

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Escola de Engenharia**  
**Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica**

**RODOLFO MEZÊNCIO GODINHO**

**Aplicação de trocador de calor adaptável a módulos fotovoltaicos comerciais:  
módulos fotovoltaicos "hibridizados" em sistemas PVT para residências de baixa  
renda - Uma proposta para realidade brasileira**

Belo Horizonte – MG  
Novembro de 2019

**Rodolfo Mezêncio Godinho**

**Aplicação de trocador de calor adaptável a módulos fotovoltaicos comerciais:  
módulos fotovoltaicos "hibridizados" em sistemas PVT para residências de baixa  
renda - Uma proposta para realidade brasileira**

**Monografia submetida à Banca Examinadora designada  
pela Comissão Coordenadora da Especialização em Fontes  
Renováveis, como parte dos requisitos necessários à  
obtenção do *Certificado de Especialista em Fontes  
Renováveis*.**

Orientador: Prof. Dr. Matheus Pereira Porto

Belo Horizonte – MG

Novembro de 2019

G585a

Godinho, Rodolfo Mezêncio.

Aplicação de trocador de calor adaptável a módulos fotovoltaicos comerciais [recurso eletrônico] : módulos fotovoltaicos "hibridizados" em sistemas PVT para residências de baixa renda - uma proposta para realidade brasileira / Rodolfo Mezêncio Godinho. – 2019.

1 recurso online (53 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Matheus Pereira Porto.

“Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Fontes renováveis: geração, operação e integração da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.”

Inclui bibliografia.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia elétrica. 2. Eficiência energética. 3. Energia solar.  
4. Geração de energia fotovoltaica. I. Porto, Matheus Pereira.  
II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.  
III. Título.

CDU: 621.3



## ATA DA DEFESA

**“Aplicação de trocador de calor adaptável a módulos fotovoltaicos comerciais: módulos fotovoltaicos "hibridizados" em sistemas PVT para residências de baixa renda - Uma proposta para realidade brasileira”**

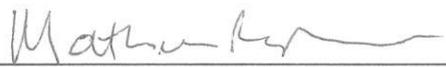
**RODOLFO MEZÊNCIO GODINHO**

Trabalho Final defendido perante a banca examinadora, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “Especialista em Fontes Renováveis – Geração, Operação e Integração”

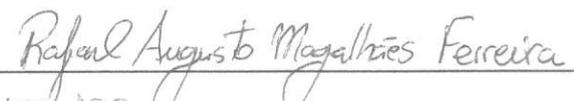
Aprovada em 28 de novembro de 2019.

Por:

Prof. Dr. Matheus Pereira Porto  
Avaliador 1 – Orientador

  
\_\_\_\_\_  
Nota: 100

Prof. Dr. Rafael Augusto Magalhães  
Ferreira  
Avaliador 2

  
\_\_\_\_\_  
Nota: 100

  
Secretaria do Curso de Especialização em  
Fontes Renováveis - Geração, Operação  
e Integração

## DEDICATÓRIA

Ao meu pai,  
de quem sinto saudades todos os dias.  
Sou eternamente grato a você!

## **AGRADECIMENTOS**

A minha querida mãe, por nunca ter se deixado abater em momentos difíceis e demonstrado que tudo na vida tem seu tempo.

Aos meus irmãos, por serem meus maiores exemplos de lutas e conquistas.

A Lalá Paiva, por se fazer presente em tempos difíceis e, sempre ter acreditado no resultado final desse trabalho.

Ao professor Doutor Matheus Pereira Porto, pelas discussões e ensinamentos em todo o decorrer do trabalho.

Ao professor Doutor Lucas Paglioni Pataro Faria, por se fazer disponível de forma imediata e, ter contribuído tanto com o direcionamento do estudo.

Aos meus amigos, pelos momentos de distrações, transformando medos em risadas.

## RESUMO

A busca por diversificação da matriz energética mundial e a preocupação com a produção de energia de forma limpa e sustentável têm estimulado o desenvolvimento das energias renováveis. Sob este aspecto destaca-se a energia solar, fonte abundante e disponível. A energia solar tem várias aplicações, sendo os sistemas térmicos e fotovoltaicos os mais difundidos. Com a proposta de otimizar a eficiência energética surgem os sistemas híbridos PVT (*Photovoltaic Thermal Hybrid Solar Collector*), nos quais há cogeração de energia elétrica e térmica a partir da energia solar. Os sistemas PVT podem utilizar o ar, a água ou ambos como fluidos arrefecedores, se caracterizando por sua conformação. A tecnologia híbrida PVT ainda é pouco conhecida e encontra barreiras para sua inserção no mercado energético atual, como por exemplo, o custo inicial para investimento, a falta de padronização e certificação do produto, e o conhecimento público. No Brasil, com o alto potencial para produção de energia solar, os sistemas PVT poderiam ser aplicados em residências de baixa renda. Uma solução sustentável e econômica para fornecimento de energia elétrica e térmica, em expansão no mercado energético e com aplicabilidade viável para programas populares.

Palavras – chave: Coletores PVT; Eficiência Energética; Energia Solar; Fluido de Trabalho; PV Ventilado; PVT Resfriamento

## **ABSTRACT**

The seek for diversification of the world energy matrix and the concern with the production of clean and sustainable energy have fostered the development of renewable energies. In this regard, solar energy, an abundant and available source of energy, stands out. Solar energy has many applications, being thermal and photovoltaic systems the most widespread. Aiming at energy efficiency optimization, the PVT (Photovoltaic Thermal Hibrid Solar Collector) hybrid systems come into play, in which there is co-generation of electric and thermal energy from solar energy. PVT systems can use air, water or both as coolants fluids, characterized by their conformation. Hybrid PVT technology is not yet widely known and faces barriers to its insertion into the current energy market, such as the initial investment cost, the lack of standardization and certification of the product, and public awareness. Given the Brazilian high potential for solar energy production, PVT systems could be applied to low-income households. A sustainable and cost-effective solution for expanding electric and thermal energy supply with viable applicability for popular programs.

Keywords: Energy Efficiency; PVT collector; PVT Cooling; Solar Energy; Ventilated PV; Working Fluid;

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma das aplicações práticas de energia solar .....	15
Figura 2 - Absorção de radiação em uma superfície absorvedora.....	16
Figura 3 – Perdas térmicas: Condução, Convecção e Radiação.....	17
Figura 4 – Transmissividade no espectro Solar e da Emissão .....	18
Figura 5 - Bandas de energia em condutores (a), semicondutores (b) e isolantes (c) .....	19
Figura 6 - Estrutura moleculares dos semicondutores N (a) e dos semicondutores P (b) .....	20
Figura 7 – Materiais semicondutores unidos para formar uma junção PN .....	21
Figura 8 - Efeito fotovoltaico em na junção PN.....	21
Figura 9 - Células, módulos e arranjos fotovoltaicos .....	22
Figura 10 – Esquema enfatizando os principais componentes de um módulo fotovoltaico .....	23
Figura 11 – Curva característica I-V e curva de potência P-V de um módulo fotovoltaico .....	23
Figura 12 - Efeito causado pela variação da irradiância sobre a curva característica I-V do módulo fotovoltaico.....	24
Figura 13 - Efeito causado pela variação da irradiância sobre a curva de potência P-V do módulo fotovoltaico.....	25
Figura 14 – Efeito causado pela variação da temperatura sobre a curva característica I-V do módulo fotovoltaico.....	25
Figura 15 - Efeito causado pela variação da temperatura sobre a curva de potência P-V do módulo fotovoltaico.....	26
Figura 16 – Esquemático da união dos sistemas térmico e fotovoltaico .....	26
Figura 17 – Coletor Solar Térmico (a), Módulo PV (b) e Coletor Híbrido PVT (c).....	27
Figura 18 - Vista transversal dos coletores PVT do tipo ar.....	28
Figura 19 - Vista transversal dos coletores PVT do tipo água .....	29
Figura 20 - Vista transversal do coletor híbrido PVT do tipo ar e água placa e tubo .....	30
Figura 21 - Vista transversal do coletor híbrido PVT do tipo ar e água canal .....	30
Figura 22 - Vista transversal do coletor híbrido PVT do tipo ar e água de escoamento livre .....	31
Figura 23 - Vista transversal do coletor híbrido PVT do tipo ar e água com duas	

superfícies absorvedoras.....	32
Figura 24 - Classificação de produtos PVT disponíveis .....	34
Figura 25 – Trocadores de calor acoplados aos módulos fotovoltaicos Vila Vicentina..	42
Figura 26 – Coletor tubo-aleta (a) e Coletor serpentina (b) .....	43
Figura 27 – Imagem termográfica da face anterior (a) e posterior (b) do módulo PV ....	44
Figura 28 – Coletor VolThera PVT .....	45

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>1.1. Objetivo .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2. Organização do trabalho .....</b>	<b>14</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1. Conversor solar térmico.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2. Conversor solar fotovoltaico.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.1. Efeito fotovoltaico.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.2. Células fotovoltaicas.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.3. Funcionamento e característica dos módulos fotovoltaicos.....</b>	<b>23</b>
<b>2.2.4. Influência da radiação solar.....</b>	<b>24</b>
<b>2.2.5. Influência da temperatura .....</b>	<b>25</b>
<b>2.3. Conversor solar híbrido PVT .....</b>	<b>26</b>
<b>2.3.1. Coletor PVT do tipo ar .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.2. Coletor PVT do tipo água.....</b>	<b>28</b>
<b>2.3.3. Coletor PVT do tipo ar e água .....</b>	<b>29</b>
<b>2.3.3.1. Placa e tubo .....</b>	<b>29</b>
<b>2.3.3.2. Canal.....</b>	<b>30</b>
<b>2.3.3.3. Escoamento.....</b>	<b>31</b>
<b>2.3.3.4. Duas superfícies absorvedoras .....</b>	<b>32</b>
<b>2.4. Coletores cobertos e descobertos.....</b>	<b>32</b>
<b>3. INSERÇÃO DA TECNOLOGIA PVT NO MERCADO .....</b>	<b>33</b>
<b>3.1. Módulos comercializados .....</b>	<b>33</b>
<b>3.1.1. Exemplos de módulos PVT .....</b>	<b>35</b>
<b>3.2. Barreiras e oportunidades .....</b>	<b>35</b>
<b>4. ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>39</b>
<b>4.1. O contexto da energia solar no Brasil.....</b>	<b>39</b>
<b>4.2. Incentivos governamentais, perspectiva e ampliação do uso da energia solar</b>	
<b>39</b>	
<b>4.3. Estudos recentes sobre sistemas PVT .....</b>	<b>41</b>

<b>4.4. Coletor adaptável a módulos fotovoltaicos convencionais.....</b>	<b>44</b>
<b>4.5. Uma proposta para a realidade brasileira .....</b>	<b>46</b>
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>49</b>
<b>5.1. Trabalhos futuros .....</b>	<b>50</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>51</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, inúmeros danos ambientais e sociais são ocasionados pela produção de energia. Regiões são afetadas pela poluição, desmatamento, degradação e desertificação. Como exemplo, as usinas hidrelétricas, principais fontes de geração de energia no Brasil, em decorrência de sua construção originaram milhares de quilômetros quadrados de terras inundadas para formação de reservatórios. Resultando em deslocamento de famílias, alteração do ecossistema e redução da biodiversidade (MORAN, LOPEZ, *et al.*, 2010).

No contexto internacional, esforços têm sido direcionados para ampliação do emprego e desenvolvimento das energias renováveis, com o objetivo de proporcionar uma energia limpa e sustentável. Durante a década de 70, o consumo crescente e a oferta restrita de petróleo, culminaram no chamado choque do petróleo (BNDES, 2005). Diante deste cenário, estimulou-se a busca por meios alternativos para produção de energia, como por exemplo a energia solar, a partir do desenvolvimento dos coletores solares. Destaca-se a energia solar por sua grande disponibilidade e capacidade de exploração.

Como demonstra o Plano Nacional de Energia de 2030, o fluxo de energia solar que incide sobre a Terra é capaz de suprir cerca de 10.000 vezes o consumo anual de energia no globo (PNE 2030, 2007).

São várias as aplicações da energia solar, destacando-se os sistemas térmicos para conversão em calor e sistemas fotovoltaicos para conversão em eletricidade. A hibridação propõe o uso dessas duas aplicações em uma única estrutura.

Na década de 70, surgem as pesquisas iniciais sobre a associação dos coletores solares e dos módulos fotovoltaicos, conhecida por tecnologia *Photovoltaic Thermal Hybrid Solar Collector* (PVT) (PALLA, BRAU, *et al.*, 2014). O EUA e o Japão se sobressaíram no campo da geração de energia combinada, através do modelo de Hottel – Whiller, o qual estimava o desempenho do aquecimento da água através da junção de sistemas térmicos e fotovoltaicos (DAGHIGH, RUSLAN, *et al.*, 2011).

Os coletores híbridos PVT são utilizados para aquecimento e produção de eletricidade. A combinação de ambas as tecnologias economiza espaço valioso na superfície da construção e atende a todas as demandas de energia de um consumidor.

Esse dispositivo proporciona maior eficiência de conversão elétrica a partir da remoção do calor residual do mesmo. Ao receber a energia solar, o módulo aquece e seu

desempenho decresce. O módulo fotovoltaico transfere calor para o fluido, aquecendo-o, e então, diminui sua degradação por superaquecimento. O fluido aquecido, neste caso a água, será utilizado em outras aplicações.

No entanto, existem barreiras para disseminação da tecnologia PVT no mercado, como o alto custo e a carência de formalização e regulamentação de normas técnicas específicas para essa atividade.

### **1.1.Objetivo**

O objetivo deste trabalho é propor a aplicação de um sistema PVT em residências de baixa renda, construído a partir de um trocador de calor acoplado a um módulo fotovoltaico, e analisar as possibilidades de inserção no mercado atual, em programas populares e os impactos socioeconômicos.

### **1.2.Organização do trabalho**

A dissertação está estruturada em seis capítulos. Neste primeiro capítulo (Capítulo 1) propõe-se o tema e a sua relevância para o contexto atual da sustentabilidade do meio ambiente e dos problemas energéticos, apresenta-se também os objetivos e a estrutura da dissertação. No Capítulo 2 é realizada uma revisão da literatura especializada, abordando conceitos importantes sobre a conversão da energia solar em fontes de energia térmica e elétrica. O Capítulo 3 trata da inserção da tecnologia PVT no mercado. O estudo de caso é abordado no Capítulo 4, e por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Conversor solar térmico

Várias são as formas de aproveitamento da energia gerada pelo sol, e suas aplicações podem ser classificadas em ativas e passivas. O uso da radiação solar na arquitetura, como iluminação ou conforto térmico, destacam-se como principal modo de aproveitamento passivo. Já a energia solar ativa se subdivide em heliotérmica, solar térmica e fotovoltaica. Como demonstrado na Figura 1 (PNE 2030, 2007).

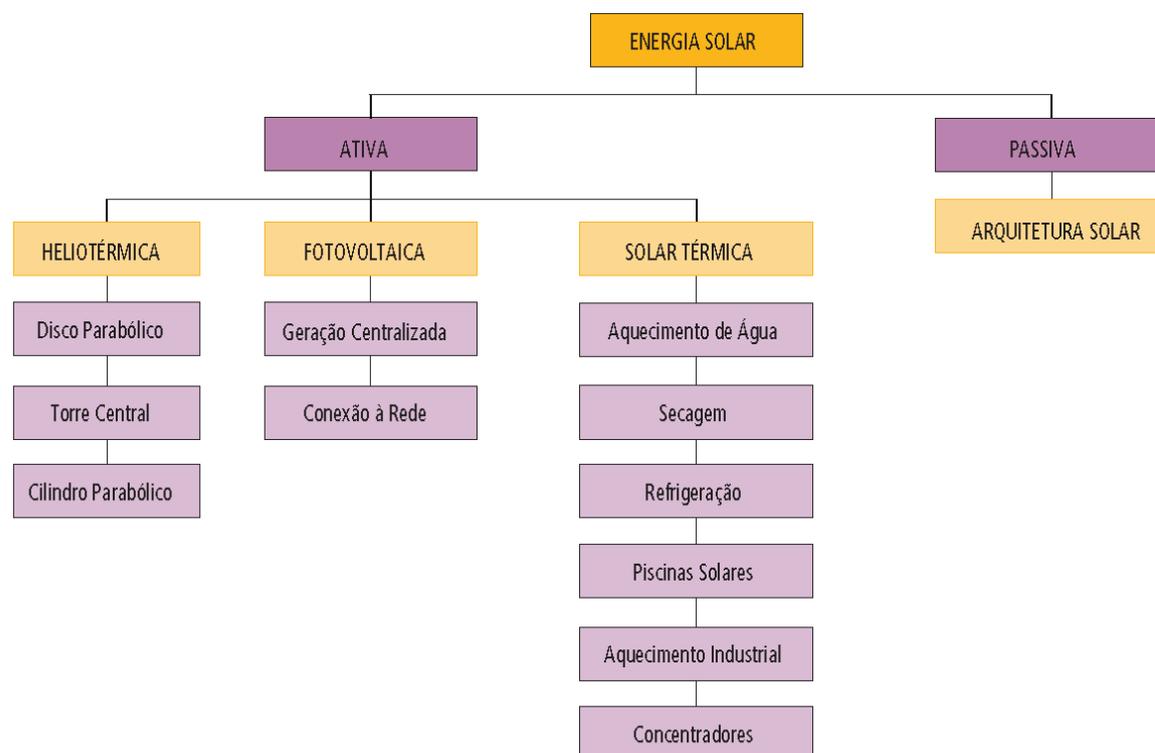


Figura 1 - Fluxograma das aplicações práticas de energia solar

Fonte: (PNE 2030, 2007)

Para captação da radiação solar são utilizados coletores, podendo ser classificados em coletores planos e coletores concentradores. Os concentradores são empregados para atingir altas temperaturas alcançando até 3.000 °C (PINHO e GALDINO, 2014). Já os coletores planos têm como finalidade atingir temperaturas de operação entre 60 °C e 100 °C. Diversas são as aplicações dos coletores solares planos como o aquecimento de água em residências, hotéis, hospitais, entre outros. O aquecimento se diferencia pela sua finalidade: aquecimento de água para fins sanitários ou piscinas, ou pré-aquecimento industrial.

O aproveitamento da energia solar para o aquecimento de água é bem difundido no Brasil e no mundo, pelo seu grande potencial na redução do consumo de energia elétrica, ao substituírem aquecedores elétricos por solares (PNE 2030, 2007).

O processo de transformação da energia solar em energia térmica, para aquecimento de água em baixa temperatura, ocorre a partir da absorção da radiação solar em uma superfície absorvedora, capaz de transferir esta energia, sob a forma de calor, para a água. (CIÊNCIA VIVA, 2006).

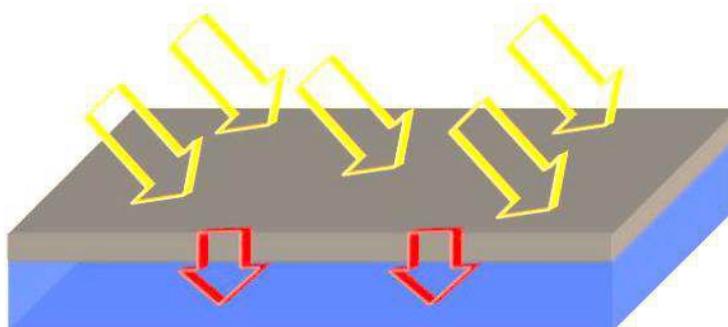


Figura 2 - Absorção de radiação em uma superfície absorvedora

Em amarelo estão representados os raios solares que incidem sobre a superfície, e que por ela são absorvidos. Em vermelho, sua transformação em energia útil.

Fonte: (CIÊNCIA VIVA, 2006)

A temperatura final atingida advém da energia útil que resulta das somas entre a radiação absorvida e as perdas térmicas que ocorrem durante a transferência de calor. Assim, tanto a temperatura como a energia útil, se elevam conforme acresce a radiação absorvida e as perdas térmicas do sistema reduzem (CIÊNCIA VIVA, 2006).

Características dos materiais utilizados na superfície absorvedora influenciarão a sua capacidade de absorção e com isso, a energia útil resultante. A fração da radiação incidente sobre uma superfície é quantificada pelos coeficientes de transmissividade, reflexividade e absorvidade, os quais determinam as propriedades dos materiais. A equação abaixo representa esta relação entre as variáveis.

$$\tau + \Gamma + \alpha = 1 \quad (1)$$

Os processos de transferência de calor, condução, convecção ou radiação, geram perdas térmicas no sistema, ilustradas na Figura 3.

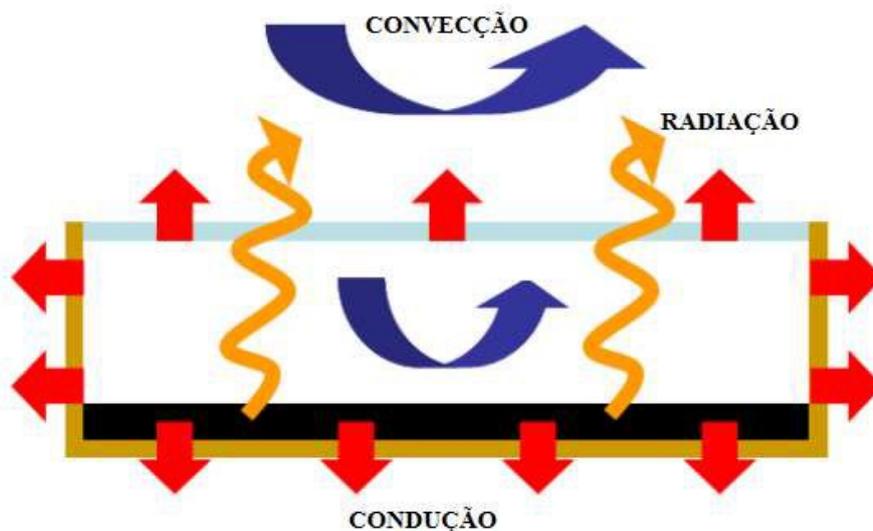


Figura 3 – Perdas térmicas: Condução, Convecção e Radiação

Fonte: (CIÊNCIA VIVA, 2006)

A condução é a transferência de calor no interior de um corpo sólido, ou entre dois corpos sólidos em contato direto, é função da área transversal, do fluxo de calor, e da condutividade do material. Sonntag e Borgnakke (2013), descreve a convecção como o escoamento de um fluido, sobre ou próximo a uma superfície que apresenta uma temperatura diferente daquela do meio que escoar. Já a radiação pode ser definida como a energia transmitida por ondas eletromagnéticas no espaço, mas sendo necessário um meio material para que haja tanto a emissão quanto a absorção de energia.

A fim de diminuir as perdas térmicas por condução, podem-se utilizar isolantes no entorno dos coletores, ou reduzir sua área de superfície. Perdas por convecção são reduzidas limitando-se o escoamento do fluido sobre a superfície absorvedora. O vidro, se usado como cobertura, posicionado acima da superfície absorvedora, pode ser utilizado para evitar perdas térmicas por radiação. Esse material, possui alta transmissividade, para comprimentos de onda curtos (espectro solar), e uma baixa transmissividade para comprimentos de onda longos (espectro emissão), conforme gráfico da Figura 4, ocasionando o chamado efeito estufa, que favorece o rendimento térmico.

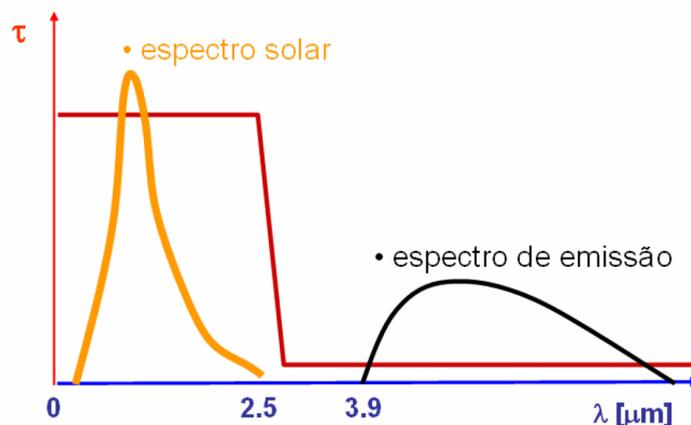


Figura 4 – Transmissividade no espectro Solar e da Emissão

Fonte: Adaptado de (CIÊNCIA VIVA, 2006)

## 2.2. Conversor solar fotovoltaico

### 2.2.1. Efeito fotovoltaico

O efeito fotovoltaico é o fenômeno físico que permite a conversão do fluxo de energia solar em eletricidade diretamente. Descrito pela primeira vez em 1839, por Edmond Becquerel, este fenômeno ocorre quando a radiação eletromagnética do sol, incide sobre uma célula de materiais semicondutores, resultando em uma diferença de potencial, secundária a absorção de luz (PINHO e GALDINO, 2014).

Os materiais classificados como semicondutores se caracterizam por possuírem uma banda de valência preenchida por elétrons e uma banda de condução “vazia” (sem elétrons) na temperatura do zero absoluto (0 K), fazendo com que os semicondutores sejam isolantes a 0 K (PINHO e GALDINO, 2014).

Denominada banda proibida (*bandgap*, ou *gap*), essa se constitui por ser a separação entre as duas bandas de energia, condução e valência, onde a energia pode variar até 3 eV (elétron-volt), no caso dos materiais semicondutores, contrapondo-se aos materiais considerados isolantes, em que o valor da banda proibida é maior.

A Figura 5 demonstra as bandas de energia em condutores, semicondutores e isolantes.

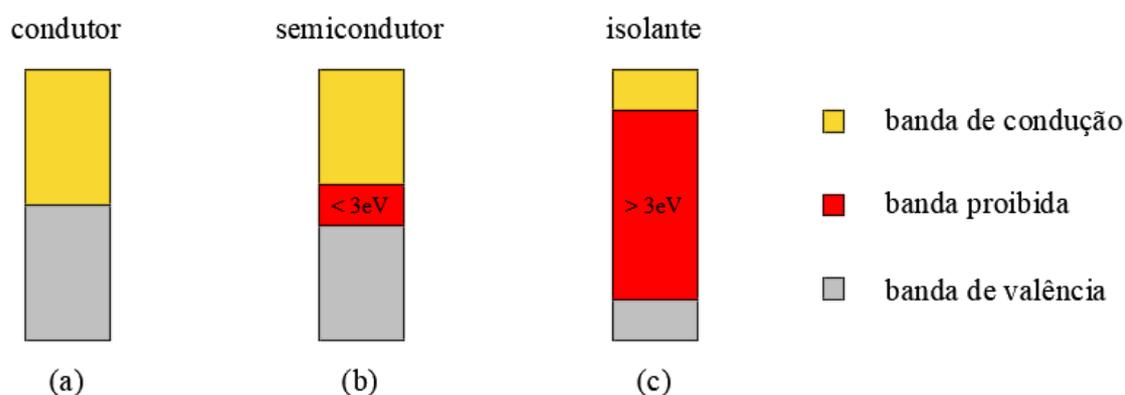


Figura 5 - Bandas de energia em condutores (a), semicondutores (b) e isolantes (c)

Fonte: Adaptada de (PINHO e GALDINO, 2014)

Atualmente, numerosas tecnologias são encontradas para produção de células e módulos fotovoltaicos. Dentre elas se destacam as de silício monocristalino, a do silício policristalino e a de filme fino de silício (VILLALVA, 2015). Os seus átomos caracterizam-se por possuírem quatro elétrons que se ligam aos átomos vizinhos, formando uma rede cristalina pura.

As propriedades de um semicondutor podem ser modificadas pela adição de materiais dopantes ou impurezas, como o fósforo, que é um doador de elétrons e denomina-se dopante do tipo N. Por se tratar de um átomo pentavalente, haverá um elétron em excesso fracamente ligado a seu átomo de origem, assim, com pouca energia, este elétron passa para a banda de condução. Em contrapartida, ao introduzir um átomo trivalente, como o boro, haverá a falta de um elétron para satisfazer a ligação com o silício da rede, criando uma lacuna. Com a pouca energia pode-se deslocar um elétron de uma região vizinha para esta região. Assim, o boro é um dopante receptor de elétrons e denomina-se dopante do tipo P.

A Figura 6(a) mostra o semicondutor N e a Figura 6(b) o semicondutor P, onde pode ser observado o elétron em excesso e as lacunas, respectivamente.

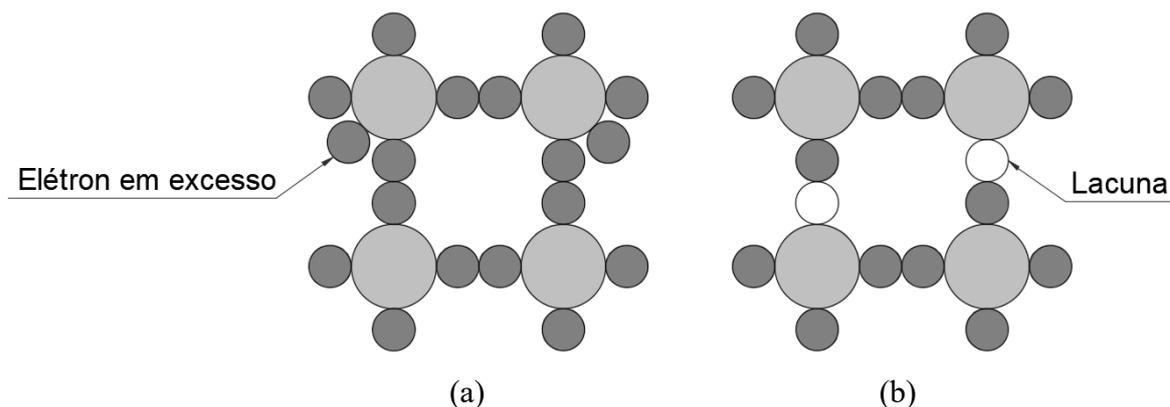


Figura 6 - Estrutura molecular dos semicondutores N (a) e dos semicondutores P (b)

Fonte: Adaptada de (VILLALVA, 2015)

Os elétrons preenchem os níveis de energia vagos a partir do fundo da banda de condução para cima. As lacunas, contudo, ocupam os níveis desde o topo da banda de valência até embaixo. A compreensão deste comportamento pode ser auxiliada pela seguinte analogia: as lacunas se comportam na banda de valência como bolhas num meio líquido mais denso, por isso flutuam na superfície do líquido, já os elétrons na banda de condução são como bolas mais densas que o líquido, por isso se acumulam no fundo (PINHO e GALDINO, 2014).

Na formação da junção PN, dois tipos materiais semicondutores são colocados em contato, tipo P e tipo N, separados por uma fina camada de transição. Nessa junção, uma parcela dos elétrons em excesso do lado N passa para o lado P onde a concentração de elétrons é menor, da mesma forma, as lacunas em alta concentração no lado P passam para o lado N, resultando em acúmulo de elétrons no lado P, tornando-o negativamente carregado e uma redução de elétrons do lado N, que o torna eletricamente positivo. Forma-se então, um campo elétrico permanente no sentido da região P que se opõe a difusão (Figura 7), impedindo o trânsito de mais elétrons e lacunas, devido ao potencial negativo da região P repelir os elétrons da região N e, de forma análoga, o potencial positivo da região N repelir os buracos da região P. A difusão continua até alcançar o equilíbrio com o campo elétrico, o que configura uma distribuição de cargas estacionárias, tornando as regiões P e N eletricamente neutras. Para essa zona dá-se o nome de zona de transição ou depleção, em virtude de o campo gerado expulsar as cargas.

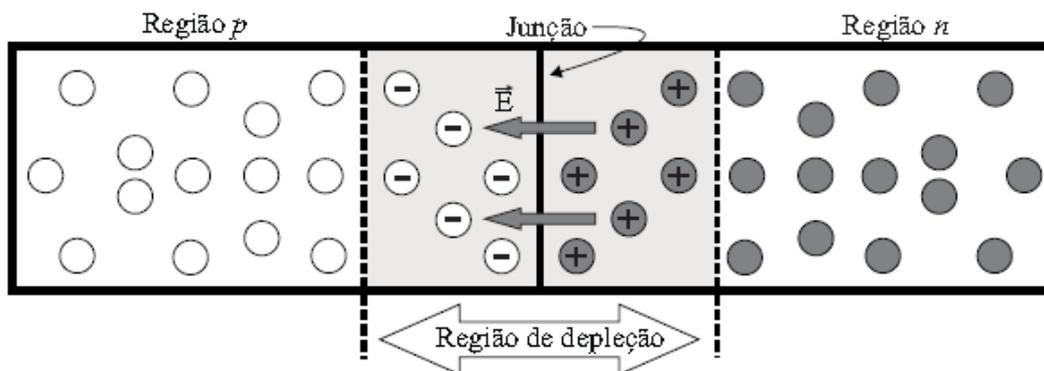


Figura 7 – Materiais semicondutores unidos para formar uma junção PN

Fonte: Adaptado de (JUNIOR, 2018)

Por ser fina, a camada superior de material N de uma célula fotovoltaica favorece a passagem da luz e permite descarregar sua energia sobre os elétrons, de maneira que, eles vençam a barreira de potencial e, desloquem-se da camada N para camada P.

A geração de pares elétron-lacuna ocorre através da exposição de uma junção PN a fótons com energia superior à da zona de depleção. Uma corrente é gerada a partir do movimento das cargas elétricas criando uma diferença de potencial, quando esse evento acontece em uma região cujo campo elétrico é diferente de zero. A este fenômeno denomina-se efeito fotovoltaico.

Os eletrodos metálicos coletam os elétrons em movimento. Se houver um circuito fechado, os elétrons vão circular em direção aos eletrodos da camada N, formando uma corrente elétrica, demonstrada na Figura 8.

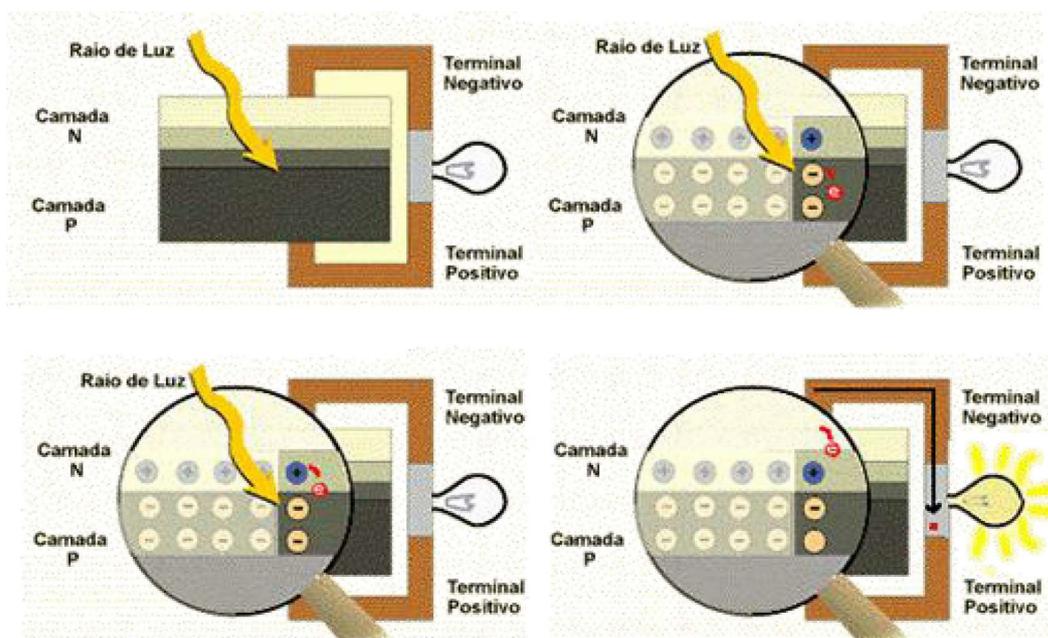


Figura 8 - Efeito fotovoltaico em na junção PN

Fonte: (CRESESB, 2006)

Vários são os elementos que interferem na conversão da energia da luz em energia elétrica, como por exemplo, o espectro da radiação. Apesar da ampla faixa do espectro da radiação, somente comprimentos de onda inferiores a  $1,05\mu\text{m}$ , poderão excitar os elétrons para a condução no material (PINHO e GALDINO, 2014). Ademais, apenas um elétron é excitado por cada fóton, assim sendo, fótons com energia superior à necessária para excitar um elétron ou com energia insuficiente para excitar um elétron, terão essa energia transformada em calor. O acúmulo de calor elevará a temperatura e reduzirá a eficiência da conversão fotovoltaica da célula.

### 2.2.2. Células fotovoltaicas

A célula fotovoltaica é o componente fundamental do sistema de conversão fotovoltaica. Uma única célula produz pouca eletricidade, a fim de otimizar a sua produção, várias células são agrupadas, dando origem aos módulos fotovoltaicos. Um conjunto de módulos forma um arranjo fotovoltaico, como ilustra a Figura 9.

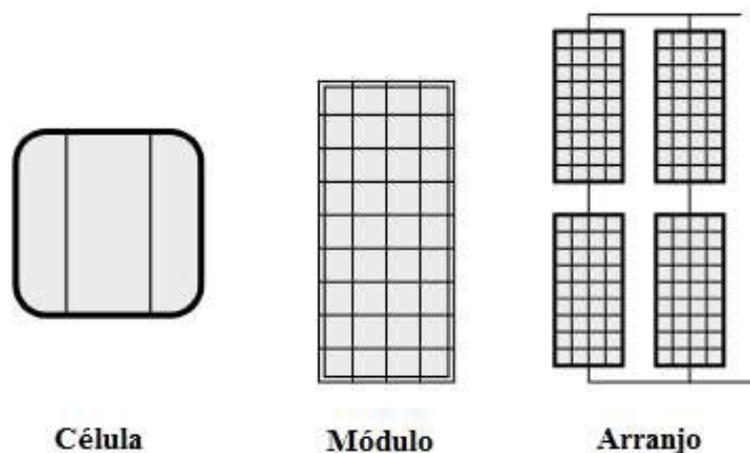


Figura 9 - Células, módulos e arranjos fotovoltaicos

Fonte: Masters, 2004

A Figura 10 esquematiza o módulo fotovoltaico e detalha seus componentes.

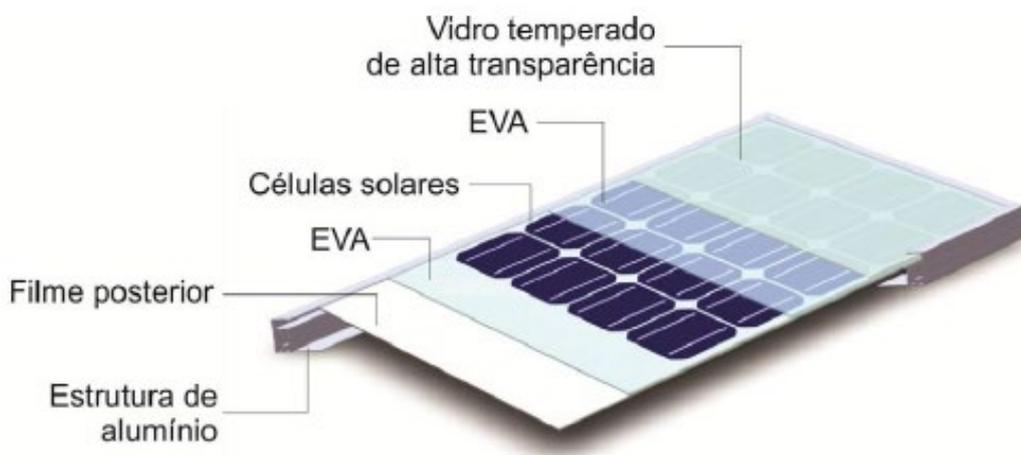


Figura 10 – Esquema enfatizando os principais componentes de um módulo fotovoltaico

Fonte: (PINHO e GALDINO, 2014)

### 2.2.3. Funcionamento e característica dos módulos fotovoltaicos

As células fotovoltaicas são capazes de fornecer uma tensão elétrica de saída de até 0,6 V, com a finalidade de aumentar a tensão elétrica de saída, as células são conectadas em série (VILLALVA, 2015).

Sabendo que a corrente elétrica é diretamente proporcional a fração de luz recebida, a área da célula é determinante na produção da corrente fornecida.

Tensão e corrente elétricas podem ser relacionadas traçando uma curva, sobre a qual se estabelece o ponto de operação do módulo fotovoltaico.

O gráfico da Figura 11 mostra uma curva característica I-V, da corrente em função da tensão e, uma curva de potência em função da tensão P-V, para um módulo fotovoltaico.

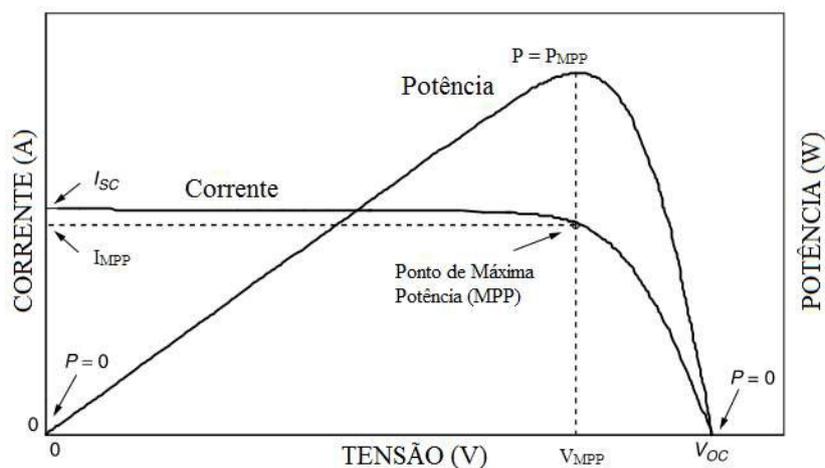


Figura 11 – Curva característica I-V e curva de potência P-V de um módulo fotovoltaico

Fonte: (MASTERS, 2004)

Onde:

$I_{SC}$  → Corrente elétrica de curto circuito;

$V_{OC}$  → Tensão elétrica de circuito aberto;

$I_{MPP}$  → Corrente elétrica no ponto de máxima potência;

$V_{MPP}$  → Tensão elétrica no ponto de máxima potência;

$P_{MPP}$  → Potência máxima produzida;

$MPP$  → Ponto de máxima potência (Ponto onde a produção de energia é máxima).

#### 2.2.4. Influência da radiação solar

O módulo fotovoltaico fornece uma corrente elétrica que varia diretamente com a quantidade de radiação solar incidente sobre as células do módulo, já a tensão elétrica mantém-se inalterada para o mesmo ponto.

A Figura 12 demonstra-se como radiação solar afeta a curva característica I-V de um módulo fotovoltaico.

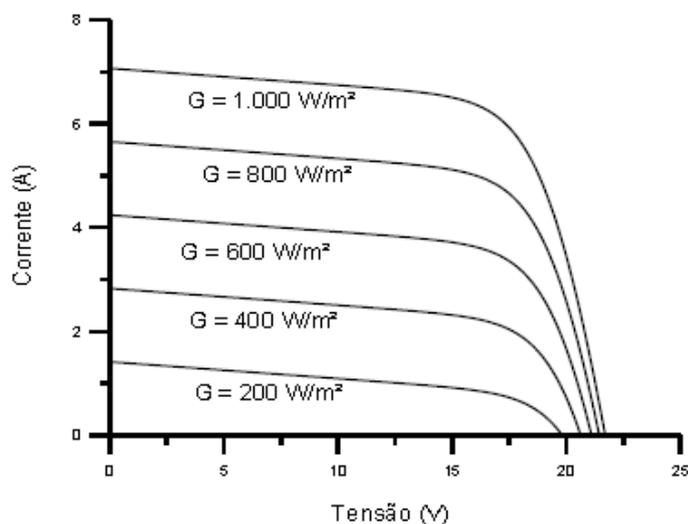


Figura 12 - Efeito causado pela variação da irradiância sobre a curva característica I-V do módulo fotovoltaico

Fonte: (PINHO e GALDINO, 2014)

O gráfico da Figura 13 ilustra a variação da potência elétrica influenciada pela irradiância solar.

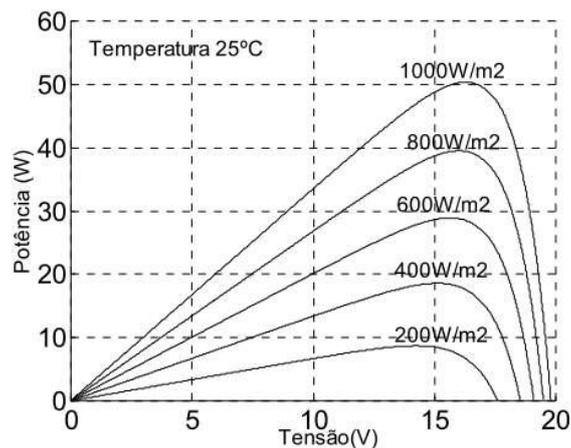


Figura 13 - Efeito causado pela variação da irradiância sobre a curva de potência P-V do módulo fotovoltaico

Fonte: (LEVA, SALERNO, *et al.*, 2004)

### 2.2.5. Influência da temperatura

A temperatura das células que formam o módulo se eleva com o aumento da irradiância ou da temperatura ambiente, com isso a tensão elétrica será reduzida, resultando em diminuição da potência elétrica fornecida à carga, sem alteração importante na corrente elétrica.

O gráfico abaixo (Figura 14) ilustra o efeito causado pela temperatura sob uma irradiância constante.

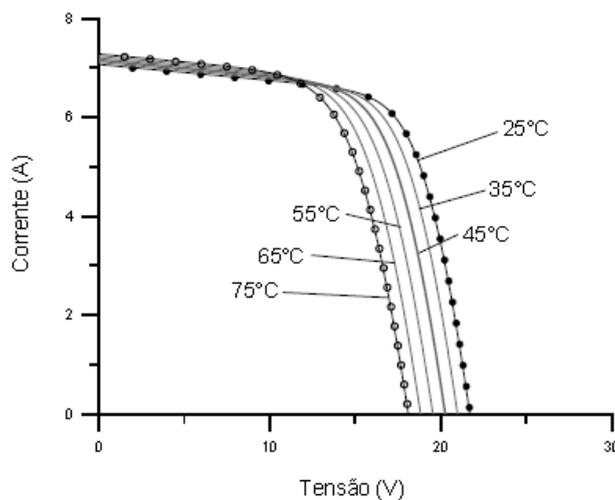


Figura 14 – Efeito causado pela variação da temperatura sobre a curva característica I-V do módulo fotovoltaico

Fonte: (PINHO e GALDINO, 2014)

Enquanto, o gráfico da Figura 15 demonstra a redução da tensão elétrica e do ponto

de máxima potência, em função da temperatura.

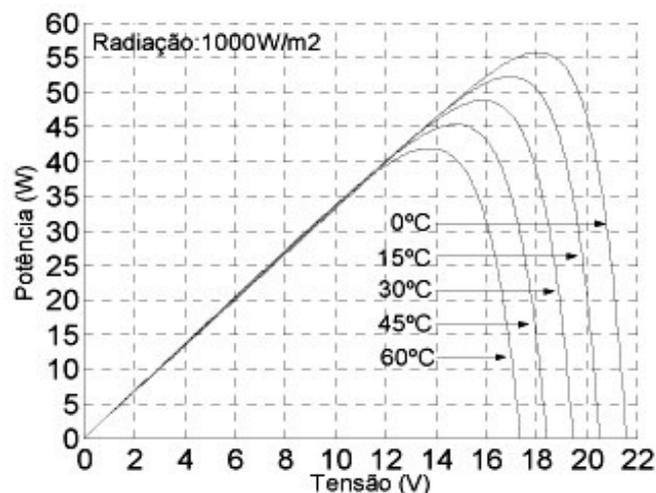


Figura 15 - Efeito causado pela variação da temperatura sobre a curva de potência P-V do módulo fotovoltaico

Fonte: (LEVA, SALERNO, *et al.*, 2004)

Altas temperaturas podem causar redução de potência elétrica gerada, danos às células, redução da sua eficiência e vida útil.

### 2.3. Conversor solar híbrido PVT

Os sistemas híbridos, também conhecidos como PVT, tem por finalidade a cogeração de energia elétrica e térmica a partir da energia solar, conforme diagrama esquemático da Figura 16. Estes coletores são capazes de ampliar a produção energética por metro quadrado, quando comparado por sistemas independentes - coletor solar térmico e módulo fotovoltaico (FORTUIN, HERMANN, *et al.*, 2014).

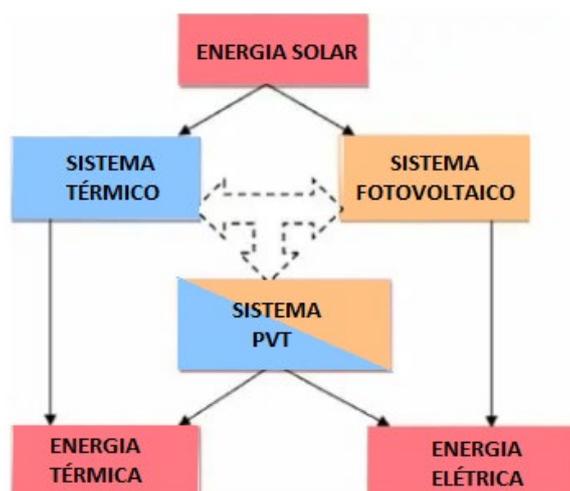


Figura 16 – Esquemático da união dos sistemas térmico e fotovoltaico

Fonte: Adaptada de (KUMAR, BAREDAR e QURESHI, 2015)

A Figura 17 mostra exemplos de um coletor solar térmico em um telhado (a), de um módulo fotovoltaico (b) e de um coletor híbrido PVT (c).

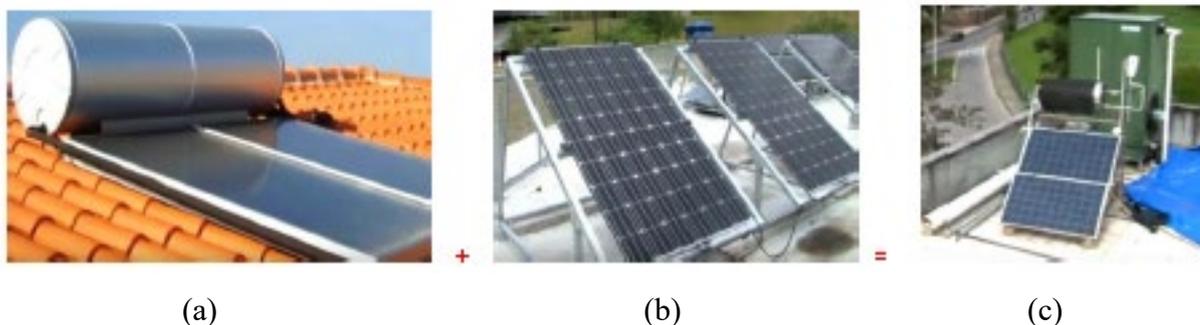


Figura 17 – Coletor Solar Térmico (a), Módulo PV (b) e Coletor Híbrido PVT (c)

Fonte: Adaptada de (OLIVEIRA, MIRANDA, *et al.*, 2017)

Os sistemas híbridos são compostos por um módulo fotovoltaico conectado a uma placa absorvedora na sua face posterior e um sistema de extração de calor, levando ao arrefecimento das células fotovoltaicas. Com isto, o desempenho elétrico do módulo aumenta e permite o aproveitamento da energia térmica transferida para o fluido resfriador.

Os coletores PVT dividem-se em: coletores PVT do tipo ar, coletores PVT do tipo água; e os coletores PVT do tipo ar e água (TEIXEIRA, 2009).

### **2.3.1. Coletor PVT do tipo ar**

Como o próprio nome sugere, o coletor PVT do tipo ar, utiliza como fluido de arrefecimento o ar, seja por ventilação natural ou forçada, esse último apresenta uma melhor eficiência, pois proporciona uma maior taxa de transferência de calor. Nesta configuração, as células fotovoltaicas atuam também, como superfície absorvedora.

As configurações existentes de coletores PVT do tipo ar se diferenciam conforme o modo de passagem do fluxo de ar, que pode ser acima, abaixo ou nas laterais da placa absorvedora, bem como, ser simples ou dupla, conforme pode ser visualizado na Figura 18.

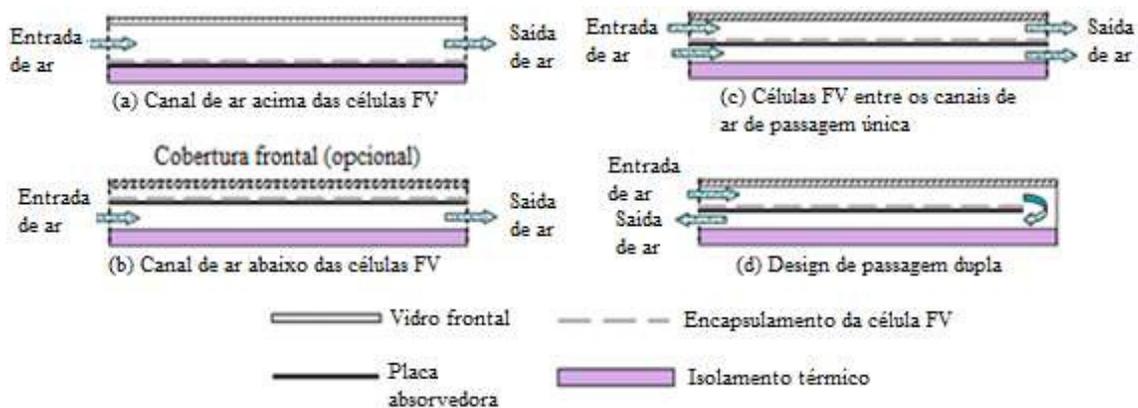


Figura 18 - Vista transversal dos coletores PVT do tipo ar

Fonte: (CHOW, 2010)

Esse sistema é bastante utilizado em aplicações práticas, destacando-se pelo uso de pouco material para sua construção.

Como característica deste modelo de coletor pode-se citar uma reduzida transferência de calor e altos índices de perdas ocasionadas pela sua resistividade térmica mais elevada e pelas fugas no sistema.

Os coletores PVT do tipo ar são habitualmente empregados em fachadas de edificações, como por exemplo em calefações de residências, sobretudo para aquecer ambientes em regiões de clima frio, além de fornecer energia elétrica. Como desvantagem dessa configuração pode-se citar o seu campo de uso limitado, principalmente no verão, onde não há demanda por ar quente.

### 2.3.2. Coletor PVT do tipo água

Os coletores PVT do tipo água consistem, usualmente, em uma placa absorvedora com tubos ou dutos soldados, ou até mesmo em canais, o que permite contato direto com o módulo fotovoltaico associado e uma maior eficiência elétrica, através da extração direta de calor.

A Figura 19 mostra a seção transversal dos diferentes tipos de coletores PVT do tipo água citados e mais comumente encontrados.

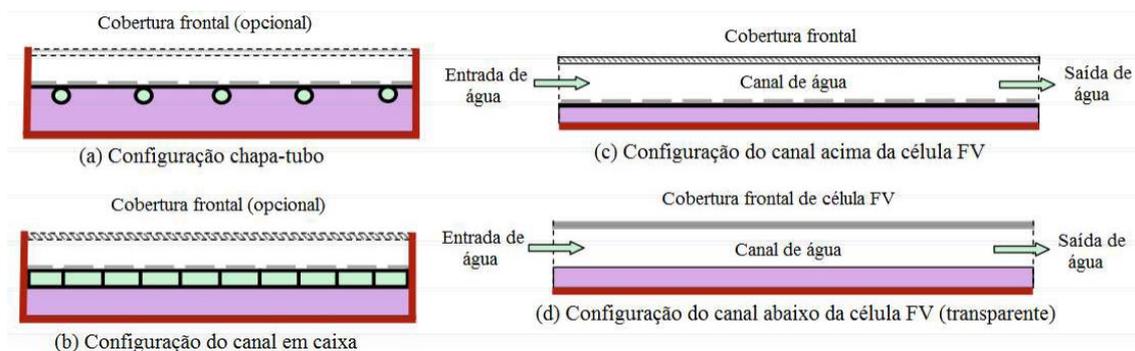


Figura 19 - Vista transversal dos coletores PVT do tipo água

Fonte: (CHOW, 2010)

Além da geração de energia elétrica, o coletor PVT produz água aquecida que pode ser aproveitada para diversos fins. O calor é captado pela superfície absorvedora e parte dele é transferido para a água, aumentando sua temperatura e, conseqüentemente provocando o arrefecimento no módulo fotovoltaico, melhorando sua eficiência elétrica e gerando uma eficiência térmica (ALMEIDA, 2008).

Estes coletores caracterizam-se pela sua fácil integração em edifícios, tal como os coletores térmicos. No entanto, deve-se ter cuidado no tipo de absorvedor escolhido, uma vez que, deve-se garantir que não haja espaço de ar entre o módulo e o fluido reduzindo a sua resistência térmica, no caso daqueles não constituídos de canais, o que poderia interferir de forma negativa na eficiência.

### 2.3.3. Coletor PVT do tipo ar e água

Esses tipos de coletores utilizam tanto água quanto ar como fluido de arrefecimento do módulo fotovoltaico. Tal mecanismo faz com que o calor, que desfavorece o rendimento elétrico, seja transferido para o fluido arrefecedor e, assim, convertido em calor útil para as aplicações térmicas.

Teixeira (2009), classifica quanto à configuração e, subdivide em quatro grupos, placa e tubo, canal, escoamento e duas superfícies absorvedoras. Esses quatro tipos serão tratados em tópicos em separado.

#### 2.3.3.1. Placa e tubo

São aqueles que apresentam a mais simples configuração dentre as opções de coletores PVT do tipo ar e água, este coletor é formado por um módulo fotovoltaico em contato com um coletor térmico.

A fim de melhorar sua isolamento térmica, aumenta-se o número de coberturas, porém, a eficiência elétrica do coletor será reduzida com as reflexões adicionais geradas.

A Figura 20 representa a vista transversal do coletor PVT do tipo ar e água placa e tubo e seus principais componentes.

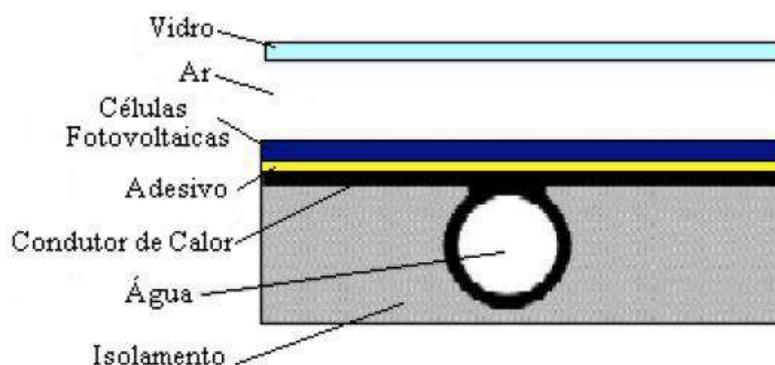


Figura 20 - Vista transversal do coletor híbrido PVT do tipo ar e água placa e tubo

Fonte: (MARQUES, 2008)

### 2.3.3.2. Canal

O coletor PVT do tipo ar e água canal é constituído por duas camadas sobre o módulo fotovoltaico, sendo cada camada denominada canal, por onde passarão os fluidos de arrefecimento.

A Figura 21 ilustra a vista transversal do coletor PVT do tipo ar e água canal e seus principais componentes.

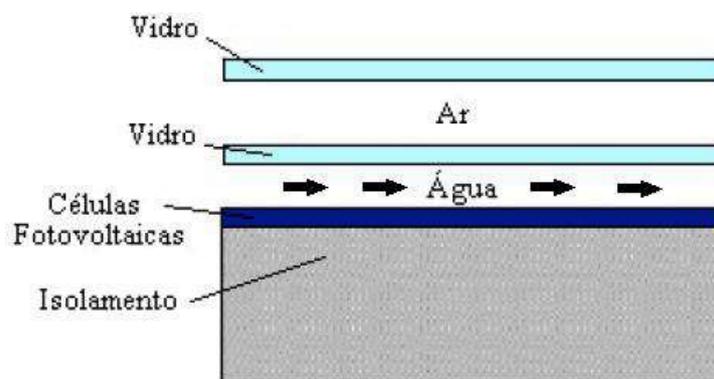


Figura 21 - Vista transversal do coletor híbrido PVT do tipo ar e água canal

Fonte: Adaptado de (MARQUES, 2008)

Devido ao contato direto entre o módulo fotovoltaico e a água a configuração de canais torna o sistema mais eficiente do que o tipo placa e tubo, entretanto, existe a preocupação em relação a largura do canal, se muito larga, a placa de vidro necessita ser espessa o suficiente para não ceder à pressão da água, resultando assim numa construção

pesada, mas frágil (CHARALAMBOUS, MAIDMENT, *et al.*, 2007).

Os coletores PVT tipo canal necessitam que o fluido tenha um espectro de absorção diferente do módulo fotovoltaico, bem como uma elevada transmissividade no espectro da radiação solar quando o fluido escoar acima do módulo fotovoltaico (TEIXEIRA, 2009).

Uma variação na montagem do coletor da Figura 21 é obtida caso se opte por fazer circular a água por debaixo do módulo fotovoltaico.

### 2.3.3.3. Escoamento

O coletor PVT de escoamento livre, não apresenta restrição ao fluxo, de forma que os fluidos água e ar podem escoar livremente sobre o módulo fotovoltaico, necessitando apenas que o líquido seja transparente para que o espectro solar alcance as células fotovoltaicas.

A Figura 22 representa a vista transversal do coletor PVT do tipo ar e água escoamento e seus principais componentes.

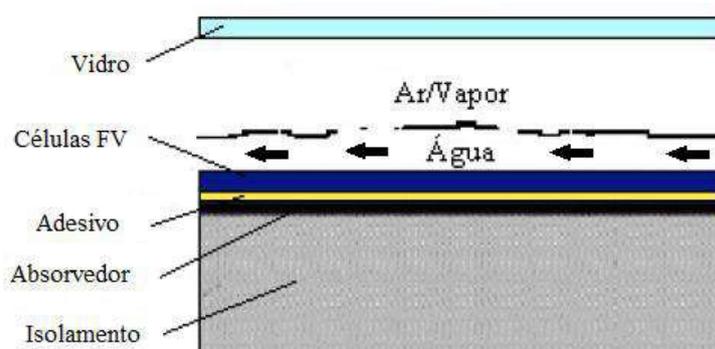


Figura 22 - Vista transversal do coletor híbrido PVT do tipo ar e água de escoamento livre

Fonte: (MARQUES, 2008)

Quando comparado o coletor PVT do tipo escoamento livre com o coletor PVT do tipo canal, tem-se a redução de uma camada de vidro, o que minimiza as reflexões responsáveis por uma menor eficiência elétrica do coletor, ademais, tem-se ainda menor custo com materiais e fragilidade do equipamento, evita-se também, a quebra do vidro de cobertura. Como desvantagem do modelo escoamento, pode-se citar maiores perdas por evaporação.

#### 2.3.3.4. Duas superfícies absorvedoras

A configuração com duas superfícies absorvedoras utiliza um absorvedor primário que são as células fotovoltaicas transparentes, e um absorvedor secundário, como uma chapa de metal preto fosca. Esse coletor possui um canal de água no seu topo, por onde a água entra, retornando pelo canal inferior, o que promove maior extração do calor e eleva a eficiência térmica e elétrica do coletor.

A Figura 23 representa a vista transversal do coletor PVT do tipo ar e água com duas superfícies absorvedoras e seus principais componentes.

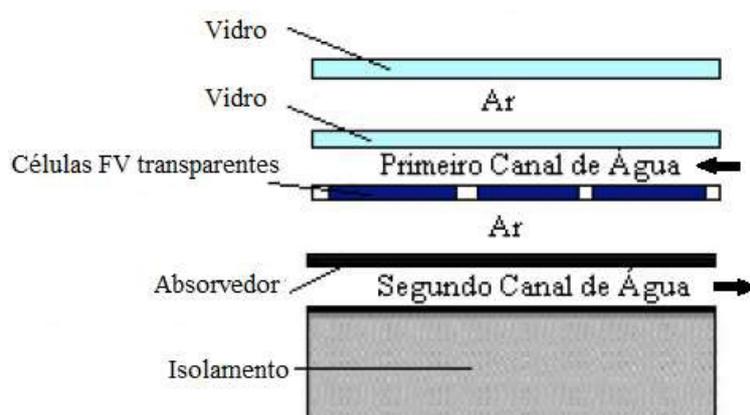


Figura 23 - Vista transversal do coletor híbrido PVT do tipo ar e água com duas superfícies absorvedoras

Fonte: (MARQUES, 2008)

#### 2.4. Coletores cobertos e descobertos

Os coletores podem ainda ser cobertos ou descobertos, e em geral utilizam o vidro ou outro material translúcido como cobertura.

Os coletores cobertos possibilitam a passagem da irradiação solar com pequenos comprimentos de onda, porém a cobertura bloqueia a passagem de grandes comprimentos de onda emitidos pelo absorvedor, o que cria um efeito estufa. Além disso, apresentam menores perdas por convecção e radiação, melhorando seu desempenho térmico. São ideais para aplicações que requeiram temperaturas mais elevadas, como aquecimento de água para banho.

Os coletores abertos operam em temperaturas mais baixas, e são muito utilizados para aquecimento de água para piscinas, nas quais as temperaturas variam entre 25°C a 35°C para fins esportivos ou terapêuticos (PROCÓPIO, 2016).

### 3. INSERÇÃO DA TECNOLOGIA PVT NO MERCADO

#### 3.1. Módulos comercializados

Nas últimas quatro décadas, o desenvolvimento de tecnologias solares e térmicas, em sistemas híbridos, vêm crescendo rapidamente (CHOW, 2010). Os sistemas PVT, como descritos anteriormente, proporcionam a cogeração de energia elétrica e térmica a partir da energia solar. Assim, a tecnologia híbrida desempenha um papel importante e promissor para fornecimento de energia renovável.

Existem diversos tipos de módulos PVT, que podem ser categorizados de acordo com as variações de suas características, bem como pela sua disponibilização no mercado (disponíveis, em desenvolvimento e produção/vendas interrompidos).

A tecnologia de desenvolvimento dos módulos foi aprimorada separadamente, com o objetivo de obter melhores resultados quanto à eficiência, custo-benefício, confiabilidade e durabilidade, o que culminou em diferentes construções e materiais, e também, em diferentes padrões e testes a serem cumpridos (FORTUIN, HERMANN, *et al.*, 2014).

Zondag, Van Helden, *et al.* (2006), propõe uma classificação baseada nos critérios: ar, água, concentrador, placa plana coberto, e placa plana descoberto. Os critérios se relacionam com: o meio de remoção de calor, o nível de irradiação e o nível de isolamento do coletor. Essa categorização é útil para inserção no mercado e aplicação.

Em um levantamento realizado por Keizer, Bottse e Jong (2017), pela empresa Solar Energy Application Centre, foram encontrados no mercado 92 módulos PVT. Destes, 54 são vendidos atualmente, sendo 11 originários da Holanda. Outros 6 produtos estão em desenvolvimento, e 32 foram retirados de produção. A maioria dos módulos disponíveis é fabricada por empresas situadas na Europa (46). Existem ainda, módulos produzidos na China (1), Austrália (1), Israel (3), EUA (1) e Canadá (2).

A Figura 24 mostra os coletores de líquidos de placa descobertos representando 72% da disponibilidade total do módulo PVT. Esses coletores possuem bom desempenho em aplicações que exigem baixa temperatura.

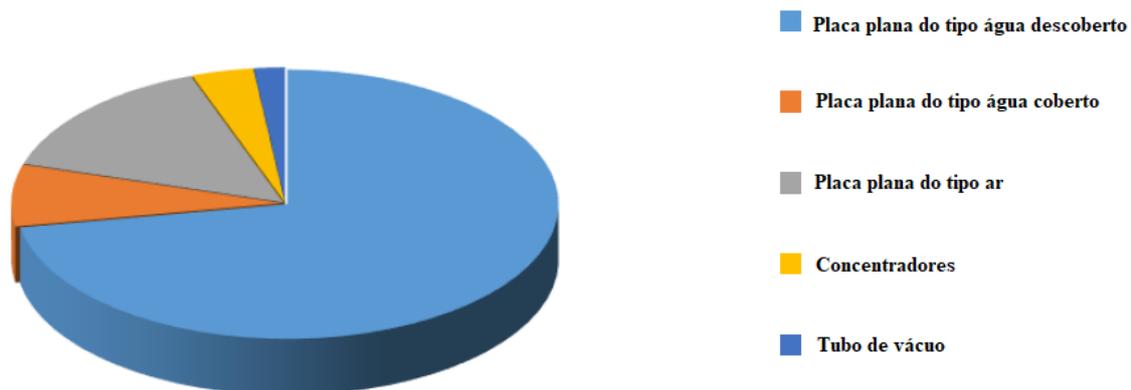


Figura 24 - Classificação de produtos PVT disponíveis

Fonte: Adaptada de (KEIZER, BOTTSE e JONG, 2017)

### 3.1.1. Exemplos de módulos PVT

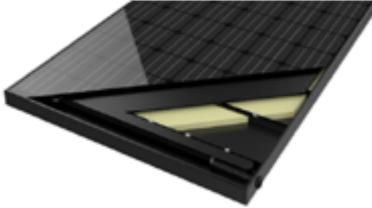
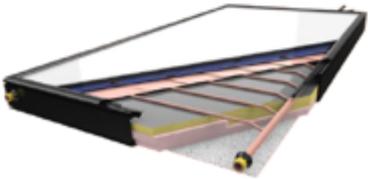
TIPOS	DESCRIÇÃO	EXEMPLO
<b>1. Placa plana descoberto sem isolamento térmico</b>	Módulo PVT com um absorvedor sem isolamento térmico. A vantagem deste tipo de módulo é que também pode ser coletado calor ambiente. Assim, durante dias nublados ou mesmo noites com temperatura ambiente mais alta que a temperatura do fluido. O módulo pode produzir calor de ambos os lados para aplicações em baixa temperatura. A principal desvantagem é que esses módulos apresentam altas perdas de calor devido à dissipação de calor pela parte de trás.	 <p>Ex.: Triple Solar PVT Disponível em: <a href="http://www.triplesolar.eu">www.triplesolar.eu</a></p>
<b>2. Placa plana descoberto sem isolamento térmico, trocador de calor integrado</b>	Trocadores de calor que se ajusta a diferentes tipos de módulos fotovoltaicos comerciais, permitindo que qualquer módulo fotovoltaico seja “hibridizado” em um módulo PVT. Este conceito introduz flexibilidade na escolha do módulo fotovoltaico e introduz a modernização dos módulos fotovoltaicos já instalados.	 <p>Ex.: Alius Solar Disponível em: <a href="http://www.aliusenergy.nl">www.aliusenergy.nl</a></p>
<b>3. Placa plana descoberto com isolamento térmico</b>	Módulos PVT descobertos com isolamento térmico. Sua principal vantagem é a redução de perdas de calor durante períodos com alta irradiância. Além disso, podem ser geradas temperaturas mais altas, portanto, um armazenamento térmico deve ser incluído no sistema para evitar estagnação e superaquecimento das células fotovoltaicas.	 <p>Ex.: DualSun Spring Disponível em: <a href="http://www.dualsun.fr">www.dualsun.fr</a></p>
<b>4. Placa plano coberto</b>	Módulos cobertos com um espaço de ar entre a camada de vidro externa e as células fotovoltaicas. Esses módulos podem gerar temperaturas mais altas, no entanto, as células fotovoltaicas operam em temperaturas mais altas, resultando em menor eficiência elétrica.	 <p>Ex.: Volther Powertherm Disponível em: <a href="http://www.solimpeks.com">www.solimpeks.com</a></p>

Tabela 1 – Exemplos de módulos PVT

Fonte: Adaptada de (KEIZER, BOTTSE e JONG, 2017)

### 3.2. Barreiras e oportunidades

Apesar da tecnologia dos sistemas híbridos PVT ser promissora, e ampliar a

produção energética por metro quadrado, quando comparada a produção de coletores solares térmicos ou módulos fotovoltaicos separadamente, trata-se ainda de tecnologia incipiente e sem grande inserção no mercado atual.

As vantagens dos sistemas PVT parecem superar as desvantagens, segundo a literatura atual. A alta eficiência e rendimento energético são as principais vantagens descritas (JEE JOE, INIYAN e RANKO, 2015). No entanto, a rentabilidade econômica ainda é baixa, enquanto os custos iniciais de investimento são altos, tornando-se um obstáculo para sua implementação. As principais barreiras para a inserção do PVT estão no domínio técnico ou econômico; as melhorias técnicas geralmente melhoram diretamente a econômica.

No que se refere aos ganhos, destaca-se na tecnologia PVT sua compacidade. Para situações em que a área do telhado, por exemplo, seja limitada ou que haja grande demanda de produção energética por unidade de área, o coletor híbrido atenderia bem o propósito. Aliado a isto, a integração estética favorece sua receptividade no mercado.

A estética de um sistema de PVT se encaixa entre um BIPV (*Building Integrated Photovoltaics*), células ou módulos integrados na construção de elementos ou materiais como parte da estrutura do edifício, e um sistema *side-by-side*, instalações lado a lado de coletores solares térmicos e módulos fotovoltaicos, e pode ser aprimorada com o desenvolvimento do BIPVT (*Building Integrated Photovoltaic Thermal Collectors*). A ideia é aumentar o valor estético, pois o sistema PVT tem uma aparência homogênea. Os módulos solares térmicos e fotovoltaicos não possuem as mesmas dimensões e cores, deixando sem homogeneidade o telhado, com perda do seu valor estético.

A crescente necessidade de conforto abre espaço para aplicação dos coletores híbridos a ar, integrados a sistemas de ventilação. Zondag, Van Helden, *et al.* (2006), salienta a perspectiva futura de que nos edifícios, a energia seja fornecida por sistemas solares, com destaque para os coletores híbridos.

A demanda por água quente e aquecimento de ambiente leva a uma maior complexidade de dimensionamento e otimização da configuração do sistema e tamanhos de componentes. Além disso, houve uma descontinuação das empresas produtoras de PVT, o que gera desconfiança e falta de garantias. A difusão do PVT ainda é pequena, tanto para os consumidores em potencial quanto para os instaladores. Se os instaladores não dominarem o produto, não haverá divulgação e o maior canal de vendas será perdido. É necessária maior propagação da tecnologia, para que esta possa ser uma opção de

sistema e de investimento.

A complexidade do sistema PVT para planejamento e instalação atua como um limitador. Existem poucas regras e ferramentas para planejamento disponíveis. Para instalação do sistema PVT, são necessários dois instaladores para conectar as peças elétricas e térmicas, porém, na maioria das vezes esse trabalho é executado por empresas diferentes, com conhecimentos específicos na área solar térmica ou fotovoltaica, dificultando o processo.

No que se refere aos custos com o sistema híbrido, como dito anteriormente, o investimento inicial é alto. No entanto, a instalação combinada, quando comparada à soma dos custos da instalação de um sistema fotovoltaico e solar térmico do mesmo tamanho, separadamente, pode ter custos inferiores.

Os módulos fotovoltaicos e os coletores solares térmicos têm seus próprios padrões, procedimentos de teste e certificações. No entanto, não existe um método específico para padronização da tecnologia PVT como uma categoria separada.

Os parâmetros elétricos e as dimensões dos sistemas PVT são correspondentes aos dos módulos fotovoltaicos, já os parâmetros térmicos não condizem com os parâmetros dos coletores térmicos solares descobertos. Dos 39 módulos de placa plana descobertos disponíveis, 18 possuem certificações para as propriedades elétricas do módulo (IEC 61215, 2016) (IEC 61730, 2016). Além disso, 16 módulos são certificados com o *Solar Keymark*, após serem testados para a parte térmica do módulo (EN 12975, 2006). Isso significa que cerca de 40% dos módulos PVT foram certificados como um sistema solar térmico na Europa. Na Holanda, onde há grande desenvolvimento desta tecnologia, nenhum módulo PVT possui certificações (KEIZER, BOTTSE e JONG, 2017).

O governo tem importante atuação para inserção de tecnologias no mercado, através de políticas de orientação e incentivo ao desenvolvimento tecnológico e criação de legislação para regulamentação do produto. A falta de certificação e legislação adequada dos módulos híbridos contribui para dificuldade de expansão da tecnologia (ZONDAG, VAN HELDEN, *et al.*, 2006).

Na União Europeia, os governos criaram metas relacionadas a capacidade e geração de energia renovável, para 2020 e 2050. No Brasil, o Plano Nacional de 2030 aborda outras fontes renováveis como um caminho, porém, não especula a respeito da tecnologia PVT no mercado.

Políticas públicas têm sido criadas no Brasil, com intuito de estimular a busca por

fontes renováveis de energia e diversificação da matriz energética. Destacando-se o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) e recursos da Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), instituídos pela Lei nº 10.438 de 26 de abril de 2002 (MME, 2006). Bem como, a Resolução Aneel n.482/2012, que estabelece um sistema de compensação de energia elétrica no Brasil (*Net Metering*), no qual unidades consumidoras com micro ou minigeração distribuída (potência instalada de até 1 MW), a partir de fonte hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, podem compensar seu consumo de energia.

Outro exemplo é o Programa Luz para Todos, trazendo a tecnologia fotovoltaica como destaque. Estima-se que em localidades isoladas da região Amazônica, o sistema fotovoltaico pode ser utilizado individualmente ou de forma híbrida. Cerca de 5.000 localidades poderão ser atendidas com sistemas fotovoltaicos e outras 2.000 com sistemas híbridos (PNE 2030, 2007). Este dado demonstra grande potencial para aplicação da tecnologia PVT no Brasil.

Assim, como demonstrado, apesar de ser uma tecnologia amplamente diversificada e de fácil adaptação, os coletores híbridos ainda encontram entraves para sua inserção no mercado competitivo de energia. A viabilidade dos sistemas híbridos está sujeita à sua competitividade tanto técnica quanto econômica em relação às convencionais (HASAN e SUMATHY, 2010).

As barreiras dos altos custos de investimentos e baixa rentabilidade econômica são menos relevantes para os inovadores, uma vez que esses atribuem valor à transição para as energias renováveis e a estética de seus edifícios.

Em resumo, os obstáculos principais para comercialização e difusão da tecnologia PVT são: a falta de viabilidade econômica, conhecimento público, padronização do produto, garantias e certificação de desempenho, treinamento de instalações e experiências.

## **4. ESTUDO DE CASO**

### **4.1.O contexto da energia solar no Brasil**

O consumo energético crescente e o esgotamento das fontes de energia não renováveis, como dito anteriormente, mobilizaram o desenvolvimento de fontes alternativas de energia, limpa e sustentável. Nesse contexto, a sustentabilidade energética propõe o uso eficiente de energia, sem comprometer a demanda e preservando-a para as gerações futuras.

O Brasil, por ser um país tropical com localização próxima a linha do equador, recebe grande quantidade de irradiação solar. Apesar da sua extensão territorial e da variação solar ao longo do ano, a incidência solar é suficiente para ser explorada como fonte energética (EPE, 2016). Esse cenário torna o Brasil um excelente campo para o uso da energia solar como matriz energética, sendo que os maiores potenciais se localizam nos estados de Minas Gerais, Goiás, Tocantins e nos estados da região Nordeste (NASCIMENTO, 2017). É também no Nordeste brasileiro que se encontram os maiores índices de vulnerabilidade social e pobreza do país (IPEA, 2015), o que demonstra a necessidade ainda maior de buscar soluções energéticas social e economicamente viáveis para esta população.

No Brasil, o uso de chuveiros elétricos para aquecimento de água para uso domiciliar é alto, com pequena participação da energia solar para essa aplicação, de modo que, até o momento as fontes solares correspondem a apenas 0,05% da geração de energia no Brasil (NASCIMENTO, 2017).

Somado a isto, a falta de chuvas por longos períodos, tem elevado o custo da energia elétrica produzida pelas usinas hidroelétricas, com aumento de até 60% nas contas de energia (ABSOLAR, 2016), o que reforça a proposta do uso de novas fontes energéticas para o país.

### **4.2.Incentivos governamentais, perspectiva e ampliação do uso da energia solar**

O governo brasileiro tem investido na diversificação da matriz energética, através de políticas públicas. O Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios (Prodeem), criado em 1994, visa atender localidades isoladas e não abastecidas pela rede convencional, através de fontes renováveis locais. Em 2001, foi criado o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA),

incorporado posteriormente ao Programa Luz para Todos, que propõe a utilização da energia fotovoltaica em comunidades isoladas. Segundo o PNE 2030 (2007), localidades da região Amazônica poderiam ser atendidas com o sistema fotovoltaico individualmente ou de forma híbrida.

EPE (2016), estimou que as residências brasileiras são capazes de gerar 230% da energia elétrica que consomem, mediante a instalação de painéis fotovoltaicos em seus telhados.

Em 2015, o governo lançou ainda, o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), que tem por objetivo ampliar e aprofundar ações de estímulo à geração de energia pelos próprios consumidores, a partir das fontes renováveis, especialmente solar térmica e fotovoltaica. A previsão é que o programa movimente até R\$ 100 bilhões em investimentos, e alcance um número de 2,7 milhões de unidades consumidoras, fornecendo energia elétrica, em residências, estabelecimentos comerciais e industriais.

O programa Minha Casa Minha Vida, foi criado em 2009, a fim de viabilizar moradias acessíveis às famílias de baixa renda. Em 2017, o Ministério das Cidades, através da Portaria 643, determinou a utilização de sistemas alternativos de geração de energia para as unidades habitacionais do Programa Minha Casa Minha Vida, contemplando a energia solar térmica e fotovoltaica, individualmente.

Segundo dados do Banco de Informação da Geração da Aneel, no ano de 2015, havia no Brasil 15 MW de geração fotovoltaica instalada (MIAN, 2015). Nos anos seguintes houve regulamentação para geração de energia distribuída, através da regulação normativa da Aneel nº 482 de 2012 e incentivo ao uso da energia fotovoltaica, resultando em 2019, em um potencial total de usinas fotovoltaicas em operação de 2.269.666 kW (ANEEL, 2019).

O custo alto inicial da instalação fotovoltaica fez com que essa tecnologia se desenvolvesse mais lentamente no Brasil, comparada ao uso da energia solar para aquecimento de água. De forma que, o uso da energia solar fotovoltaica restringiu-se, inicialmente ao fornecimento de energia para localidades mais afastadas, como região Norte e Nordeste do Brasil, nas quais não se fazia economicamente viável a construção de redes de transmissão e distribuição pelas concessionárias. Já o mercado de aquecimento solar, tem a região Sudeste como líder de vendas, totalizando 73,84% em 2012, das quais 60% ocorreram no setor residencial no ano de 2013 (PROCÓPIO, 2016).

A fim de estimular a disseminação do uso da energia solar, atualmente, existem linhas de crédito e financiamento para instalação de sistemas fotovoltaicos e de aquecimento solar de água, como por exemplo, pela Caixa Econômica Federal. O banco Santander também possui propostas de financiamentos denominados CDC Socioambiental solar, que oferece crédito para compra e instalação de equipamentos fotovoltaicos (SANTANDER, 2019).

### **4.3. Estudos recentes sobre sistemas PVT**

Diante deste cenário, vários trabalhos científicos têm sido desenhados com intuito de trazer essa nova proposta ao mercado nacional. Em Minas Gerais, com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) e da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), um grupo de pesquisa para o setor foi criado em 2010, o Grupo de Estudo e Pesquisa em Energia (GEPEN), do Centro Universitário UNA, o qual vêm desenvolvendo Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), a fim de atender as demandas do setor energético.

Cita-se o P&D 498 CEMIG/ TEC 3098 FAPEMIG, “Desenvolvimento de Solução PVT (sistema híbrido: fotovoltaico e térmico) para aumento da eficiência de usinas solares” realizado entre fevereiro de 2012 a dezembro de 2017.

Tal estudo tinha por objetivo a instalação na Vila Vicentina, asilo de idosos, no município de Sete Lagoas - MG, de 12 módulos fotovoltaicos para geração de energia elétrica e aquecimento de água utilizada nos banhos (Figura 25). Este projeto propôs que fossem acoplados trocadores de calor aos módulos fotovoltaicos, tendo a água como fluido arrefecedor. A radiação solar incide sobre os módulos fotovoltaicos que produzem por sua vez energia elétrica e calor. O calor, que aquece a célula fotovoltaica e reduziria a sua eficiência energética, é transferido para água que circula pelos tubos aquecendo-a. A água é então armazenada em uma central de aquecimento e posteriormente distribuída nas casas da Vila Vicentina.



Figura 25 – Trocadores de calor acoplados aos módulos fotovoltaicos Vila Vicentina

Fonte: (CARMO, 2019)

Foi instalada para mensuração dos dados de consumo energético uma plataforma on-line na Vila Vicentina. No período de um ano, os dados captados mostraram uma redução no consumo de energia elétrica de 5745,30 kWh, considerando apenas o sistema fotovoltaico, sem avaliar a redução do consumo energético resultante da substituição dos chuveiros elétricos por aquecedores solares para o banho quente. Tal redução equivale a 6.268 banhos de 10 minutos, em chuveiros de 5,5 kW (SOLARVIEW, 2019).

Este projeto, além de trazer uma solução para as demandas energéticas crescentes, associando as duas tecnologias em sistema híbrido, também possui aplicações de cunho social e econômico, para instituições que necessitam reduzir seus gastos com energia e manter a qualidade de vida da população assistida.

Baseado nas demandas do projeto P&D 498 CEMIG/TEC 3098 FAPEMIG, (PROCÓPIO, 2016), em sua dissertação, desenvolveu dois protótipos de sistemas PVT com uma cobertura. Os sistemas foram construídos a partir de um módulo fotovoltaico sem os frames acoplado a um circuito hidráulico tipo tubo-aleta ou a um circuito hidráulico tipo serpentina, como pode ser visualizado na Figura 26.



(a)



(b)

Figura 26 – Coletor tubo-aleta (a) e Coletor serpentina (b)

Fonte: (PROCÓPIO, 2016)

A partir disso, analisou a eficiência elétrica do módulo fotovoltaico isolado e após junção com os coletores solares planos, influenciadas pelas variáveis: temperatura da água na entrada dos dispositivos, temperatura ambiente e velocidade do vento.

Em seu trabalho, Procópio (2016), demonstrou que eficiência média global dos coletores solares foi superior à dos PVT nas situações avaliadas, uma vez que com a inserção do módulo fotovoltaico há um aumento nas resistências de contato. No que se refere à eficiência elétrica, os PVT apresentaram maior eficiência comparado ao módulo de referência, para temperaturas de água na entrada de até 35° e para a velocidade do vento de 1m/s. O aumento da temperatura da água gera uma redução tanto das eficiências térmica quanto elétrica; o aumento da irradiância e da temperatura ambiente proporcionou elevação da eficiência térmica e reduções da eficiência elétrica; enquanto o aumento da velocidade do vento resultou em redução da eficiência térmica e aumento da eficiência elétrica. Ao analisar a eficiência elétrica média, no PVT de uma cobertura foi de 14,4%, já no módulo fotovoltaico, em condições iguais, a eficiência foi de 13,90%.

Com isso, observa-se um conflito entre a eficiência térmica e elétrica nos PVT, que é resolvido com redução da temperatura da água na entrada do sistema. Assim, o desempenho do sistema PVT está associado ao tipo de aplicação. Aplicações com temperatura menores oferecem maior rendimento elétrico e térmico.

No trabalho desenvolvido por Silveira (2015) buscou-se entender o comportamento da temperatura no módulo fotovoltaico, que posteriormente seria utilizado na composição de um sistema híbrido PVT. Neste trabalho, foram feitas imagens termográficas da parte anterior e posterior do módulo, com o objetivo de analisar o perfil térmico de distribuição da temperatura no módulo, como pode ser observado nas imagens da Figura 27.

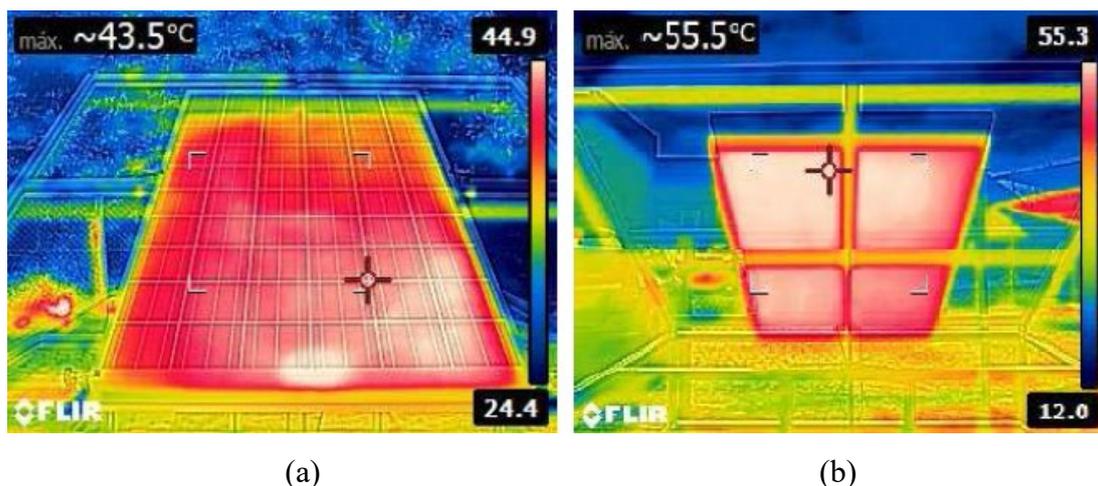


Figura 27 – Imagem termográfica da face anterior (a) e posterior (b) do módulo PV

Fonte: (SILVEIRA, 2015)

Silveira (2015), observou que a distribuição da temperatura não é uniforme no módulo, de forma que, a aferição da temperatura em uma célula isolada do módulo, pode levar a caracterização elétrica inadequada do mesmo, já que a eficiência elétrica varia em função da temperatura.

Os resultados obtidos por Silveira (2015) indicaram uma maior eficiência (14,43%) para temperatura de 42,32 °C e a menor eficiência (13,32%) para temperatura 54,55°C, sendo semelhantes aos indicados pelo fabricante.

#### 4.4. Coletor adaptável a módulos fotovoltaicos convencionais

Como citado na Tabela 1 (Exemplos de Módulos PVT), a empresa Holandesa Alius Solar desenvolveu e, produz para o mercado Europeu, um coletor solar (Figura 28) adaptável a módulos fotovoltaicos convencionais.



Figura 28 – Coletor VolThera PVT

Fonte: (ALIUS SOLAR)

Este coletor é feito de polipropileno, leve, antibacteriano e resistente à corrosão, amônia, cloro e radiação UV, além de ser totalmente reciclável.

Como o coletor é montado atrás de um módulo fotovoltaico padrão, nada muda em termos de instalação na área. Os coletores são equipados com acoplamentos de pressão e acoplados em pares com mangueiras flexíveis de aço inoxidável. Os conjuntos são então, conectados com um tubo de várias camadas a um bloco de distribuição que pode ser colocado no telhado.

Outros exemplos de empresas que dispõe dessa tecnologia são: Building Energy, CGA Technologies, Geo Holland e SundrumSolar.

Como foi atestado na parte de inserção no mercado, não foi identificado nenhum fabricante a nível nacional que fabrique de forma comercial coletores PVT para venda no Brasil.

Trocadores de calor adaptáveis a módulos fotovoltaicos comerciais poderiam ser facilmente fabricados, como aqueles protótipos desenvolvidos por (PROCÓPIO, 2016) em sua dissertação. Trata-se de um modelo de simples construção, produzido a partir de materiais de fácil acesso e, requerendo uma mão de obra pouco qualificada para atender aos requisitos técnicos de montagem.

Desta forma, trocadores de calor adaptáveis a módulos fotovoltaicos,

diferentemente daqueles tecnológicos desenvolvidos pela Alius Solar, possibilitaria que qualquer módulo fotovoltaico fosse “hibridizado”, assumindo as vantagens da cogeração de energia elétrica e térmica.

Esse conceito introduz flexibilidade e modernização dos módulos fotovoltaicos instalados nos telhados, que podem ser convertidos em módulos PVT.

#### **4.5.Uma proposta para a realidade brasileira**

O modelo de sistema híbrido PVT, através de trocadores de calor acoplados a sistemas fotovoltaicos, é trazido como temática deste estudo, pois se propõe como uma solução para a problemática energética mundial, bem como uma solução para atender as demandas por energia - calor e eletricidade, de um consumidor, capaz de produzir energia a partir do telhado da sua residência.

Em 2015 foi firmado entre 195 países um acordo global para redução da emissão dos gases do efeito estufa, chamado Acordo de Paris, do qual o Brasil participou. O Brasil se comprometeu a reduzir em 43% das emissões de gases do efeito estufa, abaixo dos níveis de 2005, até o ano de 2030. Para isso, é necessário aumentar a participação de fontes renováveis de energia da sua matriz energética para 45% até 2030. Cerca de 69% das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) estão relacionadas com a geração de energia elétrica (IPCC, 2007).

Como visto no trabalho de Procópio (2016) apesar de não haver ganho em termos de eficiência térmica quando comparado ao coletor solar isoladamente, o módulo híbrido proporciona ganhos no que se refere a eficiência global, produzindo energia térmica e elétrica em uma mesma área. Tal fato, permite o uso da água, fluido arrefecedor, para fins domésticos como o banho, gerando economia ao substituir os chuveiros elétricos.

Atualmente, 73% das casas brasileiras possuem chuveiro elétrico. Esses equipamentos são de preço acessível ao consumidor, e de simples instalação, facilitando sua disseminação nas residências brasileiras. Estima-se que existam mais de 30 milhões de chuveiros elétricos instalados no Brasil (ABRAVA, 2008).

No entanto, esses equipamentos são também responsáveis pelo consumo de 24% da energia elétrica de uma casa, devido ao fato do chuveiro elétrico aquecer água instantaneamente, exigindo uma elevada potência (PROJETO 3E, 2010).

Nos horários de pico o consumo de energia elétrica, se eleva exponencialmente, sendo que 18% do pico de demanda do sistema elétrico nacional vêm do uso do chuveiro

elétrico, o que equivale a dizer que 18% das usinas brasileiras estão construídas para ligar o chuveiro nos horários de pico. Tal fato, pôde ser vivenciado no ano de 2001, quando ocorreram os “apagões”. Foi também nessa época, em que houve grande crescimento do setor de aquecimento solar de água, cerca de 80% em relação aos anos anteriores (ABRAVA, 2008).

Segundo dados da ABRAVA (2008), cada m<sup>2</sup> de coletor solar utilizado durante um ano, equivale a 56 metros quadrados de áreas inundadas por usinas hidrelétricas; 215 quilos de lenha; 66 litros de diesel; 55 quilos de gás. Estes dados reforçam a importância de se ponderar o uso de fontes renováveis.

No Brasil, o uso do chuveiro elétrico é um contrassenso, diante da oferta abundante da energia solar e a possibilidade de aplicação para aquecimento de água, por exemplo. Converter energia elétrica para aquecer água a 40° C para tomar banho, é uma forma de uso irracional e negligente da energia elétrica. Assim, o uso da energia solar para aquecimento de água será sempre a maneira mais viável econômica, social e ambientalmente, independente da região brasileira analisada, salvo para isto, dimensionamentos dos sistemas propostos.

Estima-se que o consumo de energia por residência brasileira seja cerca de 159 kWh/mês, segundo dados do EPE (2016). Para este consumo, seriam necessárias 3 placas fotovoltaicas, sendo o custo médio no mercado por placa instalada de R\$ 2.500,00, o retorno do investimento se daria em 5 anos (SOUZA e FERREIRA, 2019).

As moradias do programa Minha Casa Minha Vida que contarem com a energia produzida por módulos fotovoltaicos poderão ter uma redução no custo da energia de até 70%, segundo (ABSOLAR, 2016). O dinheiro economizado por estas famílias pode ser direcionado para outras áreas, como lazer, saúde e educação.

Trazendo essas vantagens para os programas populares hoje existentes, como o Minha Casa Minha Vida, que já incluem a utilização de aquecedores solares e sistema fotovoltaicos independentes, temos nos sistemas híbridos PVT, um modelo ideal para as residências de baixa renda no Brasil.

Tachon, Hipolito e Passos (2016), mostrou em seu artigo que dependendo da latitude, são necessários de 3 a 5 módulos PVT por telhado, para atender a demanda de água quente mensal e eletricidade em uma residência de baixa renda.

Como dito, apesar do custo inicial do investimento ser alto, o fato de podermos contar com a simplificação do modelo associando os módulos fotovoltaicos aos trocadores

de calor, já proporcionaria uma redução do preço. Os subsídios governamentais para ampliação da tecnologia e inserção no mercado, também contribuiriam para redução do custo. De forma que, os sistemas híbridos PVT, trazem esta oportunidade de otimizar a produção energética, atendendo aos requisitos de sustentabilidade e energia limpa.

## 5. CONCLUSÃO

A crescente necessidade de diversificação da matriz energética mundial através de fontes sustentáveis, têm estimulado a busca por tecnologias alternativas para geração de energia, dentre elas destacam-se os sistemas híbridos PVT, capaz de prover as demandas de calor e eletricidade em um único dispositivo, oferecendo maior produção energética por metro quadrado.

Aliado a isto, no Brasil, com o alto potencial para produção de energia solar, os sistemas PVT poderiam ser amplamente explorados. Ainda com dificuldade para sua inserção no mercado energético, pela falta de padronização, certificação, desconhecimento público e alto custo inicial, essa tecnologia necessita de incentivos governamentais para ganhar espaço no mercado.

Atualmente já existem diretrizes governamentais para estimular a utilização de fontes renováveis de energia, entre elas a energia solar térmica e fotovoltaica, como por exemplo no programa Minha Casa Minha Vida, para construção de moradia para famílias de baixa renda. No entanto, no que diz respeito a geração combinada de energia térmica e fotovoltaica, pelos sistemas PVT, pouco se encontra na literatura brasileira.

Em Minas Gerais, através de um projeto social, o Grupo de Estudo e Pesquisa em Energia (GEPEN), do Centro Universitário UNA, com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) e da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), instalaram na Vila Vicentina, abrigo de idosos, módulos fotovoltaicos associados a trocadores de calor. Este projeto demonstrou viabilidade econômica e social da utilização dos sistemas PVT para instalações residenciais. De forma que, pode vir a ser uma solução economicamente rentável à longo prazo, e aplicável aos programas populares governamentais para residências de baixa renda.

Essa proposta amplia os programas governamentais de acesso à energia e contribui para alcançar a meta de redução das emissões de gases de efeito estufa, através da utilização de fontes de energia renováveis.

É importante perceber que as tecnologias sustentáveis devem sair do campo técnico científico para assumir o papel de transformação social. Com esse intuito, este estudo, trouxe para a discussão o modelo de sistema PVT em que pudesse ser aproveitado os módulos fotovoltaicos já instalados, através de sua associação com trocadores de calor, tornando possível sua aplicação nos projetos de moradias populares.

Assim, apesar de não ter sido avaliado o custo total do investimento e qual o tempo

estimado para o retorno financeiro, o sistema híbrido PVT responde a proposta de oferecer energia limpa, atender as demandas do consumidor e oferecer um sistema compacto.

### **5.1.Trabalhos futuros**

Análise experimental de aplicação de coletores adaptáveis a módulos fotovoltaicos convencionais variando o tipo de material usado para confecção dos trocadores de calor, como cobre e alumínio. Comparando os resultados numéricos para análise das eficiências.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. **Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p. 36. 2008. (NBR 15569).
- ABNT. **Sistemas solares térmicos e seus componentes - Coletores solares Parte 2: Métodos de ensaio**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p. 117. 2009. (NBR 15747-2).
- ABRAVA. **Manual de capacitação em projetos de sistemas de aquecimento solar**. Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento. [S.l.], p. 138. 2008.
- ABSOLAR. **Geração Distribuída Solar Fotovoltaica**. Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica - Encontro Nacional dos Agentes do Setor Elétrico - ENASE. Rio de Janeiro. 2016.
- ALIUS SOLAR. Aliusenergy. **VolThera PVT-panels**. Disponível em: <<https://aliusenergy.nl/solarp/volthera>>. Acesso em: 02 out. 2019.
- ALMEIDA, L. M. M. C. E. **Estudo de um Colector Solar Híbrido para Produção de Electricidade e Calor**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, p. 160. 2008.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Banco de Informações de Geração**, 2019. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 30 out. 2019.
- BEZERRA, A. M. **Aplicações Práticas da Energia Solar**. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2001.
- BNDES. **BNDES Setorial, n. 22**. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. Rio de Janeiro, p. 268. 2005.
- CARMO, M. C. B. **Tecnologias de Aquecimento Solar em Instituições de Longa Permanência para Idosos: Um Estudo da Melhoria na Qualidade de Vida**. Centro Universitário UNA. Belo Horizonte, p. 90. 2019.
- CHARALAMBOUS, P. G. et al. Photovoltaic thermal (PV/T) collectors: A review. **Applied Thermal Engineering**, London, v. 27, p. 275-286, 2007.
- CHOW, T. T. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. **Applied Energy**, Hong Kong, v. 87, p. 365-379, 2010.
- CIÊNCIA VIVA. **Guia da Energia Solar**. Lisboa: Agência Nacional para a Cultura e

- Tecnologia, 2006. 8 p. Disponível em: <<http://www.cienciaviva.pt/rede/energia/himalaya2006/home/guia3.pdf>>.
- CRESESB. **Energia Solar Princípios e Aplicações**. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. [S.l.], p. 28. 2006.
- DAGHIGH, R. et al. Effect of Packing Factor on the Performance of PV/T Water Heater, Bangi, p. 6, 2011.
- DUFFIE, J.; BECKMAN, W. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4. ed. New Jersey: Wiley, 2013.
- EN 12975. **Thermal Solar Systems and Components - Solar Collectors**. Comité Européen de Normalisation. [S.l.]. 2006.
- EPE. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, p. 452. 2016.
- FORTUIN, S. et al. Hybrid PV-thermal Collector Development: Concepts, Experiences, Results and Research Needs. **Energy Procedia**, Freiburg, v. 48, p. 37-47, 2014.
- HASAN, M. A.; SUMATHY, K. Photovoltaic thermal module concepts and their performance analysis: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Fargo, v. 14, n. 7, p. 1845-1859, 2010.
- IEC 61215. **Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval**. International Electrotechnical Commission. [S.l.]. 2016. (61215).
- IEC 61730. **Photovoltaic (PV) module safety qualification**. International Electrotechnical Commission. [S.l.]. 2016.
- IPCC. **Climate Change 2007: Synthesis Report**. Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, p. 104. 2007.
- IPEA. **Atlas da Vulnerabilidade social nos Municípios Brasileiros**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Brasília, p. 82. 2015.
- JEE JOE, M.; INIYAN, S.; RANKO, G. Flat plate solar photovoltaic–thermal (PV/T) systems: A reference guide. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Split, v. 51, p. 62-88, 2015.
- JUNIOR, A. J. D. N. **Contribuição à Modelagem de Módulos Fotovoltaicos e Proposta de uma Técnica Híbrida de Seguimento do Ponto de Máxima Potência com Estimador de Irradiância**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO. Recife, p. 153. 2018.
- KEIZER, C.; BOTTSE, J.; JONG, M. **PVT Benchmark**. Solar Energy Application Centre. [S.l.], p. 35. 2017.

- KUMAR, A.; BARENDAR, P.; QURESHI, U. Historical and recent development of photovoltaic thermal (PVT). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Bhopal, p. 1428-1436, 2015.
- LEVA, et al. **MODELO DE UM PROJETO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 1-10. 2004.
- MARQUES, R. L. M. D. R. P. **Avaliação da Viabilidade de Colectores Híbridos Fotovoltaicos e Térmicos para Aplicação ao Aquecimento de Águas e Micro-Geração de Electricidade**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto. 2008.
- MASTERS, G. M. **Renewable and Efficient Electric Power Systems**. New Jersey, p. 654. 2004.
- MIAN, H. M. **Análise regulatória da participação da energia solar fotovoltaica e estudo do melhor mecanismo de suporte para inseri-la na matriz elétrica brasileira**. Universidade de Brasília - UnB. Brasília, p. 108. 2015.
- MME. **Ministério de Minas e Energia. Matriz energética brasileira**. [S.l.]. 2006.
- MORAN, E. F. et al. Sustainable hydropower in the 21st century. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, East Lansing, 2010.
- NASCIMENTO, R. L. **ENERGIA SOLAR NO BRASIL: SITUAÇÃO E PERSPECTIVAS**. Câmara dos Deputados. Brasília, p. 46. 2017.
- OLIVEIRA, S. T. M. et al. **Energia Híbrida e suas aplicações em sistemas Fotovoltaicos**. VI SINGEP - Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, inovação e Sustentabilidade. São Paulo. 2017.
- PALLA, N. et al. Development of Multivalent PV-Thermal Collectors for Cooling, Heating and Generation of Electricity, Stuttgart, p. 1-9, 2014.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL - DTE - CRESESB, 2014.
- PNE 2030. **Plano Nacional de Energia 2030**. Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. Brasília, p. 369. 2007.
- PROCÓPIO, O. L. **Modelo Analítico para Avaliação do Desempenho Térmico e Elétrico de Módulos Fotovoltaicos Acoplados a Coletores Solares de Placa Plana Tipo Tubo-aleta e Serpentina**. Centro Federal de educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 114. 2016.
- PROJETO 3E. Ministério do Meio Ambiente, 2010. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/informma/item/10577-p-r-o-j-e-t-o-3e>>. Acesso em: 23 out.

2019.

SANTANDER. **CDC Socioambiental Solar**, 2019. Disponível em: <<https://www.santander.com.br/creditos-e-financiamentos/para-voce/cdc-socioambiental-solar>>. Acesso em: 28 out. 2019.

SILVEIRA, R. A. **Comportamento Térmico do Módulo Fotovoltaico: Uma Análise da Distribuição de Temperatura Visando Eficiência de Módulos Fotovoltaicos Acoplados a Trocadores de Calor**. Centro Universitário UNA. Belo Horizonte, p. 37. 2015.

SOLARVIEW. **Inovação, Sustentabilidade e Alta Tecnologia**, 2019. Disponível em: <<http://solarview.com.br/>>. Acesso em: 22 out. 2019.

SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica**. 8. ed. New Jersey: Blucher, 2013.

SOUZA, T. M.; FERREIRA, M. E. M. **Desafios da energia fotovoltaica e ações de sustentabilidade para o programa habitacional “minha casa, minha vida”**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, p. 6. 2019.

TACHON, L.; HIPOLITO, H. L.; PASSOS, J. C. **Analysis and application of combined photovoltaic/thermal (pv/t) flat-plate collectors for low-income residences in brazil**. Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, p. 8. 2016.

TEIXEIRA, T. R. C. **Estudo de um Sistema Híbrido com Colectores Solares Termo-Fotovoltaicos Acoplados a um Termogerador Eléctrico**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, p. 1-115. 2009.

VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. 2ª. ed. São Paulo: Saraiva, 2015.

ZONDAG, H. A. et al. **PVT roadmap. A European guide for the development and market introduction of PVT technology**. European Photovoltaic Solar Energy Conference. Barcelona: [s.n.]. 2006. p. 6-10.