectro de radiação solar é em forma de luz visível, outras faixas são de raios infravermelhos e ultravioletas, conforme ilustra a Figura 5 (SOBRINHO, 2016):

Figura 5 - O espectro solar



Fonte: Sobrinho (2016)

2.2.2 Efeito Fotocondutivo

A radiação solar incidente sobre uma célula fotovoltaica compreende a faixa da radiação infravermelho ($\sim 0,5\text{eV}$) à radiação ultravioleta ($\sim 2,9\text{eV}$). A energia necessária para um elétron deslocar-se da Banda de Valência à Banda de Condução é denominada de Energia de *Gap* ou somente pelo termo Bandgap. Essa energia varia de material para material, onde em materiais condutores esse valor é zero. Para os materiais isolantes é necessária a energia de pelo menos 3eV , e para os materiais semicondutores, o valor de energia varia de zero a 3eV . A faixa intermediária entre as Bandas de Condução e Valência é denominada de Banda Proibida (PINHO e GALDINO, 2014).

Figura 6 - Estrutura de bandas de energia em condutores, semicondutores e isolantes

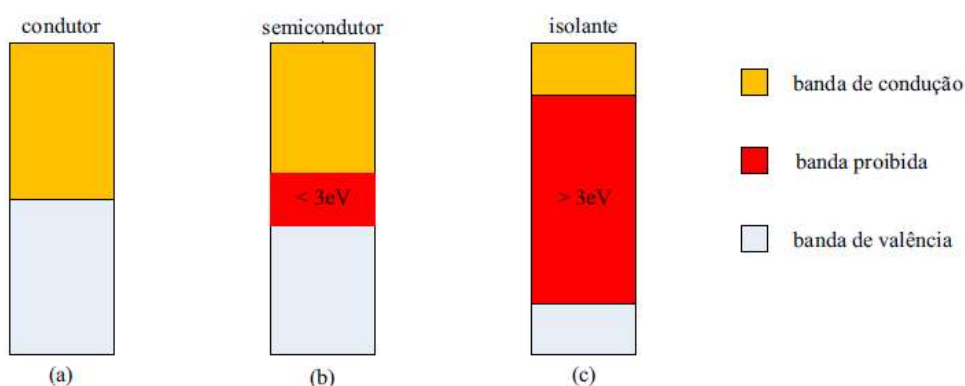


Figura 3.2 - Estrutura de bandas de energia em (a) condutores, (b) semicondutores e (c) isolantes.

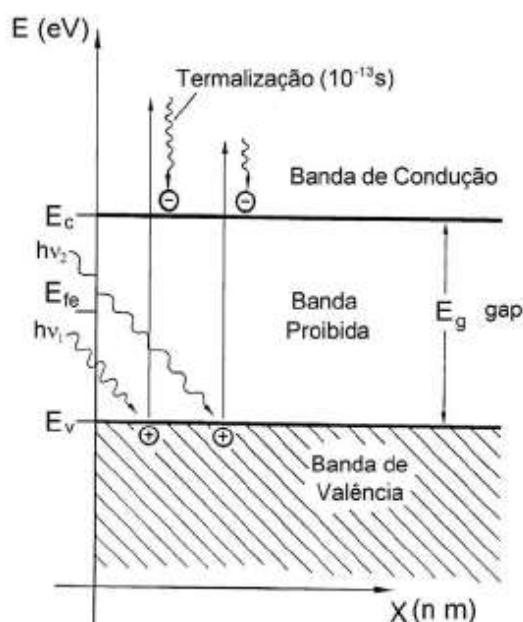
Fonte: Pinho e Galdino (2014)

Para que um elétron de um material semiconductor possa sair da sua camada de valência, é necessária uma determinada absorção de energia, levando-o a atingir um nível mais alto de energia de condução. Essa quantidade de energia é chamada de energia de banda de zona proibida ou *Bandgap*. (PINHO E GALDINO, 2014)

Em função da existência de bandas de energia, uma característica importante dos semicondutores é o aumento da condutividade com a temperatura, proporcionado pela excitação térmica dos elétrons de banda de valência para a banda de condução, deixando na banda de valência lacunas, as quais constituem portadores de carga positiva, todavia, é cerca de um terço da dos elétrons na banda de condução. Assim para temperaturas superiores a 0 K, há sempre no semiconductor um certo número de elétrons ocupando a banda de condução e o mesmo número de lacunas na banda de valência, denominado portadores intrínsecos (PINHO e GALDINO, 2014).

Os elétrons preenchem os níveis de energias vagos a partir do fundo da banda de condução para cima. As lacunas ocupam os níveis a partir do topo da banda de valência para baixo conforme é mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Geração de pares elétron-lacuna pela incidência de fótons no material semiconductor, chamado efeito fotocondutivo

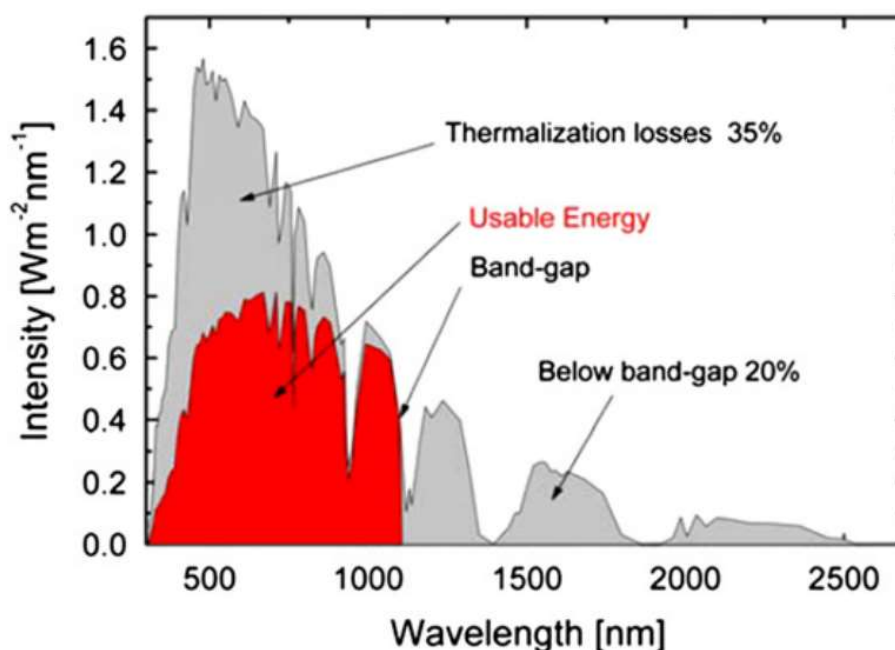


Fonte: Pinho e Galdino (2014)

Como o espectro de luz é formado por diversos níveis de energia, nem todos os comprimentos de onda poderão ser aproveitados no efeito fotocondutivo. Dessa forma, fótons com menos energia que o *bandgap* passarão direto pela célula solar, como por exemplo, as ondas de rádio que não possuem energia suficiente e logo não desempenharam papel na conversão fóton-elétron e são representados na Figura 7. A absorção de fótons com energia superior ao *bandgap* resulta em dissipação de energia em excesso como calor no material, fenômeno denominado termalização que também pode ser observado na Figura 7.

Na Figura 8, Goldschmidt (2009) demonstra que mais de 55% da energia é perdida através da termalização ou através da falta de energia para a conversão fóton-elétron. A cor vermelha indica os fótons que podem ser absorvidos e geram eletricidade em células fotovoltaicas.

Figura 8 - Comprimento de onda x Energia



Fonte: Goldschmidt (2009)

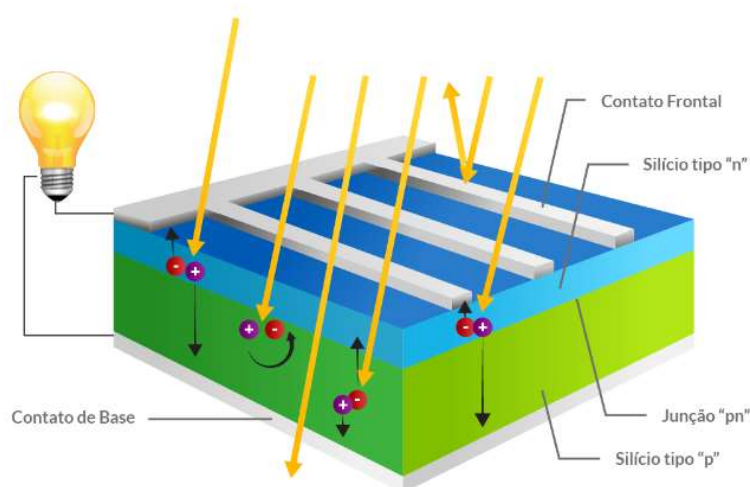
2.2.3 Células Fotovoltaicas

As células fotovoltaicas são fabricadas com material semicondutor, ou seja, material com características intermédias entre um condutor e um isolante. Através de métodos adequados obtém-se o silício em forma pura. O cristal de silício puro não

possui elétrons livres e, portanto é mau condutor elétrico. Para alterar isto acrescentam-se porcentagens de outros elementos. Este processo denomina-se dopagem. A dopagem do silício com o fósforo obtém-se um material com elétrons livres ou materiais com portadores de carga negativa (silício tipo N). Realizando o mesmo processo, mas agora acrescentado Boro ao invés de Fósforo, obtém-se um material com características inversas, ou seja, falta de elétrons ou material com cargas positivas livres (silício tipo P). Cada célula solar compõe-se de camada fina de material tipo N e outra com maior espessura de material tipo P (NASCIMENTO, 2004).

Separadamente, ambas as capas são eletricamente neutras. Mas ao serem unidas, na região P-N, forma-se um campo elétrico devido aos elétrons livres do silício tipo N que ocupam os vazios da estrutura do silício tipo P. Ao incidir luz sobre a célula fotovoltaica, os fótons chocam-se com outros elétrons da estrutura do silício fornecendo-lhes energia e transformando-os em condutores. Devido ao campo elétrico gerado pela junção P-N, os elétrons são orientados e fluem da camada “P” para a camada “N”. Por meio de um condutor externo, ligando a camada negativa à positiva, gerando um fluxo de elétrons (corrente elétrica) conforme ilustrado na Figura 9. Enquanto a luz incidir na célula, manter-se-á este fluxo. A intensidade da corrente elétrica gerada variará na mesma proporção conforme a intensidade da luz incidente. Uma célula fotovoltaica não armazena energia elétrica. Apenas mantém um fluxo de elétrons estabelecidos num circuito elétrico enquanto houver incidência de luz sobre ela (NASCIMENTO, 2004).

Figura 9 - Célula fotovoltaica, camadas PN

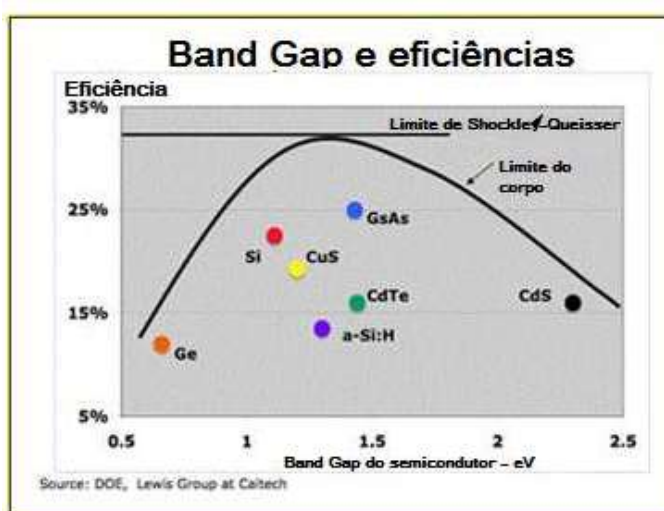


Fonte: Souza (2016)

2.2.4 Limite de Shockley-Queisser

A máxima eficiência da conversão de luz em eletricidade da célula fotovoltaica com monojunção para determinado espectro de luz é conhecido como o limite de eficiência de Shockley-Queisser, calculado em 1961 indicou uma eficiência de 30% mas recentemente, através de ensaios mais modernos foi encontrado o limite de 33% para qualquer tipo de célula (RUHLE, 2016). As eficiências atingidas de acordo com a tecnologia utilizada podem ser vistas na Figura 10 (SOBRINHO, 2016).

Figura 10 - Limite de Shockley-Queisser



Fonte: Sobrinho (2016)

Os 67% da energia perdida são em sua grande parte em forma de calor, porém há perdas devido ao não aproveitamento de todo o espectro solar e também pela recombinação de pares elétron-buracos

A Figura 11 ilustra os índices percentuais de energia demonstra que da relação de 100% da radiação solar incidente sobre uma célula fotovoltaica, parcelas são dispersas no processo, onde 25% dessa não têm índice quantitativo suficiente para desencadear a processo de transferência de elétrons entre as bandas de valência e condução. Outros 30% da radiação solar incidente apresentam índices de energia muito acima do assimilável pela estrutura material da célula, dessa forma e energia é transformada em calor. Apenas a faixa correspondendo ao espectro da radiação ultravioleta, correspondendo a uma parcela em torno de 45% de todo o espectro da radiação solar incidente é assimilada pela célula fotovoltaica, onde 15% é consumido pela recombinação dos pares elétrons-lacunas no material. Um índice de 5% a 8% da

utiliza-se de técnicas de texturização e anti-reflexão para minimizar os efeitos de perdas por reflexão (GHENSEV, 2006).

Existem estratégias com o objetivo de aumentar o limite Shockley-Queisser, que são (SOBRINHO, 2016):

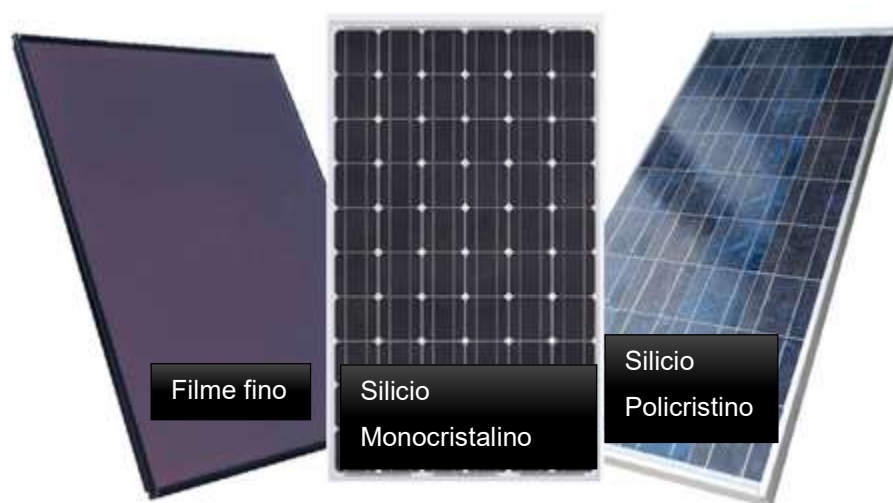
- Usar mais de um material semiconductor por célula.
- Usar mais de uma junção por célula, chamadas de células tandem ou multijunção.
- Aumentar a concentração das células solares através de lentes.
- Associar a célula fotovoltaica com uma tecnologia de aquecimento para captar as duas formas de energia.
- Utilizar pontos quânticos para absorver os excessos das energias dos fótons em eletricidade.

2.2.5 Tecnologias Fotovoltaicas

Diversas tecnologias de fabricação de células fotovoltaicas foram desenvolvidas nas últimas décadas, mas as células fotovoltaicas fabricadas a partir de lâminas de silício cristalino (monocristalino ou policristalino), que representam a primeira geração da tecnologia, dominam o mercado mundial representando 90% da produção de células fotovoltaicas em 2014. Além das células de silício outras células laminadas são baseadas em Arseneto de Gálio (GaAs), um semiconductor que apresenta desempenho superior ao silício, mas esse tipo de célula apresenta um custo mais elevado, sendo utilizado somente em aplicações específicas (TOMASQUIM, 2016).

A segunda geração comercializada é denominada de filmes finos, que consistem em camadas de materiais semicondutores depositados sobre um substrato isolante, como vidro ou plástico flexível. As tecnologias disponíveis atualmente são baseadas em telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS), silício amorfo hidrogenado (a-Si:H). Sua utilização em maior escala é dificultada pela falta de disponibilidade dos materiais, vida útil, rendimento das células se a toxicidade (cadmio) (PINHO e GALDINO, 2014).

Na Figura 12 pode-se observar o aspecto do painel fotovoltaico das tecnologias existentes da primeira e segunda geração.

Figura 12 - Tecnologias Fotovoltaicas

Fonte: Adaptado de www.exsolar.co.za

As células de silício monocristalino são as mais eficientes e produzidas em larga escala. São células rígidas e quebradiças, que precisam ser montadas em painéis para adquirir resistência mecânica para o uso prático. Alcançam eficiência de 15% a 18%, mas têm um custo de produção mais elevado do que outros tipos de células (VILLALVA, 2015).

As células de silício policristalino apresentam manchas devido ao tipo de silício empregado em sua fabricação. As descontinuidades da estrutura molecular dificultam o movimento de elétrons e encorajam a recombinação com as lacunas, o que reduz a potência de saída. Possuem eficiência entre 13% e 15%, e seu custo de fabricação é menor do que as células monocristalinas, tendo melhor relação custo benefício (VILLALVA, 2015).

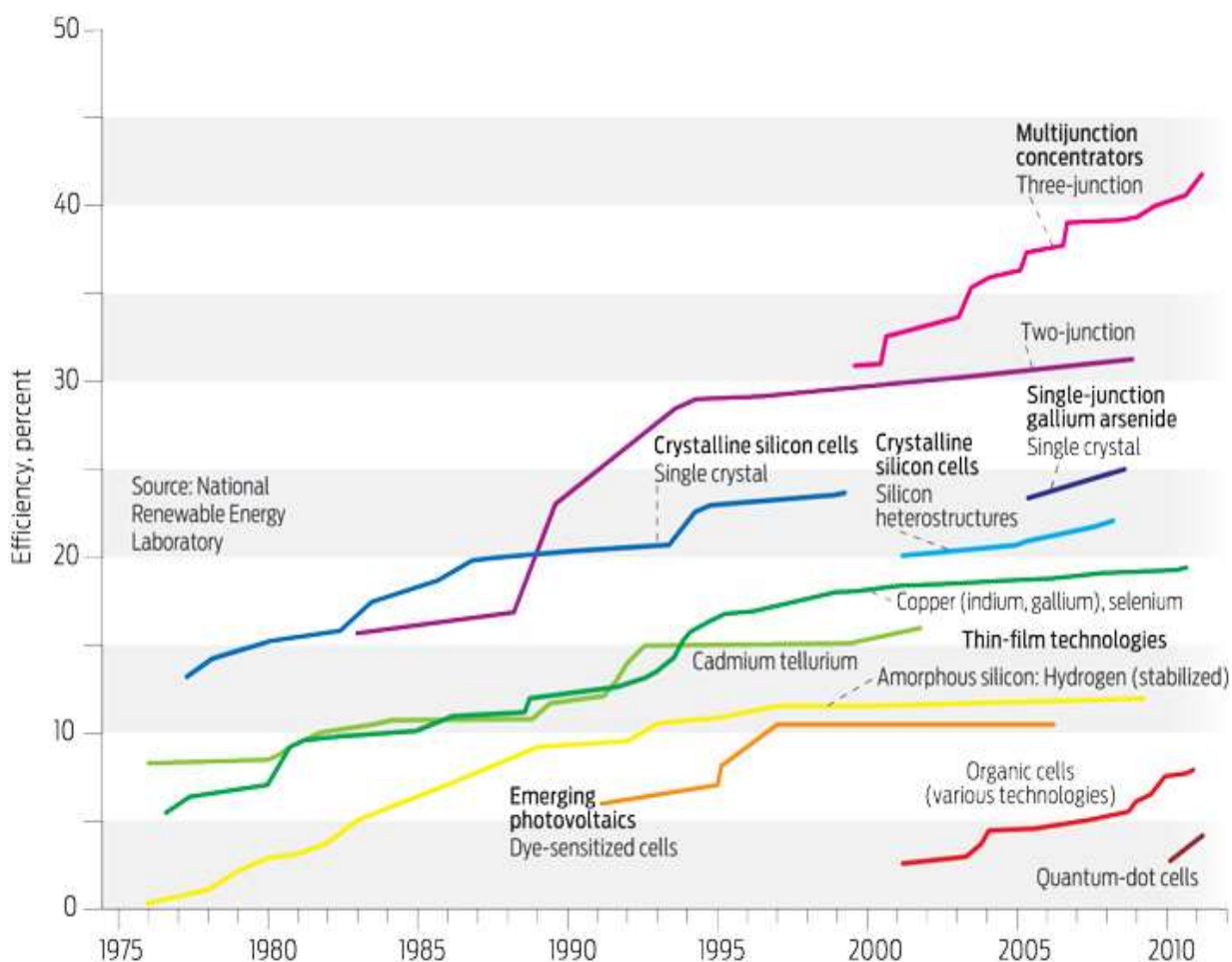
O desenvolvimento das células fotovoltaicas tem demonstrado uma grande evolução nos últimos anos. Segundo o relatório *Photovoltaics Report*(2017), a eficiência das células de silício monocristalino atingiu 26,7% enquanto a eficiência para células de filme finos CIGS atingiu 21,7% e 21% para células de CdTe, todos esses testes foram realizados em laboratório.

A terceira geração ainda está em fase de pesquisa e desenvolvimento e as células fotovoltaicas multijunção tem apresentado uma evolução significativa em

laboratório, chegando a mais de 40% de eficiência nos últimos experimentos (PINHO e GALDINO, 2014).

A Figura 13 demonstra a evolução da eficiência das tecnologias fotovoltaicas em testes de laboratório ao longo do tempo:

Figura 13 - Evolução da tecnologia fotovoltaica x eficiência

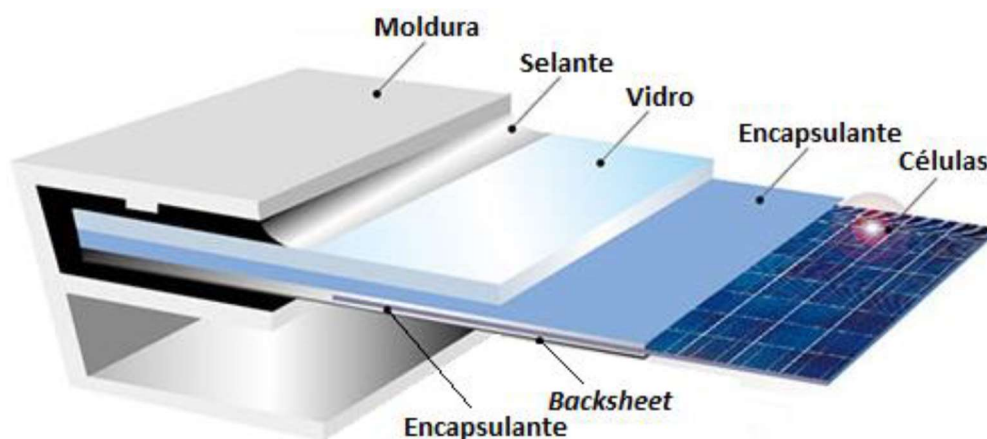


Fonte: Adaptado de <http://uk.solarcontact.com>

2.2.6 Painel Fotovoltaico

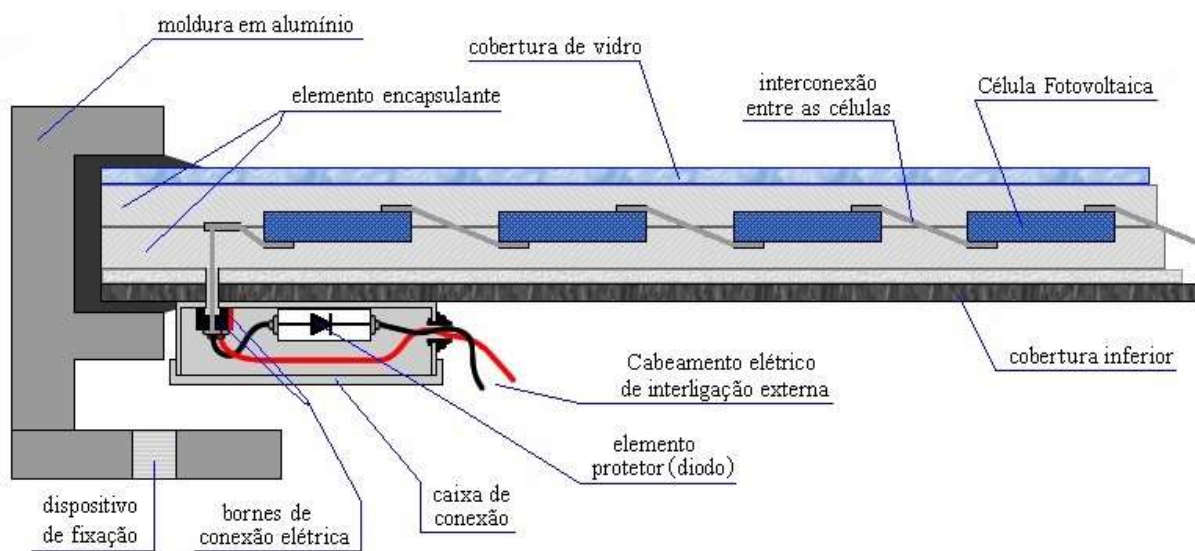
O elemento principal para a geração fotovoltaica é a célula fotovoltaica. Porém, o aproveitamento em escala comercial desse tipo de energia se faz com a utilização de várias células conectadas entre si e que formam o módulo fotovoltaico, como ilustrado nas Figuras 14 e 15:

Figura 14 - Detalhe construtivo do módulo fotovoltaico



Fonte: Tomasquim (2016)

- **Moldura:** parte externa estruturante do módulo, geralmente de alumínio. É através dela que é feita a fixação do módulo.
- **Selante:** composto adesivo usado para unir as camadas internas do módulo com a moldura. Deve impedir a entrada de gases e umidade, além de proteger o interior de vibrações e choques mecânicos.
- **Vidro:** camada rígida externa que protege as células e condutores do ambiente, ao mesmo tempo em que permite a entrada de luz para ser convertida em eletricidade. É um vidro especial, com baixo teor de ferro, com uma camada anti-reflexiva, e com superfície texturizada, que evitam a reflexão da luz que atinge o vidro.
- **Encapsulante:** filme que envolve as células, protegendo-as da umidade e dos materiais externos, além de otimizar a condução elétrica. O encapsulante mais utilizado é o EVA (*Etil Vinil Acetato*) (TOMASQUIM, 2016).
- **Células Fotovoltaicas:** componente eletrônico responsável pela conversão direta da energia eletromagnética em energia elétrica.
- **Backsheet:** parte inferior do módulo que previne a entrada de umidade e protege as células de elementos externos. Além disso, oferece isolamento elétrico adicional. O Tedlar® é o material base mais utilizado para confecção do *backsheet* (TOMASQUIM, 2016).

Figura 15 - Vista em corte do painel fotovoltaico

Fonte: Ghensev (2006)

3 DESENVOLVIMENTO

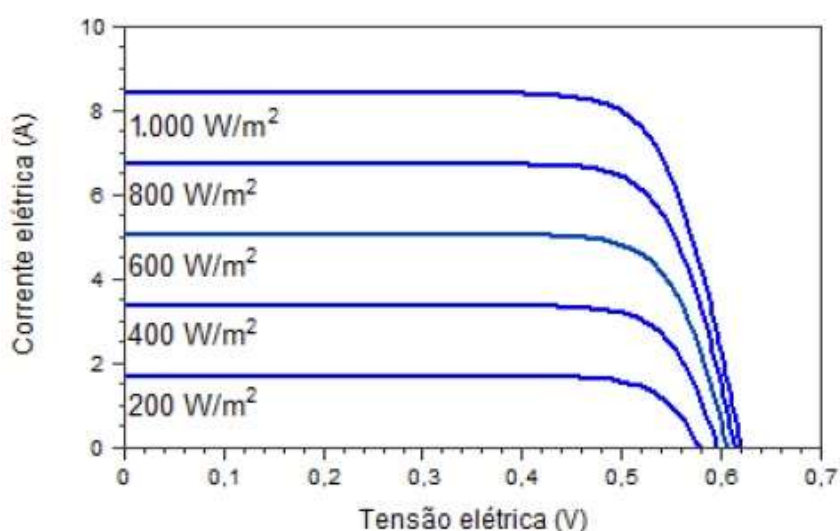
Neste capítulo será demonstrado como a temperatura afeta o desempenho fotovoltaico e as medidas adotadas atualmente para melhorar o rendimento do sistema fotovoltaico.

3.1 EFEITO DA IRRADIÂNCIA SOLAR

Além do efeito da temperatura que será discutido com mais detalhes do desenvolvimento desse trabalho, outro parâmetro externo que influencia no desempenho dos módulos fotovoltaicos é a irradiância solar.

A Figura 16 mostra como a irradiância solar incidente afeta a curva I-V (corrente x tensão) de uma célula fotovoltaica de silício, mantida a temperatura de 25° C. A corrente elétrica gerada por uma célula fotovoltaica aumenta linearmente com o aumento da irradiância solar incidente, enquanto a tensão de circuito aberto (V_{oc}) aumenta de forma logarítmica, se mantida a mesma temperatura (PINHO e GALDINO, 2014).

Figura 16 - Influência da Irradiância da célula fotovoltaica na curva I-V



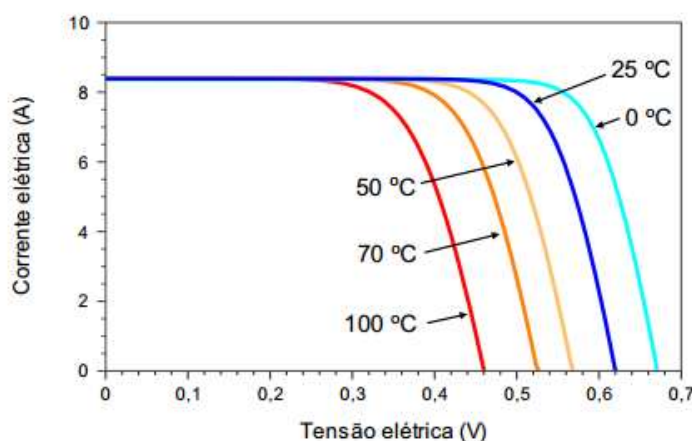
Fonte: Pinho e Galdino (2014)

3.2 EFEITO DA TEMPERATURA

Conforme demonstrado na sessão 2.2.2 o excesso de energia nos comprimentos de onda mais baixo da luz, próximo ao espectro da luz ultra-violeta, são responsáveis pelo fenômeno da termalização, quando há a dissipação de energia nas células fotovoltaicas em forma de calor.

A incidência de radiação e a variação da temperatura ambiente implicam em uma variação de temperatura nas células que compõe o módulo. Pinho e Galdino (2014) afirmam que com o aumento da temperatura das células há uma evidente diminuição no nível de tensão. Ao mesmo tempo, o ganho na corrente é quase imperceptível e, assim sendo, a potência de saída do painel é afetada conforme o gráfico na Figura 17.

Figura 17 - Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V



Fonte: Pinho e Galdino (2014)

Um módulo fotovoltaico converte de 4 à 17% da radiação solar em eletricidade, dependendo do tipo de tecnologia fotovoltaica e das condições de trabalho. Em outras palavras, mais de 30% da energia depositada sobre o painel solar é convertida em calor (GHENSEV, 2006). Isso pode levar o painel fotovoltaico a operar em temperaturas elevadas e podem ocorrer duas consequências indesejáveis: queda da eficiência da célula e dano estrutural permanente do módulo se houver estresse térmico contínuo.

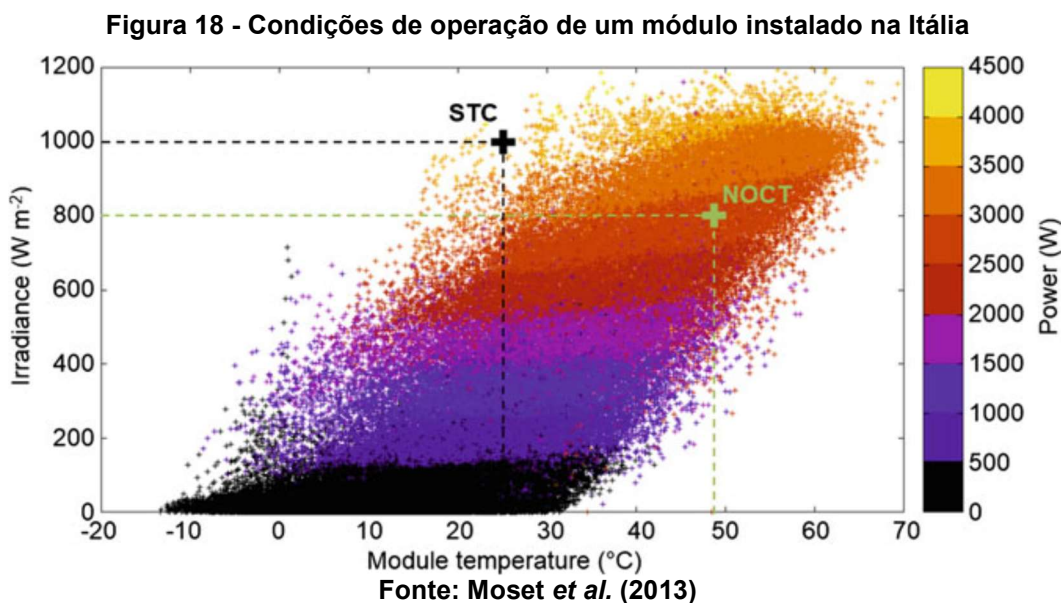
As características elétricas dos módulos são geralmente estimadas de acordo com sua potência máxima de saída, sob condições de teste padrão (STC - *Standard Test Conditions*), ou seja: irradiância solar 1000W/m², temperatura da célula de 25° C e

massa de ar $AM=1,5$. Essa temperatura é atingida normalmente em pequenos intervalos de tempo, e em dias de céu claro, a temperatura da célula é tipicamente entre 20°C a 40°C superior a temperatura ambiente. Para complementar as informações do desempenho elétrico em STC, alguns fabricantes informam também suas características à temperatura nominal de operação da célula (NOCT - *Nominal Operation Cell Temperature*), definida com condições nominais de operação com irradiância de 800 W/m^2 , temperatura ambiente de 20°C , distribuição espectral para uma massa de ar $AM=1,5$, velocidade do vento de 1 m/s e temperatura das células em torno de 45°C (OVERSTRAETEN e MERTENS, 1996).

A NOCT pode ser utilizada para quantificar a habilidade dos módulos para dissipar calor. Essa temperatura é determinada com o painel operando com a tensão de circuito aberto com a parte traseira do painel exposta ao ar livre (*open-rack*) nas condições ambientais descritas acima (Ross e Gonzalez 1980).

A Figura 18 mostra os dados de campo da potência de saída *versus* a temperatura do módulo e a irradiância de um painel de silício policristalino instalado na Itália (MOSER *et al*, 2013).

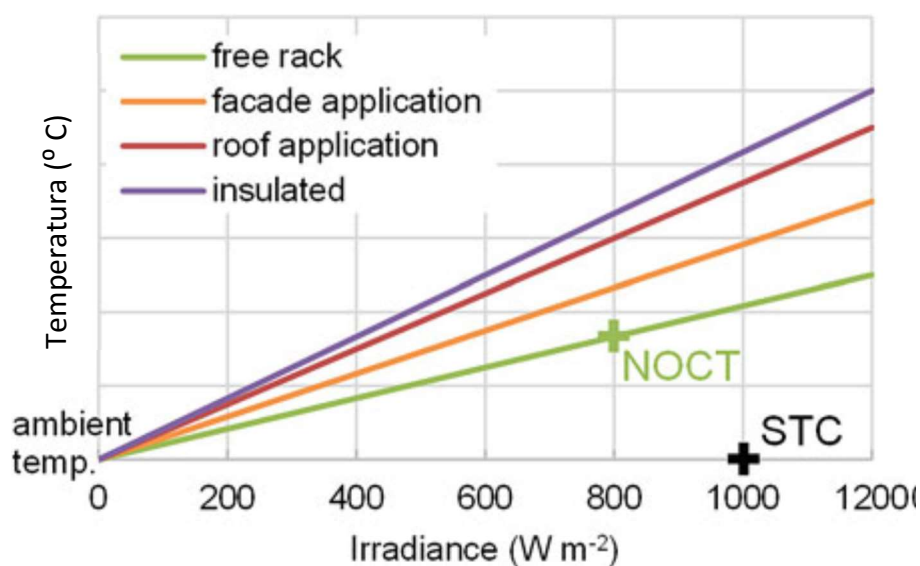
Em qualquer instalação fotovoltaica, as condições de operação abrangem um range grande de temperatura e irradiância. Nesse caso as condições de teste (STC) raramente são atingidas. O NOCT é muito mais representativo em relação a temperatura de operação mas não representa a grande variedade de condições a que o módulo é submetido.



Segundo Gnoato (2005), na região de Cascavel-PR a temperatura de operação de um painel fotovoltaico chega a 51° C, temperatura muito semelhante ao NOCT assim como o comportamento de todas as características do painel apresentado pelo fabricante, mas apresentando um rendimento 24% menor que a fornecida pelo fabricante em condições de trabalho na STC.

A temperatura de operação do módulo fotovoltaico pode variar de acordo com o tipo de instalação. Na Figura 19, Dupre *et al.* (2017) demonstra que quando a traseira do painel fotovoltaica é isolada termicamente a temperatura de operação é muito maior, já que não há dissipação de calor nessa região. É comum fazer isolamento térmico em módulos fotovoltaicos que são integrados parcialmente ou totalmente ao telhado das edificações onde é necessário conter a perda de calor através do painel fotovoltaico durante o inverno, em países de clima frio. A Figura 19 ainda demonstra o comportamento da temperatura onde o painel faz parte do telhado da edificação e quando é instalado em fachadas, comparando com a montagem padrão, onde é calculada a NOCT.

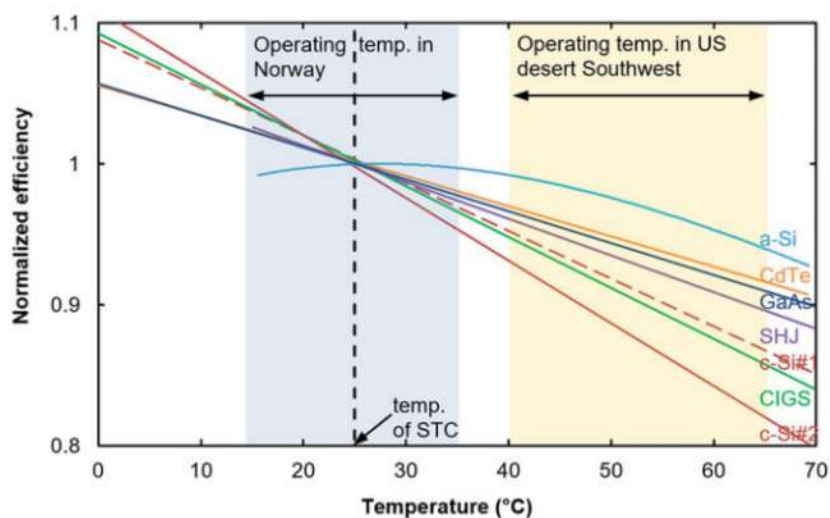
Figura 19 - Comportamento da temperatura de acordo com a montagem



Segundo Dupré *et al.* (2017) células fotovoltaicas produzidas através de diferentes tecnologias com a mesma potência nominal nas Condições de Teste Padrão (STC), podem produzir potências elétricas diferentes sob condições reais ao ar livre, mostrada na Figura 20. O exemplo através da temperatura de operação na Noruega é relevante porque a temperatura média de operação dos painéis em termos de produção de energia é de cerca de 25° C. Esta baixa temperatura média de operação

é devida ao fato de que o clima na localização do módulo (Noruega) é relativamente frio. Na maioria dos locais, onde a irradiação solar é mais relevante para a produção de energia solar ao longo do ano, a temperatura média de operação é significativamente superior a 25° C e os valores de STC não são representativos das condições médias de operação.

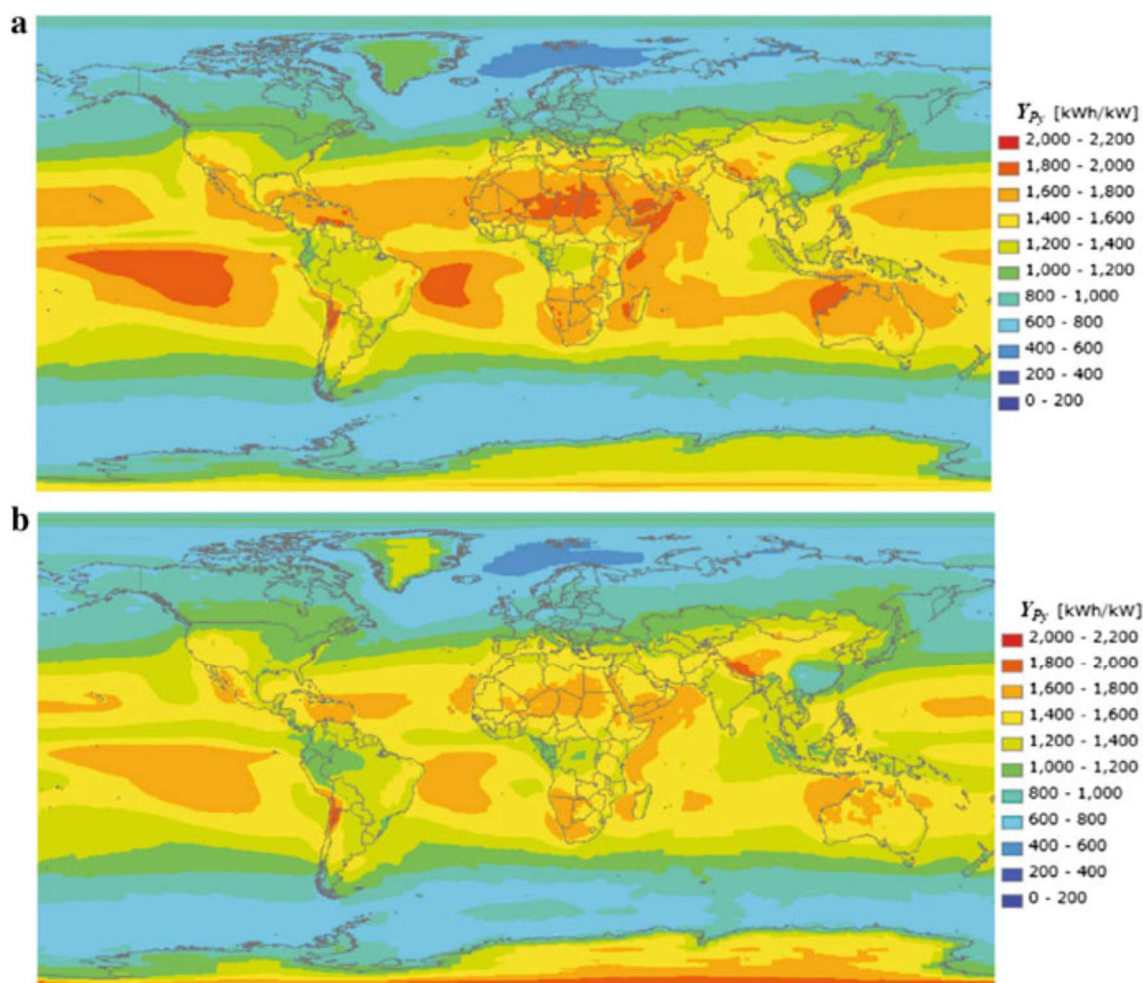
Figura 20 - Comportamento da eficiência de diversas tecnologias fotovoltaicas em relação a temperatura de operação.



Fonte: Dupré *et al.* (2017)

Kawajiri *et al.*, 2001 levaram em consideração a irradiação, temperatura ambiente e fizeram uma estimativa do potencial de geração de energia fotovoltaica levando em consideração os efeitos da temperatura em módulos de silício cristalino. No primeiro mapa na Figura 21a, o efeito da temperatura não é levado em consideração. No segundo mapa na Figura 21b, quando a influência da temperatura é considerada na geração de energia, pode-se observar a redução de geração em regiões mais quentes mas por outro lado, regiões de altitude onde a irradiância é alta e a temperatura é baixa, a geração de energia se destaca. Essas observações podem ajudar na ideia que o projeto e a seleção dos módulos devem levar essa variável em consideração. Módulos com o coeficiente de temperatura mais baixo tendem a ser mais eficientes em regiões mais quentes.

Figura 21 – a) Potencial energético mundial sem considerar a influência da temperatura de operação; b) Potencial energético mundial considerando a influência da temperatura de operação.



Fonte: Kawajiri *et al.* (2001)

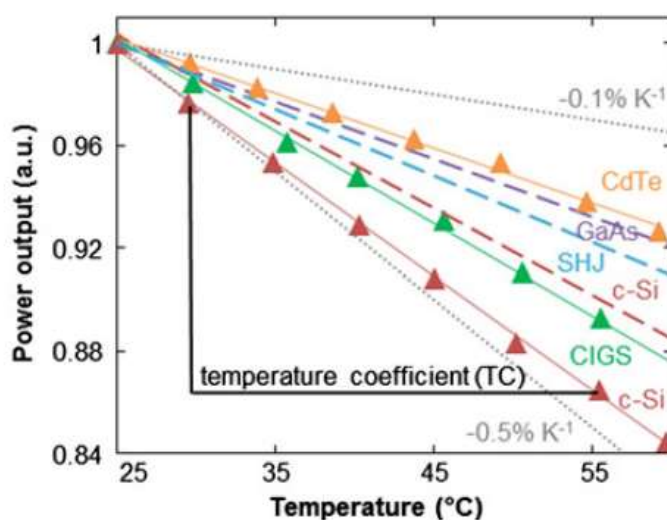
3.2.1 Coeficiente de temperatura

O coeficiente de temperatura (β) é utilizado para quantificar a sensibilidade da temperatura em performances de sistemas fotovoltaicos.

Os valores de β são fornecidos pelos fabricantes dos módulos fotovoltaicos e, para células de silício cristalino, ficam em torno de -0,5% por °C (Pinho e Galdino, 2014), mas podem variar conforme ilustrado na Figura 22 descrito por Dupre *et al.*, (2017) onde é possível comparar o comportamento das diferentes tecnologias fotovoltaicas (CdTe – telureto de cádmio, GaAs – Arsenieto de Gálio, SHJ – Célula de silício cristanico com hetero junção, c-Si – silício policristalino representada somente pela linha tracejada, CIGS – célula de cobre, índio, gálio e selênio e c-Si – silício

monocristalino com a produção através de *wafers* representada pela linha com triângulos) em relação à temperatura, demonstrado que as células de silício monocristalino são as mais afetadas pela temperatura conforme demonstrado através destas de pesquisas na literatura.

Figura 22 - Potencia relativa em função da temperatura de operação das células fotovoltaicas de acordo com a tecnologia de fabricação



Fonte: Dupré *et al.* (2017)

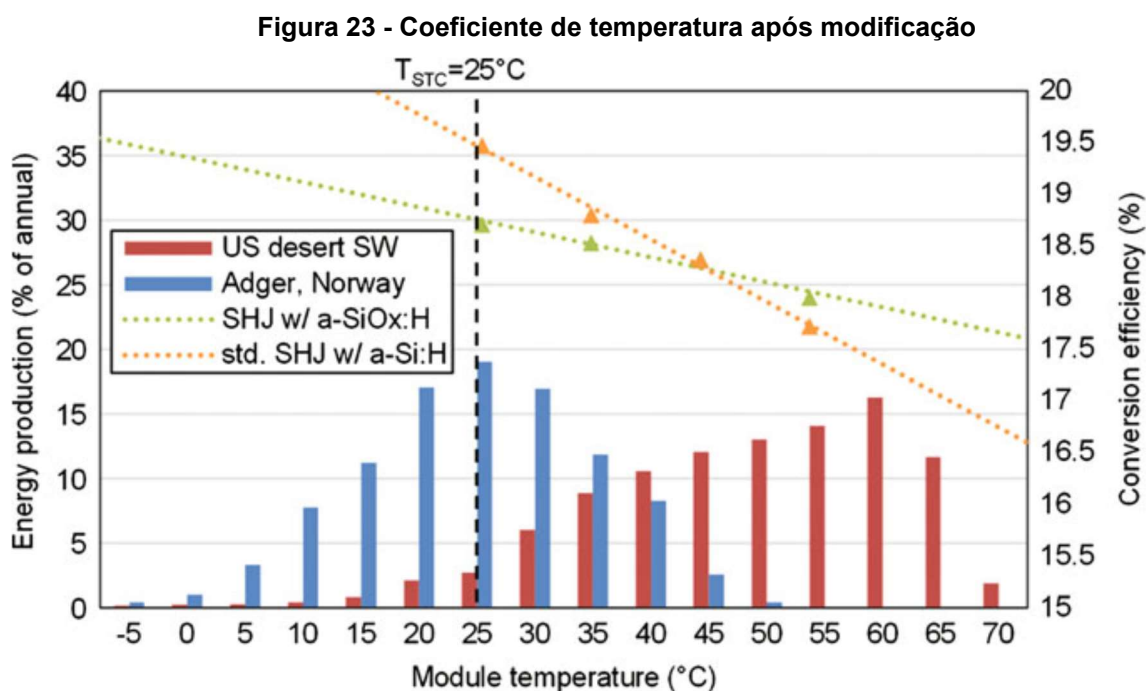
Esta diminuição na eficiência das células e, por conseguinte, do módulo foi estudada por diversos autores na literatura que chegaram ao consenso que existe um padrão linear no efeito da temperatura sobre o rendimento dos módulos fotovoltaicos. Esse padrão é caracterizado pelo coeficiente de temperatura e foi descrito por Evans (1975) da seguinte forma:

$$n = n_r [1 - \beta (T_{cel} - T_r)]$$

Onde n e n_r são as eficiências da célula e da célula na temperatura de referência, β é o coeficiente de temperatura, T_{cel} e T_r são as temperaturas da célula e de referência, respectivamente.

Apesar de ser pouco difundido na literatura, o coeficiente de temperatura dos módulos fotovoltaicos pode ser alterado. Seif *et al.* (2014) modificou as características térmicas dos módulos modulo fotovoltaico com uma camada de silício amorfo oxidada.

Apesar do módulo apresentar um rendimento menor em STC, o decaimento da eficiência é menor em relação ao módulo sem essa modificação, apresentando um rendimento melhor quando opera em altas temperaturas, conforme ilustrado na Figura 23 publicada por Dupre *et al.* (2017).



Fonte: Dupré *et al.* (2017)

3.3 SOLUÇÕES ADOTADAS PARA REDUZIR A TEMPERATURA DE OPERAÇÃO

Desde que foi descoberto a influência da temperatura no desempenho de painéis fotovoltaicos, um grande número de pesquisadores apresenta diversas linhas de pesquisa e soluções para minimizar a temperatura de operação. A maioria dos estudos sugerem soluções para dispersar o calor através do design, características de montagem, materiais a serem utilizados na fabricação dos painéis ou até soluções mais criativas como por exemplo a utilização de um filme fino de água fluindo na frente do painel fotovoltaico que garanta o resfriamento e a limpeza dos painéis.

Dentre as soluções mais utilizadas pode-se citar a circulação natural de ar, circulação de ar forçada e o resfriamento hidráulico. Estes dois últimos através de painéis fotovoltaicos híbridos resfriados a ar ou água. A seguir Shukla *et al.* (2016) listaram as vantagens e desvantagens de cada um destes sistemas:

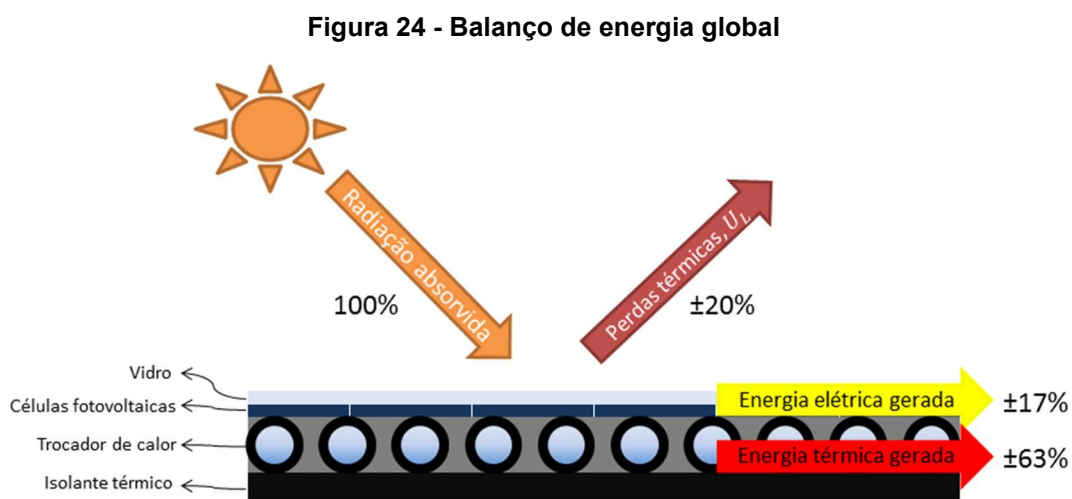
Tabela 1 - Vantagens e desvantagens das soluções para resfriamento

Circulação natural de ar	Circulação forçada de ar	Circulação de água
Vantagens		
Baixo custo; Sem manutenção; Fácil integração; Vida útil longa; Sem ruído; Sem consumo de eletricidade; Troca passiva de calor.	Taxas de transferência de calor mais altas em comparação com a circulação natural do ar Independentemente da direção e velocidade do vento, Taxas de fluxo mais elevadas do que a circulação natural de ar, Maior redução de temperatura em comparação com a circulação natural de ar	Maior taxa de transferência de calor em comparação com a circulação natural e forçada de ar, Maiores taxas de fluxo de massa em comparação com a circulação natural e forçada de ar, Maior condutividade térmica da água em relação ao ar, Maior redução de temperatura
Desvantagens		
Baixas taxas de transferência de calor, Depende da direção e velocidade do vento, Baixa condutividade térmica e capacidade de troca de calor do ar, Baixas taxas de fluxo de massa, Redução de temperatura limitada, Não é adequado para energia solar integrada no telhado	Alto custo inicial para os ventiladores, Dutos para lidar com grandes taxas de fluxo de massa, Alto consumo elétrico, Altos custos de manutenção, Sistema ruidoso, Difícil integração em comparação com o sistema de circulação natural de ar	Maior custo inicial devido a bombas, Maior custo de manutenção em comparação com a circulação de ar forçada, Maior consumo de eletricidade em comparação com a circulação de ar forçada, Menor tempo de vida útil em comparação com a circulação de ar forçada devido à corrosão.

Fonte: Adaptado de SHUKLA *et al.* (2016)

3.3.1 Painel fotovoltaico-térmico híbrido

Os primeiros estudos sobre essa tecnologia foram registrados nos anos 70 (Chow, 2010). O painel fotovoltaico-térmico híbrido é visto como uma tecnologia que engloba duas diferentes funções em apenas um equipamento. Um sistema fotovoltaico-térmico, encontrado na literatura como PV/T é uma combinação de componentes que convertem parte da energia proveniente do sol em eletricidade e o excedente de energia que seria desperdiçada em forma de calor é utilizada para aquecer um fluido de trabalho como ar ou água e ambos podem ser utilizados para aplicações domésticas. Hipolito (2015) demonstra através da Figura 24 que cerca de 80% da radiação absorvida é convertida em energia térmica ou energia elétrica.



Fonte: Hipolito (2015)

3.3.2 Painel fotovoltaico-térmico híbrido/ar

O ar pode ser utilizado para aquecer o ambiente em estações mais frias do ano, economizando energia dos sistemas de calefação. A maneira mais comum de integrar esse tipo de módulo solar híbrido com resfriamento a ar é integrando o painel solar com as edificações.

Esses módulos podem ser instalados no telhado ou na fachada dos edifícios (BIPV – *building integrated photovoltaic*). No Edifício Solar XXI, localizado em Portugal, foi feita a integração da energia fotovoltaica com o sistema de aquecimento e resfriamento do edifício, ilustrado nas Figuras 25 e 26.

Figura 25 - Edifício Solar XXI

Fonte: Gonçalves, 2011

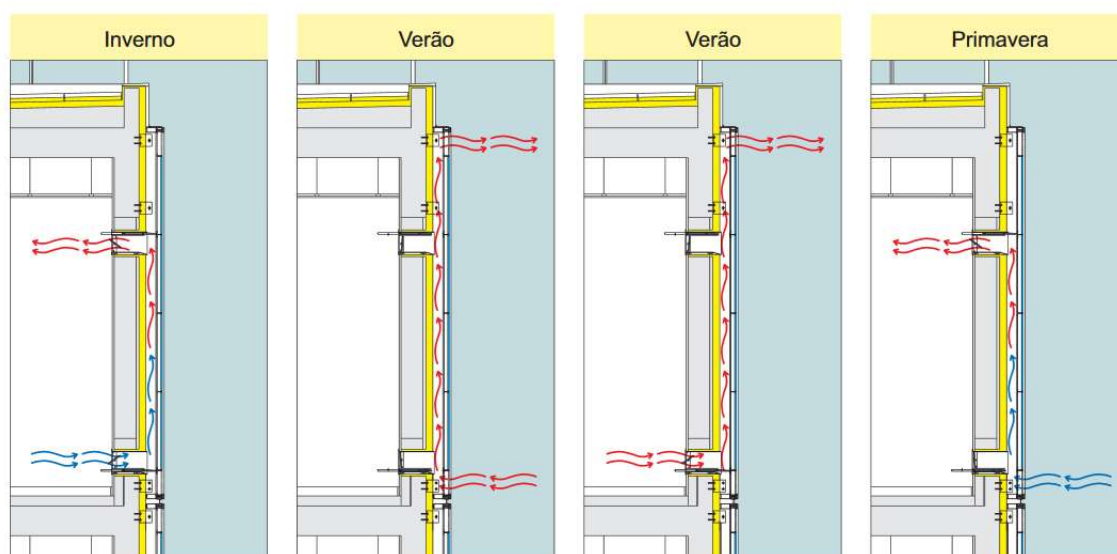
Figura 26 - Detalhe do módulo fotovoltaico integrado no Edifício Solar XXI

Fonte: Gonçalves, 2011

Os módulos solares instalados na fachada do edifício são resfriados através da convecção natural por meio de duas aberturas de ar localizados na parte inferior e superior dos módulos. As virolas podem ser manuseadas de diversas maneiras afim de garantir a melhor eficiência energética dependendo da temperatura ambiente conforme demonstrado na Figura 27. Durante o inverno as duas virolas podem ser abertas permitindo o aquecimento da sala através da circulação contínua de ar entre a sala e o espaço entre os painéis e o edifício. Durante o período de verão há duas possibilidades de utilização, o calor produzido pelos módulos é evacuado diretamente

para o exterior ou ainda pode-se abrir as virolas da sala para a retirada do ar quente de dentro do edifício através da convecção natural. Há ainda mais uma possibilidade de utilização na meia-estação como um sistema de pré-aquecimento do ar proveniente do exterior do edifício onde ajuda a resfriar os módulos fotovoltaicos e é injetado na sala através da abertura superior.

Figura 27 - Esquema de funcionamento do sistema fotovoltaico com aproveitamento térmico do Edifício Solar XXI



Fonte: Gonçalves, 2011

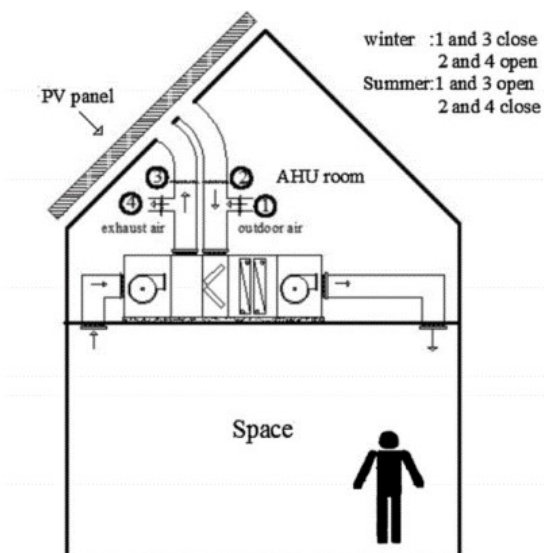
Shahsavari, Salmanzadeh *et al.* (2011) fizeram um estudo adaptando um sistema de ventilação da construção nos painéis fotovoltaicos com coletores térmicos de ar.

O sistema de circulação de ar funciona da seguinte maneira, como mostra a Figura 28: a descarga do ar condicionado é direcionada parcialmente para fora e parcialmente para a sala de ar condicionado (*AHU room*). A posição dos “*dampers*” irá definir a posição de verão ou inverno para o melhor aproveitamento energético. O ar extraído do edifício esfria os painéis fotovoltaicos durante o verão e durante o inverno o ar é pré-aquecido nos painéis fotovoltaicos antes de entrar no sistema.

Através da utilização da exaustão para resfriar o painel fotovoltaico, houve um aumento de 10,1% (equivalente a 129 kWh) de eficiência na produção de energia, mas o maior ganho energético aconteceu durante o inverno onde além de melhorar em 7,2% (55,9 kWh) a geração de eletricidade, em torno de 3.400 kWh foram

economizados anualmente devido ao pré-aquecimento do ar no sistema de climatização. Esse teste foi realizado na cidade Kerman, Irã.

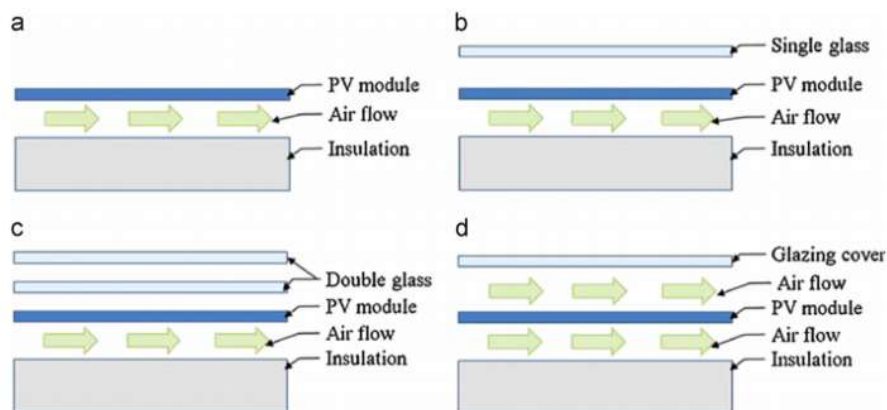
Figura 28 - Modulo PV/T ar



Fonte: Shahsavari, Salmanzadeh et al (2011)

Zhang et al. (2011) afirmam que o módulo PV/T foi projetado para os usuários que tem demanda por ar quente como aquecimento em edifícios, secagem (agricultura) e até geração de eletricidade. Para estes tipos de módulos o ar pode passar por baixo, em cima da célula ou em ambos os lados. Em alguns casos é utilizado cobertura de vidro para aumentar a eficiência térmica do sistema, conforme demonstrado na Figura 29.

Figura 29 - Modelos PV/T ar



FONTE: Zhang et al (2011)

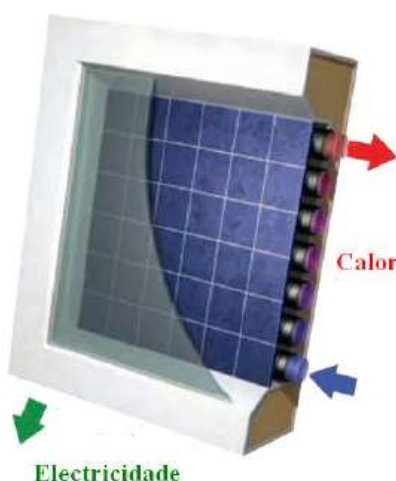
3.3.3 Painel fotovoltaico híbrido/água

Os modelos de módulos fotovoltaicos resfriados a água vem ganhando espaço no mercado devido ao seu maior potencial de refrigeração devido a capacidade térmica da água em absorver calor em relação aos modelos a ar.

Módulos PV/T com água utilizam absorvedores similares aos encontrados em coletores térmicos convencionais, utilizados apenas para o aquecimento de água, sendo que a principal diferença é a existência de uma camada de células fotovoltaicas sobrepostas ao trocador de calor. Apesar da ressalva feita por Allan *et al.* (2015) de que nem sempre os coletores PV/T ajudam no resfriamento das células, onde por vezes o fluido refrigerante pode circular até mesmo acima da temperatura das células, na grande parte do tempo o sistema ajuda no resfriamento além de ser capaz de fornecer água quente suficiente para suprir o uso doméstico.

A Figura 30 demonstra o funcionamento de um módulo PV/T à água onde pode ser visualizado um trocador de calor anexo a um painel fotovoltaico.

Figura 30 - Coletor solar híbrido PV/T

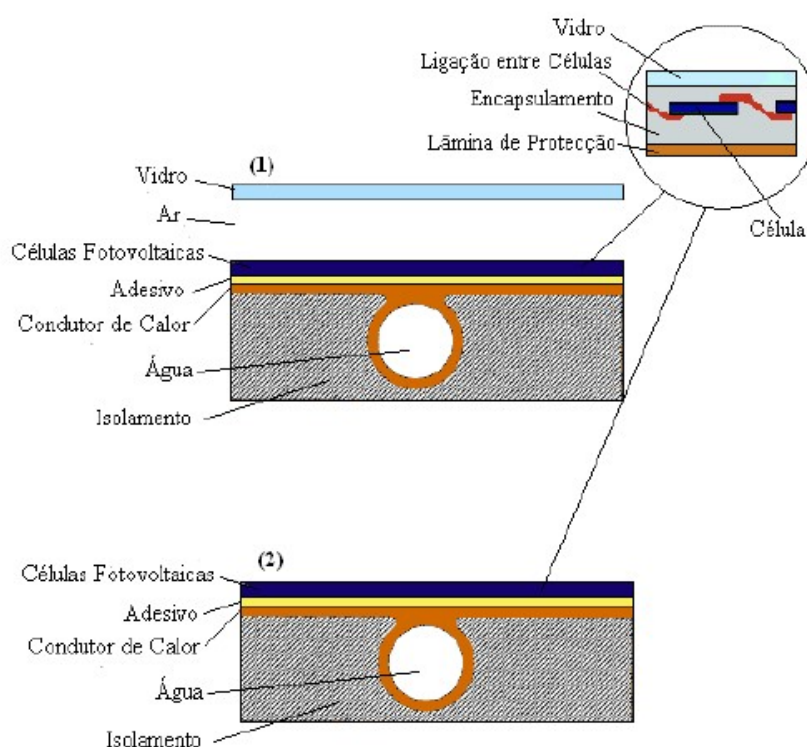


Fonte: Dupre *et al.* (2017)

A Figura 31, mostra em detalhes o corte dos painéis fotovoltaicos híbridos com e sem cobertura de vidro. A diferença entre as duas tecnologias é que a primeira diminui as perdas térmicas para o ambiente devido à cobertura, melhorando o seu rendimento

térmico, mas a cobertura diminuiu a energia elétrica gerada já que a radiação é parcialmente refletida no vidro e há um aumento de temperatura nas células. Se há busca por um melhor rendimento elétrico, a melhor opção é o módulo híbrido sem cobertura (MARQUES, 2008).

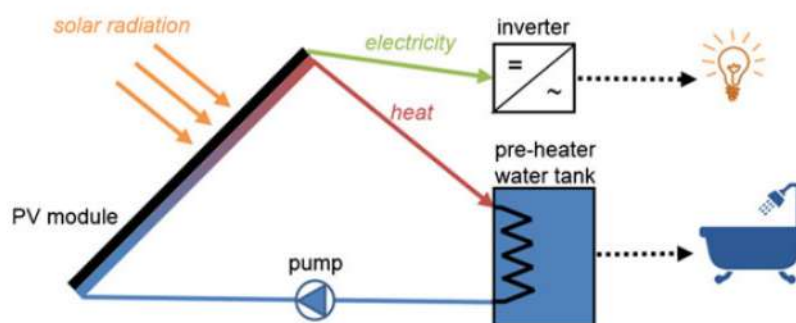
Figura 31 - Vista em corte de um painel fotovoltaico híbrido com e sem cobertura.



Fonte: Marques (2008)

Na Figura 32, é ilustrada a principal aplicação para o módulo PV/T em aplicações residenciais onde o excedente de calor que foi retirado das células fotovoltaicas é aproveitado para o uso doméstico. Integrando o sistema térmico e fotovoltaico, ainda existe a vantagem de ocupar um espaço reduzido nos telhados (HIPOLITO, 2015).

Figura 32 - Desenho esquemático de um sistema fotovoltaico híbrido PV/T



Fonte: Dupre et al. (2017)

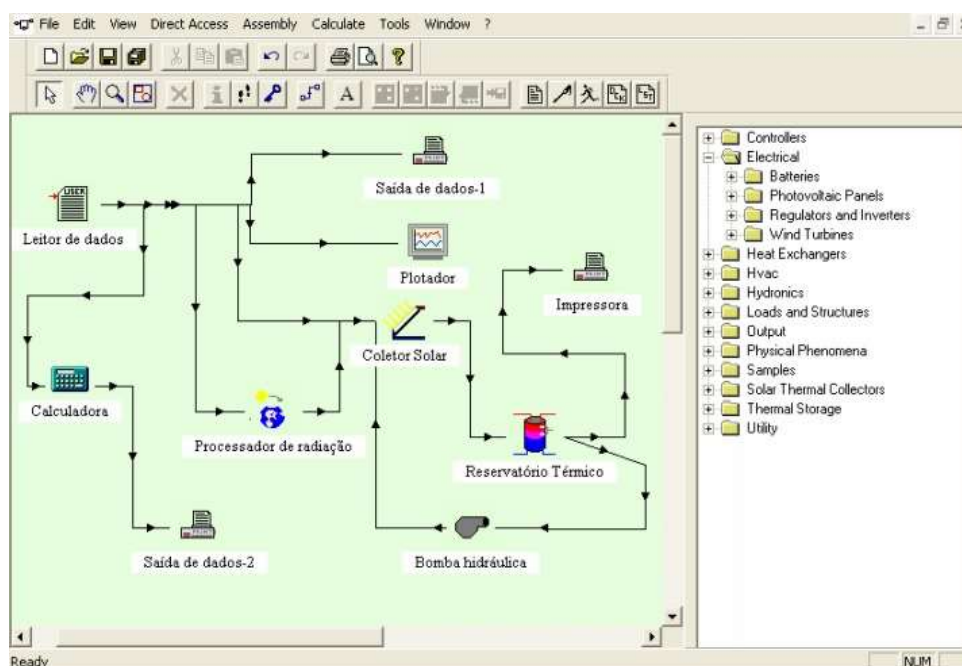
Dentre os coletores PV/T, estes, inicialmente se destacavam pela simplicidade e baixo custo de fabricação. Existe uma ampla gama de variantes no que diz respeito ao design e material do absorvedor. Ainda que a maioria ainda seja feita de material metálico no formato de chapa e tubo, o absorvedor desenvolvido com materiais poliméricos vem sendo mais explorados recentemente devido as seguintes vantagens:

- menor peso e menos material empregado;
- mais fácil instalação;
- mais simples fabricação devido ao menor número de componentes;
- menor custo de fabricação e instalação.

Além de citar as vantagens dos absorvedores poliméricos, Chow (2010) também elencou as desvantagens que são: menor condutividade térmica e maior dilatação térmica.

Hipolito (2015) simulou a implantação de sistemas fotovoltaicos híbridos para suprir residências para famílias de baixa renda. Para auxiliar na simulação da transferência de calor entre o módulo fotovoltaico e o trocador de calor foi utilizado um software conhecido como TRNSYS, demonstrado na Figura 33.

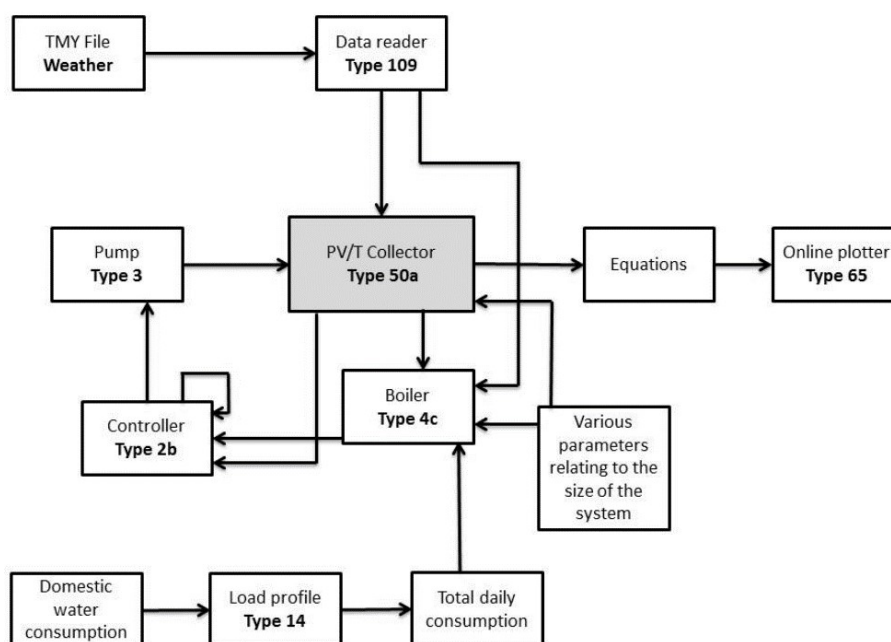
Figura 33 - Tela do Software TRNSYS



Fonte: Lopes et al. (2005)

Esse *software* desenvolvido pela Universidade de Wisconsin é um programa de simulação de sistemas térmicos de energia que permite a interação de diversos componentes da maneira que eles são ligados. Por meio de uma linguagem própria do TRNSYS, os componentes são ligados de maneira similar ao de uma placa ou circuito eletrônico, sendo a conexão feita por meio de tubulações, válvulas e dutos como ocorre em um sistema real. O programa realiza as soluções simultâneas necessárias das equações algébricas e diferenciais que representam os componentes e organiza dos dados de entrada e saída das variáveis de cada componente. Para facilitar a identificação dos componentes utilizados no simulador, Hipólito criou um diagrama de blocos conectando os componentes em seus respectivos blocos com seus parâmetros pré-estabelecidos e suas entradas e saídas demonstrado na Figura 34.

Figura 34 - Diagrama de blocos para o sistema fotovoltaico híbrido



Fonte: Hipolito (2015)

Na Figura 34 é possível identificar todos os componentes em seus respectivos diagramas de blocos. Abaixo é descrito os principais componentes do sistema:

- *Data Reader*: Dados climáticos provenientes do projeto SWERA;
- *Load Profile*: Dados do consumo de água quente definido através de normas brasileiras. Definido o consumo de água para 4 pessoas em 150 litros à 45 °C.
- *Boiler*: Tanque de água quente sem resistência interna e muito similar ao utilizado no cenário real.
- *PV/T Collector*: Módulo fotovoltaico híbrido com resultados muito realísticos quando comparado em estudos anteriores. Em suas características apresenta dados constantes de perdas térmicas o que facilita o estudo.

Os parâmetros do *PV/T Collector* foram analisados com mais cautela já que influenciariam diretamente na performance térmica e elétrica do sistema. Então todos os dados foram comparados teoricamente, através de cálculos termodinâmicos de transmissão de calor e experimentalmente através da construção de um protótipo para

que houvesse uma comparação com um cenário real conforme mostrado na Figura 35.

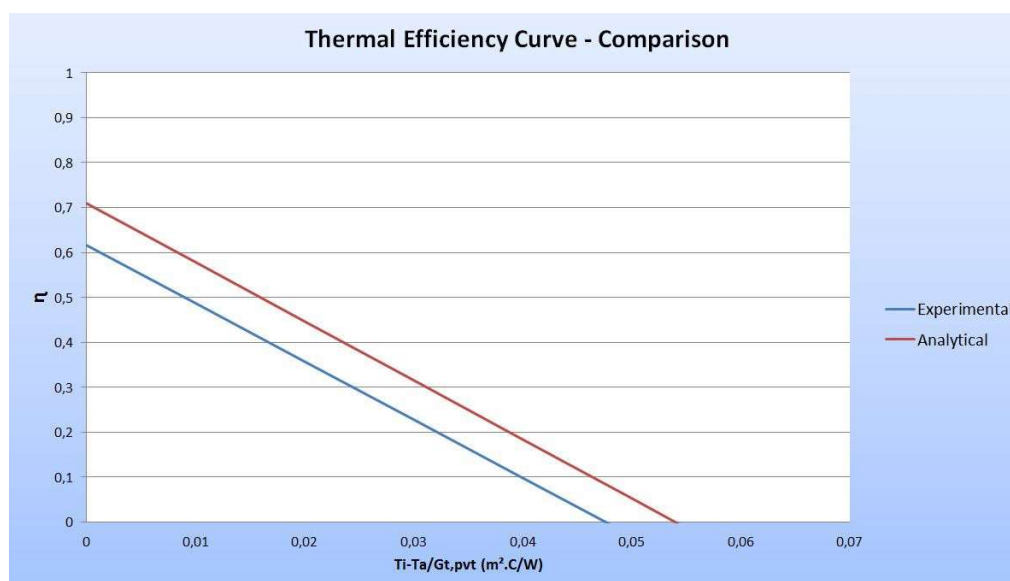
Figura 35 - Bancada de Teste - Coletor Fotovoltaico Térmico



Fonte: Hipolito (2015)

Para comparar os dados experimentais e analíticos, estes foram colocados no mesmo gráfico de eficiência térmica. Na Figura 36 pode-se observar que o modelo experimental resultou em uma menor eficiência térmica do que o modelo analítico. Essa diferença pode ser explicada que não é possível manter as condições de processo estáveis durante o experimento. A principal variável que influenciou no experimento foi a utilização da água quente do boiler, que não foi suficiente para reduzir a temperatura da água na entrada do sistema de refrigeração, reduzindo a eficiência térmica do sistema. Mesmo assim os valores calculados analiticamente ficaram muito próximos dos valores calculados experimentalmente.

Figura 36 - Comparação da eficiência térmica do sistema

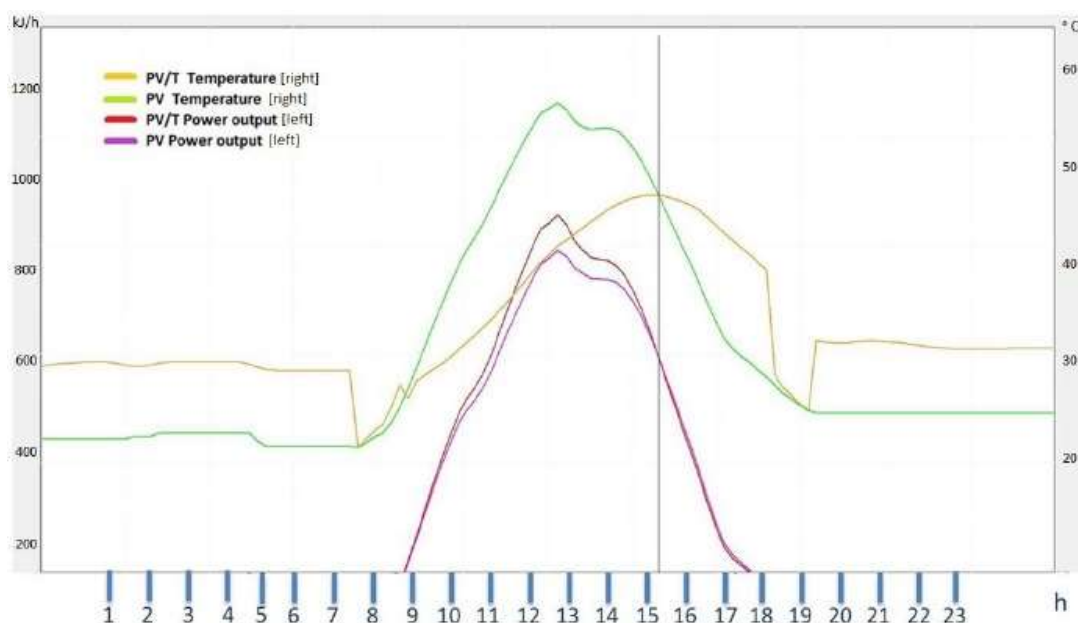


Fonte: Hipolito (2015)

Para a análise de desempenho do sistema híbrido, o sistema foi dimensionado através das normas brasileiras de consumo de água e energia elétrica para residências de baixa renda. Foi estabelecido que o sistema teria 3 módulos instalados na região de Belo Horizonte - MG para a simulação no software TRNSYS. Para a comparação do sistema híbrido com o sistema fotovoltaico convencional todos os parâmetros (condições climáticas, posicionamento, eficiência, etc) utilizados no simulador foram os mesmos.

A Figura 37 representa um gráfico com a potência de saída (eixo esquerdo) e a temperatura (eixo direito) do módulo fotovoltaico híbrido comparando com o módulo fotovoltaico convencional. No ponto marcado com a linha preta onde as temperaturas de operação são as mesmas pode-se verificar que a potência de saída é a mesma.

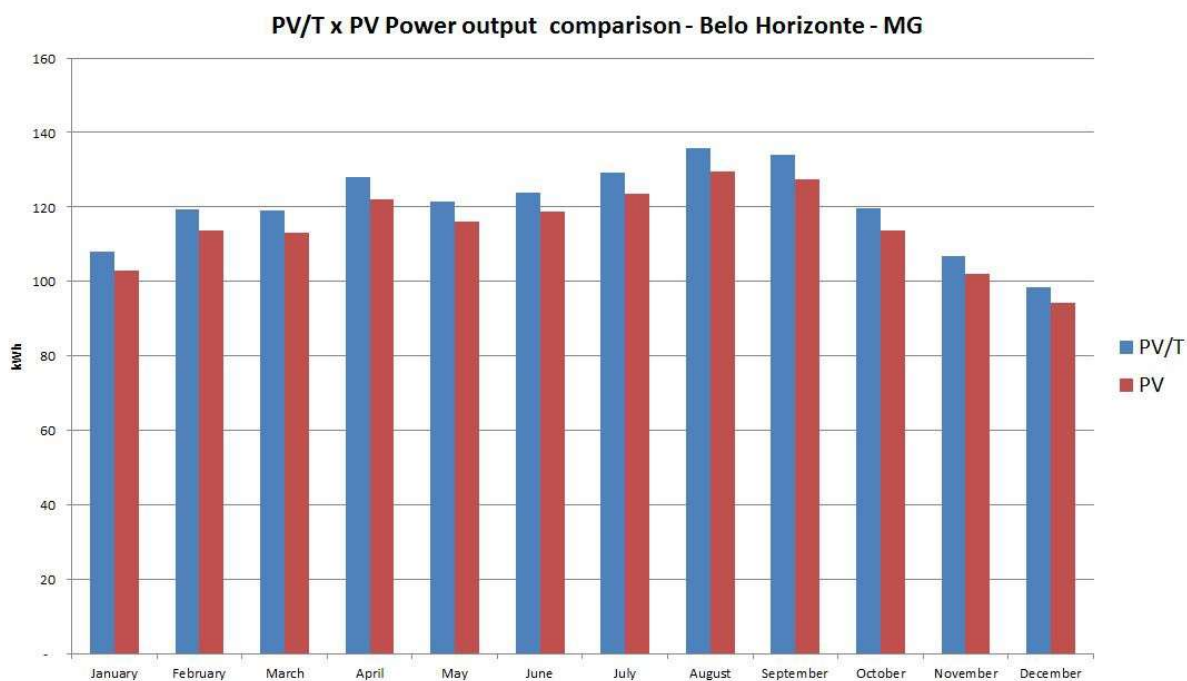
Figura 37 - Comparação do modulo Híbrido x Modulo convencional



Fonte: Hipolito (2015)

Quando a comparação é extrapolada para a geração de energia anual, pode-se constatar que o módulo híbrido gera 4,7% mais energia que o módulo convencional devido à redução de temperatura conforme demonstrado na Figura 38.

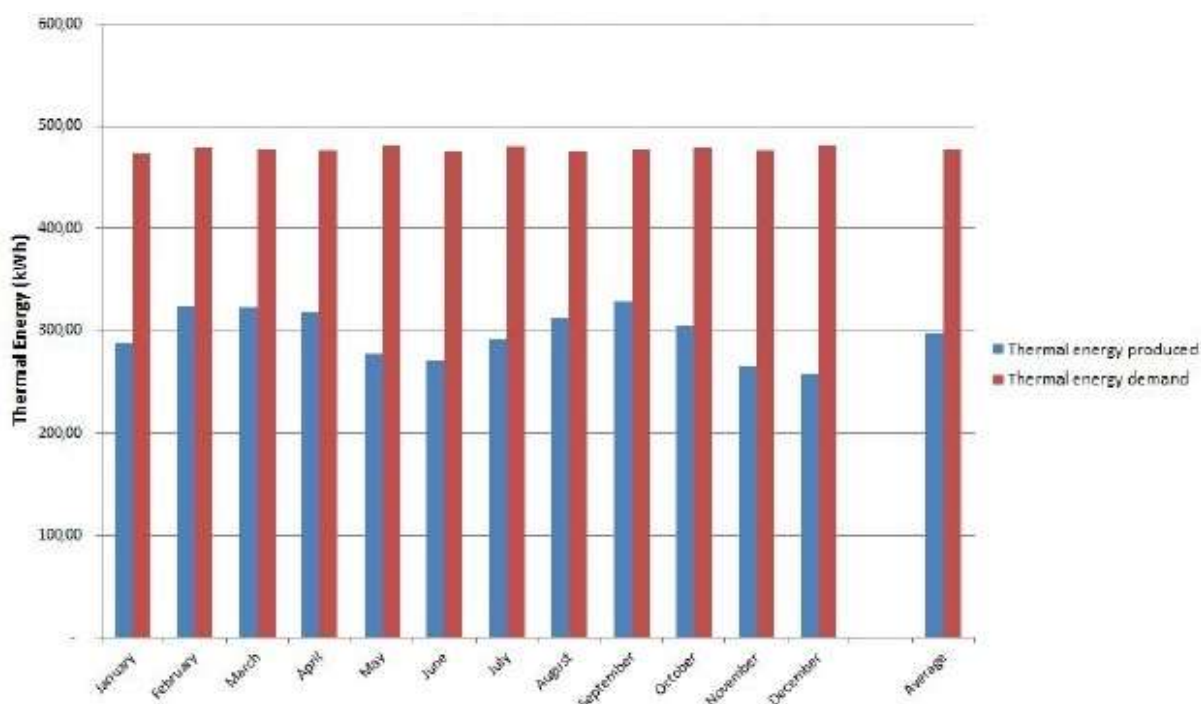
Figura 38 - Comparação do modulo Híbrido x Modulo convencional durante o ano



Fonte: Hipolito (2015)

Além do aumento da energia fotovoltaica, o sistema gera energia térmica para ser utilizada para fins domésticos. A Figura 39 demonstra que o sistema consegue suprir cerca de 60,8% da energia térmica para aquecimento de água (temperatura de suprimento em 20° C), conhecida como fração solar, demandada para uma residência de baixo custo.

Figura 39 - Fração Solar



Fonte: Hipolito (2015)

A análise foi extrapolada para outras cidades do Brasil. Diversas simulações foram feitas através do software TRNSYS para encontrar a melhor configuração do sistema nessas cidades através do número de módulos fotovoltaicos híbridos para atingir a fração solar de 60% de energia térmica. Nas cidades mais frias que foram analisadas, Florianópolis e Santa Maria, precisaram de uma quantidade maior de módulos híbridos para atingir os 60% de fração solar de energia térmica, mas acabaram gerando mais energia elétrica que em outras regiões. Na figura 40 pode-se verificar os dados das outras regiões.

Figura 40 - Quantidade de módulos fotovoltaicos híbridos necessários para atingir 60% de fração solar por região do Brasil



Fonte: Hipolito (2015)

Segundo Hipolito (2015) houve um aumento da eficiência fotovoltaica em todos os cenários possíveis variando de 4,5% a 8% dependendo diretamente da temperatura média ambiente e a quantidade de água consumida pelo sistema, que como consequência aumenta a taxa de resfriamento dos painéis fotovoltaicos, conforme pode-se verificar na Tabela 2:

Tabela 2 - Aumento da eficiência fotovoltaica

Cidade	Consumo de água	Aumento da eficiência fotovoltaica
Belo Horizonte - MG	150 litros	4,8%
Belo Horizonte - MG	200 litros	5,9%
Belo Horizonte - MG	250 litros	6,5%
Belo Horizonte - MG	300 litros	7,2%
Fortaleza - CE	150 litros	5,6%
Fortaleza - CE	200 litros	6,7%
Fortaleza - CE	250 litros	7,5%
Fortaleza - CE	300 litros	8,2%
Florianópolis - SC	150 litros	4,3%
Florianópolis - SC	200 litros	5,3%
Florianópolis - SC	250 litros	5,9%
Florianópolis - SC	300 litros	6,4%

Fonte: Adaptado de Hipolito (2015)

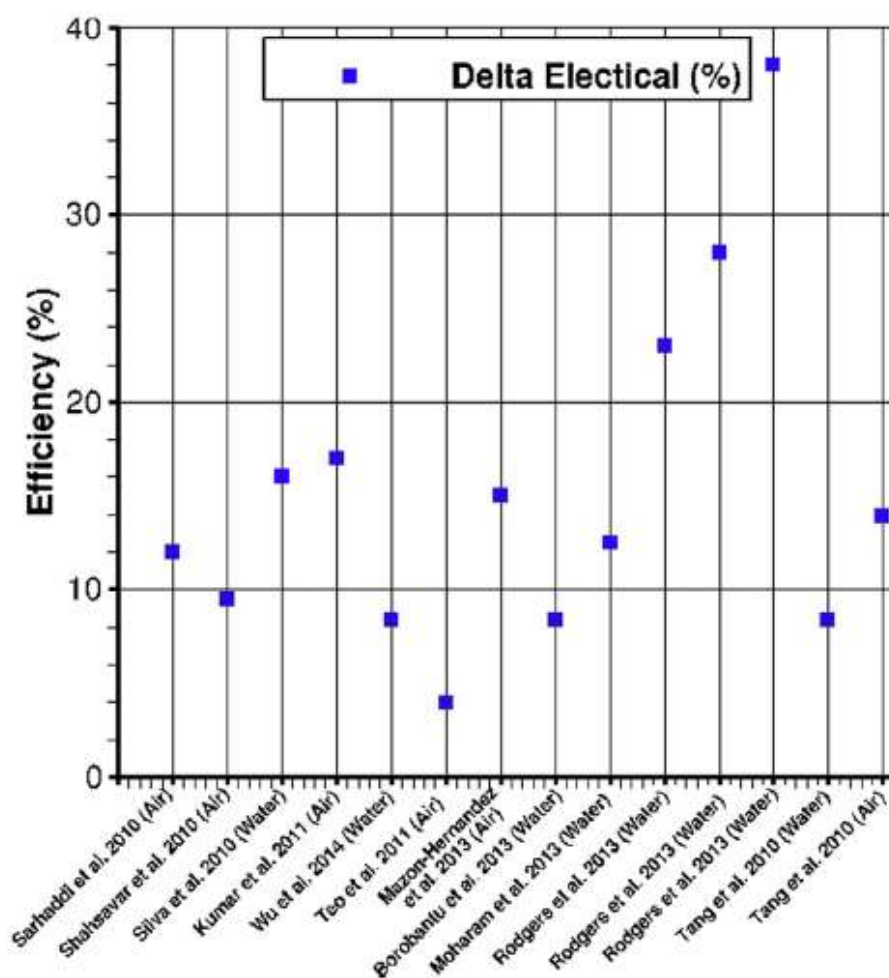
Após a realização desses estudos, a Soluz Energia, empresa de Hipolito, desenvolveu um trocador de calor polimérico capaz de se adaptar em painéis fotovoltaicos resultando em painel híbrido mais barato do que adotar as soluções separadas de coletores solares para aquecimento da água e painéis fotovoltaicos.

Além desses trabalhos descritos detalhadamente, outros autores podem ser encontrados na literatura realizando pesquisas para o desenvolvimento de meios para reduzir a temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos e aumentar sua eficiência elétrica. Reddy *et al.* (2015), compilou artigos de diversos pesquisadores de módulos fotovoltaicos híbridos resfriados a ar e água. Após uma breve descrição dos experimentos os dados foram compilados em alguns gráficos demonstrando o aumento da eficiência elétrica como se pode verificar na Figura 41. Pode-se verificar que muitos métodos são capazes de aumentar a produção de energia elétrica em mais de 10%. Pode-se destacar a pesquisa de Rodgers *et al.* (2013), realizada em Abu Dhabi onde foi alcançado o aumento de eficiência elétrica de 23% pelo resfriamento intermitente dos módulos através dos efeitos de evaporação utilizando água à temperatura ambiente, 28% pelo resfriamento intermitente dos módulos através dos

efeitos de evaporação utilizando água fria (17 °C) e 38% pelo resfriamento intermitente dos módulos através dos efeitos de evaporação utilizando água gelada (8 ° C).

Existe um grande potencial para alcançar uma melhoria de eficiência através da aplicação de tecnologias de refrigeração, no entanto o autor pondera que é muito difícil comparar todos os experimentos já que foram testados em ambientes diversos com diferentes tecnologias e vazões de ar e água diferenciadas. O autor ainda cita a necessidade de um modelo padrão de teste para que todas as tecnologias possam ser testadas sob as mesmas condições.

Figura 41 - A diferença de eficiência elétrica antes e depois do resfriamento compilada de diversos autores



Fonte: Reddy et al (2015)

4 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou o modo de funcionamento da energia fotovoltaica e a influência da temperatura no desempenho dos sistemas. Foram detalhados os princípios físicos da energia luminosa e como é convertida em eletricidade. Nesse ponto foi demonstrado como parte da energia luminosa é convertida em calor. Foi demonstrado que o projetista de sistemas fotovoltaicos deve conhecer a influência da temperatura no rendimento final do sistema para que possa minimizar seus efeitos através de melhoria de instalação, utilização do material correto e até adotar soluções de resfriamento do sistema fotovoltaico. Foram descritos experimentos realizados no Brasil e no mundo com a utilização de painéis fotovoltaicos híbridos resfriados com ar ou água, onde um permutador de calor resfria a célula fotovoltaica. O fluido refrigerante pode ser utilizado para outros fins, gerando água quente para o consumo doméstico ou até usando o ar aquecido para o aquecimento do ambiente, melhorando o desempenho energético do sistema.

Diversos pesquisadores têm procurado soluções para aumentar o rendimento de sistemas fotovoltaicos através do desenvolvimento de novas células ou buscando melhorar o rendimento das plantas existentes. Apesar de pouco difundido no mercado, os sistemas fotovoltaicos térmicos híbridos têm demonstrado evolução em pesquisas.

Trabalhos futuros podem utilizar essa referência para comparar o desempenho de duas plantas idênticas com a única diferença sendo a instalação de um trocador de calor para o resfriamento das células fotovoltaicas. Dessa maneira os pesquisadores poderiam ter uma ideia melhor do investimento a ser realizado para melhorar o desempenho do sistema fotovoltaico. Além do aumento do rendimento elétrico, a quantidade de energia térmica reaproveitada no sistema deve ser levada em consideração para o cálculo de retorno do investimento.

REFERÊNCIAS

- AL-ISMAILY, H.A., PROBERT, D. **Photovoltaic electricity prospects in Oman**. Applied Energy. ELSEVIER, v. 59, n. 2-3, p. 97-124, 1998.
- ALLAN, J, DEHOUCHE, Z, STANKOVIC, S, MAURICETTE, L **Performance testing of thermal and photovoltaic thermal solar collectors**, 2015.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília: ANEEL, 2008. 236p
- ANEEL - RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, 2012.
- CASTRO, R.M.G. **Introdução à energia fotovoltaica**. 2003
- CHOW, **A review on photovoltaic/termal hybrid solar technoly**. 2010
Hybrid Solar: A Review on Photovoltaic and Thermal Power Integration
2012
- DENG, X., LIAO, X., HAN, S., POVOLNY, H., AGARWAL, P. **Amorphous silicon and silicon germanium materials for high-efficiency triple-junction solar cells**. Solar Energy Materials & Solar Cells. ELSEVIER, n. 62, p. 89-95, 2000.
- DUPRÉ O., VAILLON R., GREEN M.A. **Thermal Behavior of Photovoltaic Devices: Physics and Engineering**, 2017.
- EVANS, D. L.; FLORSCHUETZ, L. W. **Cost studies on terrestrial photovoltaic power systems with sunlight concentration**. 1975.
- GHENSEV, A. **Materiais e processos de fabricação de células fotovoltaicas**. Lavras: Departamento de pesquisa da Universidade Federal de Lavras, 2006: 154 páginas.
- GIL, Antonio Carlos. **Como Elaborar Projetos De Pesquisa**.5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- GNOATTO, E., DALLACORT, R, RICIERI, R., SILVA, S.E., FERRUZI. **Determinação da curva característica de um painel fotovoltaico em condições reais de trabalho**, 2005.
- GOLDSCHMIDT JC. **Novel solar cell concepts**; 2009.
- GONÇALVES H, CABRITA C. **SOLAR XXI - Towards zero energy** - So. LNEG - Laboratório Nacional de Energia E Geologia: LNEG; 2010.
- HIPÓLITO, Henrique Luis, **Analisis and application of photovoltaic/termal hybrid solar systems (PV/T) for low-income residences in Brazil**. 2015

HUDSON, L.G.; MARKELL, J. **Solar technology**. Reston: Reston Publishing Company, 1985.

LOPES; RODRIGUES; SIQUEIRA **Software TRNSYS: Uma ferramenta de apoio a análise de sistemas térmicos e energéticos**, 2005.

MARCONI, Marina de A.; LAKATOS, Eva M. **Fundamentos de metodologia científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MARQUES, **Avaliação da Viabilidade de Colectores Híbridos Fotovoltaicos e Térmicos para Aplicação ao Aquecimento de Águas e Micro-Geração de Electricidade**, 2008

MONTENEGRO, A.A. **Fontes não convencionais de energia**. 2.ed. Florianópolis: Ed. UFSC, 1999.

NASCIMENTO, C.A. – **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**, 2004.

OVERSTRAETEN, R.W; MERTENS, R.P. **Physics, technology and use of photovoltaics**. London: **Modern Energy Studies**, 1996.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L. de.; RÜTHER, R. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE, 2006. 60p.

PHOTOVOLTAICS REPORT, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE 2017

PINHO, GALDINO. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**, 2014

RODGERS P. EVELOY V., **An integrated thermal management solution for flat type solar photovoltaic modules**, 2013.

PRADO, R.T.A. **Gerenciamento de demanda e consumo de energia para aquecimento de água em habitações de interesse social**. São Paulo, 1991.

REDDY, MOHAMMAD A. EBADIAN, CHENG-XIAN LIN, **A review of PV–T systems: Thermal management and efficiency with single phase cooling**, 2015

RENEWABLES 2015, Global Status Report.

RÜHLE, Sven. **Tabulated values of the Shockley–Queisser limit for single junction solar cells**. Solar Energy, v. 130, p. 139-147, 2016.

SHAHSAVAR, A., M. SALMANZADEH, **Energy saving in buildings by using the exhaust and ventilation air for cooling of photovoltaic panels**. 2011

SHUKLAA, KARUNESH KANTA, ATUL SHARMAA, PASCAL HENRY BIWOLEB, **Cooling methodologies of photovoltaic module for enhancing electrical efficiency: A review**, 2016

SOBRINHO, Louise C de Oliveira Desenvolvimento e pesquisas na terceira geração de células fotovoltaicas, 2016

SOUZA Painel Solar (Placa Solar): A Verdade Sobre o Preço e Como Funciona acessado em 20/05/2017 <http://blog.bluesol.com.br/painel-solar-preco-e-como-funciona/>

SUZUKI, C. K.; PEREIRA, J. T. V. Energia solar e produção de silício metálico baseado no programa QITS (Quaras Industrial Tarde System). 2000.

KUMAR; BARADER; UZMA Historical and recent development of photovoltaic thermal (PV/T) technologies. 2014

ZHANGA; ZHAOAZ; SMITHA; XUB; YU; Review of R&D progress and practical application of the solar photovoltaic/thermal (PV/T) technologies, 2011

VILLALVA, Marcelo Gradella. Energia solar fotovoltaica: Conceitos e aplicações, sistemas isolados e conectados à rede. 2º edição. São Paulo. Editora Ética, 2015.