

UMA REVISÃO SOBRE A TECNOLOGIA SOLAR HÍBRIDA FOTVOLTAICA E TÉRMICA NO BRASIL E NO MUNDO

Ilane Caminha de Oliveira (Graduanda do curso de Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Rural do Semi-Árido) E-mail: ilaneoliveira2010@hotmail.com

Maria Izabel da Silva Guerra (Professora na Universidade Federal Rural do Semi-Árido) E-mail: izabel.guerra@ufersa.edu.br

Romênia Gurgel Vieira (Professora na Universidade Federal Rural do Semi-Árido) E-mail: romenia.vieira@ufersa.edu.br

Resumo: Os coletores solares híbridos fotovoltaico e térmico ou PVT (*Photovoltaic-Thermal*) são utilizados para a produção de energia elétrica e térmica de forma simultânea, na qual parte da radiação solar incidente sobre os painéis fotovoltaicos é convertida em eletricidade e calor, sendo que o calor, que antes causava apenas um aumento na temperatura do módulo FV (fotovoltaico) e, conseqüentemente, redução no desempenho do sistema, nessa tecnologia é usado para aquecer um fluido ao mesmo tempo em que esse fluido arrefece o sistema, podendo ser armazenado para posteriores usos. Várias pesquisas acerca desta tecnologia vêm sendo realizadas por diversos países de forma a aperfeiçoar e disseminar a tecnologia ainda pouco conhecida. No Brasil poucas pesquisas foram realizadas. O presente estudo tem como objetivo realizar um levantamento sobre a tecnologia PVT, descrever suas principais características, funcionamento, tipos de configurações empregadas e fluidos de trabalho utilizados, apresentando algumas pesquisas realizadas por diferentes estudiosos que buscam analisar a eficiência geral (térmica e elétrica) dos coletores PVT, a fim de encontrar melhorias que possam contribuir para a disseminação da informação acerca desta tecnologia.

Palavras-chave: Coletor PVT; Eficiência; Arrefecimento; Sistema solar híbrido.

A REVIEW ON THE HYBRID SOLAR TECHNOLOGY PHOTOVOLTAIC AND THERMAL IN BRAZIL AND THE IN WORLD

Abstract: Solar photovoltaic and thermal hybrid collectors PVT (*Photovoltaic-Thermal*) are used for the production of electric and thermal energy simultaneously, in which part of the solar radiation incident on the photovoltaic panels is converted into electricity and heat, being that the heat, that previously caused only an increase in the temperature of the PV module decreasing the efficiency of the system, in this technology is used to heat a fluid at the same time that this fluid cools the system and can be stored for later uses. Several researches on this technology have been carried out by several countries in order to improve and disseminate the technology still little known. In Brazil, few studies have been done. The purpose of this study is to perform a survey about PVT technology, describing its main characteristics, functioning, types of configurations employed and work fluids used, presenting some researches done by several researchers that seek to analyze the general (thermal and electrical) efficiency of PVT collectors, seeking improvements that may contribute to the dissemination of information about this technology.

Keywords: PVT collector; Efficiency; Cooling; Working Fluid.

1. INTRODUÇÃO

A energia solar é uma das fontes alternativas de energia que tem grande potencial para se desenvolver não só por ser um recurso renovável e sustentável, mas também por ser uma fonte que possui diferentes tipos de aproveitamento, podendo ser captada tanto de forma direta quanto indireta.

Dentre as várias formas de aproveitamento se destacam a utilização da radiação solar para geração de eletricidade, por meio de painéis fotovoltaicos e o aproveitamento do calor para sistemas de aquecimento. A energia solar fotovoltaica é uma forma direta de aproveitar a energia do sol, na qual a radiação é convertida diretamente em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico que ocorre nas células denominadas de células fotovoltaicas (LOPEZ, 2012). No

caso da energia térmica, o calor proveniente do sol é utilizado para aquecimento de fluidos, podendo ser aproveitado para várias aplicações tanto residenciais como industriais. De maneira geral, os coletores solares são responsáveis por absorver a radiação solar incidente, convertendo-a em energia térmica e transferindo-a para um fluido, usualmente água, para ser utilizada posteriormente (CRESESB, 2006).

Através da união das duas formas de aproveitamento mais usuais da energia solar descritas acima, foi desenvolvida, entre as décadas de 70 e 80, a tecnologia híbrida solar fotovoltaica e térmica ou PVT. Essa tecnologia permite transformar a radiação solar em eletricidade e utilizar o calor das células solares para aquecimento de fluido de trabalho de forma simultânea (CHOW, 2010).

A fim de melhorar o desempenho do sistema PVT, muitos pesquisadores, ao longo dos anos, direcionam seus esforços no aperfeiçoamento da tecnologia, de modo a facilitar seu crescimento e contribuir para sua disseminação no mercado energético como uma alternativa às fontes convencionais de energia.

Neste sentido, este estudo tem o objetivo de realizar um levantamento bibliográfico a respeito da tecnologia solar híbrida fotovoltaica e térmica para compreender seu funcionamento, analisar as diferentes configurações desenvolvidas no que tange a eficiência, observar o avanço da tecnologia ao longo dos anos, tanto a nível mundial como no Brasil, caracterizar as diferentes configurações empregadas neste sistema e identificar possíveis barreiras de disseminação.

2. TECNOLOGIA HÍBRIDA SOLAR FOTOVOLTAICA E TÉRMICA (PVT)

Uma das grandes vantagens dos coletores PVT é a cogeração, dispensando, assim, a necessidade de se instalar dois mecanismos diferentes para se obter as duas formas de energia oriunda do Sol. Desse modo, é uma tecnologia que tem grande potencial de ser difundida em regiões onde há altas taxas de irradiância solar.

Nos sistemas fotovoltaicos convencionais, parte da radiação que chega aos painéis solares é convertida em eletricidade enquanto outra fração gera calor, aumentando a temperatura da célula e, conseqüentemente, diminuindo sua eficiência, reduzindo os pontos de operação da potência máxima gerada por uma célula fotovoltaica (CRESESB, 2006). Na Figura 1 é mostrado o efeito da temperatura sobre uma célula FV.

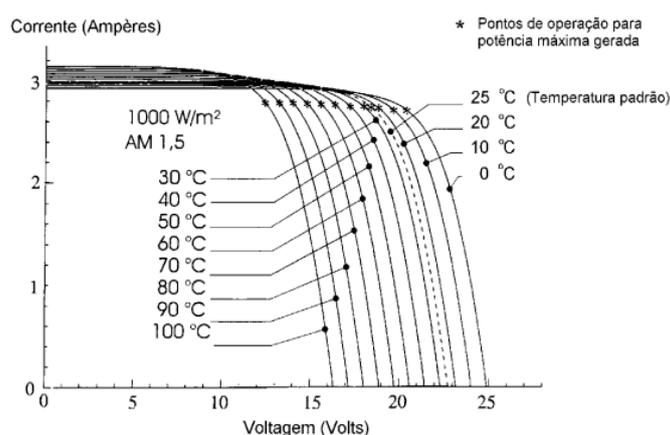


Figura 1 – Efeito causado pela temperatura na célula.

Fonte: CRESESB (2006).

Em contrapartida, o sistema híbrido PVT aproveita a energia térmica para aquecer um fluido ao mesmo tempo em que esse fluido arrefece o painel fotovoltaico através dos princípios de transferência de calor, recuperando assim, parte do desempenho na geração de

energia elétrica. Este calor pode ser utilizado para diversos processos, tais como aquecimento de ambientes e aplicações domésticas (KUMAR; BARENDAR; QURESHI, 2015).

É importante ressaltar que a dupla função do sistema PVT possibilita uma maior taxa global de conversão da energia solar quando comparada aos sistemas independentes, resultando em um maior aproveitamento da energia advinda do sol. Em outras palavras, os módulos PVT tem uma capacidade de geração de energia por unidade de área maior do que os sistemas fotovoltaicos ou térmicos separados, tendo como atrativos custos menores de produção e instalação e, conseqüentemente, um retorno de investimento menos demorado (KUMAR; BARENDAR; QURESHI, 2015).

Estudos apontam que o material constituinte da célula fotovoltaica, seja ele monocristalino, policristalino ou amorfo, aparece como um dos principais fatores que interfere de modo direto no rendimento elétrico do módulo fotovoltaico híbrido (CHOW, 2010; MARQUES, 2008; TEIXEIRA, 2009). Já o rendimento térmico tende a ser menor quando comparado com o sistema térmico independente devido, principalmente, ao baixo coeficiente de absorção da superfície fotovoltaica. Porém, a eficiência global do sistema PVT (η_{PVT}) é sempre maior que a eficiência dos sistemas separados, sendo representada como a soma da eficiência elétrica ($\eta_{elétrica}$) com a térmica ($\eta_{térmica}$), como mostra a Equação (1) (KADHIM *et al.*, 2014; MARQUES, 2008).

$$\eta_{PVT} = \eta_{elétrica} + \eta_{térmica} \quad (1)$$

O foco inicial para o desenvolvimento dos coletores híbridos PVT se restringia a aumentar a eficiência dos coletores solares, principalmente para aplicações domésticas. Por isso, com o decorrer dos anos, foram estudados vários tipos de coletores híbridos PVT, de modo a analisar as diferentes características que influenciam no desempenho do sistema, como: o tipo de célula e módulo usados; se o sistema possui cobertura; e o fluido de trabalho utilizado (TEIXEIRA, 2009). Tais características são importantes para potencializar a eficiência dos coletores PVT.

2.1 Funcionamento

O sistema PVT consiste basicamente em um painel fotovoltaico, no qual se fixa uma placa absorvedora na sua parte traseira, que é responsável por resfriar o sistema, diminuindo sua temperatura e, conseqüentemente, melhorando a eficiência elétrica, bem como aproveitando a energia térmica acumulada que antes seria perdida em forma de calor para o meio ambiente. Um fluido, geralmente água, circula por tubos fixados na placa absorvedora, de modo a captar a energia térmica que circula pelo sistema aproveitando-a de acordo com a finalidade a qual foi destinado o coletor solar híbrido (AL-WAELI *et al.*, 2017; CHARALAMBOUS *et al.*, 2007).

A Figura 2 mostra um corte transversal de um coletor PVT simples, no qual um painel FV e uma placa absorvedora estão acoplados. Entre esses dois componentes é fixada uma fina lâmina de metal que além de proporcionar um melhor contato entre o FV e os tubos de calor, melhora a eficiência global da transferência de calor do painel FV para o fluido de trabalho. Os tubos de calor, por onde o fluido irá circular, estão dispostos de forma a ficar em contato direto com a placa absorvedora, e, por fim, a isolação é utilizada para reduzir as perdas de calor com o ambiente. Essa configuração permite um maior aproveitamento da energia térmica que incide sobre o sistema PVT, assim, quanto mais arrefecido ficar o sistema, melhor será a eficiência elétrica (HONGBING *et al.*, 2015).

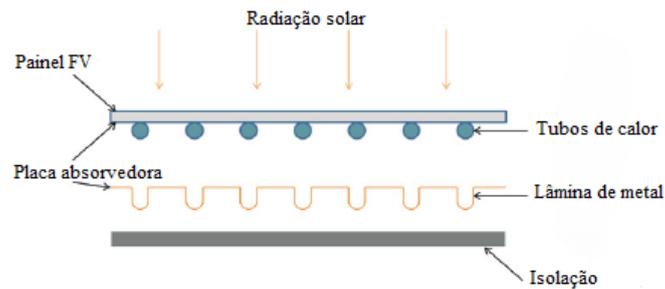


Figura 2 – Seção transversal de um coletor PVT simples.
Fonte: HONGBING (2015), adaptado pelo autor.

No sistema PVT, à medida que o módulo FV converte a luz solar em eletricidade, o calor é absorvido de modo a aumentar a temperatura da placa absorvedora. O calor absorvido é responsável por aquecer os tubos de calor que se encontram em contato direto com a placa absorvedora. O fluido de trabalho que irá circular nesses tubos de calor entra no sistema em temperaturas mais baixas e percorre todo o sistema enquanto é aquecido continuamente por transferência de calor.

Essa tecnologia oferece uma grande diversidade de arranjos que pode variar de acordo com o fluido de trabalho que circula no sistema. Ao longo dos anos, três configurações principais vêm sendo estudadas pelos pesquisadores. Faz-se importante então que se apresentem tais configurações para melhor compreendê-las.

2.2 Principais configurações do sistema PVT

Os coletores solares híbridos PVT sofreram diversas adaptações ao longo dos anos, pois muitos pesquisadores, com o intuito de obter uma visão mais definida sobre o rendimento esperado, concentram seus estudos na análise de diversas configurações. Desta forma, é possível encontrar diferentes configurações da tecnologia PVT baseado no seu modo de construção e no aproveitamento máximo do sistema almejado. Os coletores PVT podem ser divididos em coletores do tipo placa plana ou concentradores; e agrupados de acordo com o fluido de trabalho operante no sistema que, convencionalmente, pode ser tanto água quanto ar (CHARALAMBOUS *et al.*, 2007; ZONDAG, 2008).

Os principais tipos de coletores híbridos descritos e analisados pelos autores ao longo dos anos são: coletor solar PVT água, coletor solar PVT ar e coletor solar PVT ar e água.

2.2.1 Coletores PVT água

O coletor solar do tipo água pode ter circulação por convecção forçada ou natural (VIANA, 2014). O primeiro tipo de circulação se dá com o auxílio de uma bomba enquanto o segundo ocorre devido à diferença de densidade do fluido de trabalho. A configuração dos coletores solares água é análoga aos coletores de placa plana usados em sistemas de aquecimento solar de água convencional. Os módulos FV, que são instalados sobre a superfície absorvedora, convertem parte da irradiância solar em eletricidade enquanto outra parte é perdida em forma de calor. Este calor é captado pela superfície absorvedora e parte dele é transferido para a água, aumentando sua temperatura e, conseqüentemente provocando o arrefecimento no módulo FV, melhorando sua eficiência elétrica e gerando uma eficiência térmica (TEIXEIRA, 2009; VIANA, 2014). Desse modo, a água que é aquecida no sistema PVT pode ser aproveitada para uso doméstico, enquanto a energia elétrica produzida pelo painel FV pode ser armazenada em baterias ou injetada na rede elétrica, mecanismos que correspondem ao sistema autônomo e ao sistema conectado à rede, respectivamente.

Quando considerados todos os custos do coletor PVT baseado a água notou-se que eles ficam cerca de 10% mais caros quando comparados com os custos de produção dos módulos fotovoltaicos convencionais (TONUI; TRIPANAGNOSTOPOULOS, 2007). Ao realizar uma análise numérica, ficou constatado que para valores de temperaturas próximas de zero a eficiência geral dos coletores PVT baseado a água tende a resultar em valores próximos de 50% (ZONDAG *et al.*, 2003).

A Figura 3 ilustra as configurações mais comuns para os coletores PVT baseados a água, no qual é possível observar que a água pode percorrer o sistema por meio de tubos ou em canal, de modo a ficar em contato direto ou não com o módulo fotovoltaico.

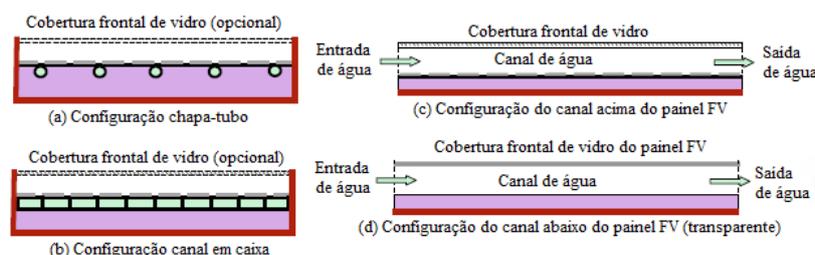


Figura 3 – Seções transversais dos coletores PVT baseados a água mais comuns.

Fonte: GUERRA (2016).

A recuperação do rendimento na produção de eletricidade para os coletores PVT tipo água varia de 30 % a 50% (LOPEZ, 2012). Geralmente, os coletores do tipo água apresentam um desempenho melhor quando comparados com os coletores PVT do tipo ar, isso pode se dar devido ao fato de que os coletores PVT baseados a ar são caracterizados por uma reduzida transferência de calor e altos índices de perdas ocasionadas pela sua resistividade térmica mais elevada e pelas fugas no sistema (TEIXEIRA, 2009). O desempenho do sistema PVT depende de fatores como a temperatura do fluido de trabalho, a vazão mássica do fluido e a quantidade de coberturas de vidro (RAMOS; CARDOSO; ALCASO, 2010). Por possuir uma estrutura mais complexa, quando comparado com o sistema PVT ar, o coletor PVT tipo água apresenta custos mais elevados, devido ao modelo do trocador de calor de água que se adiciona ao sistema (SATHE; DHOBLE, 2017).

2.2.2 Coletores PVT ar

Assim como nos coletores PVT baseados a água, nos coletores PVT baseados a ar, o fluido pode percorrer a superfície fotovoltaica através de uma circulação forçada ou natural, por isso apresentam composição similar. Chow (2010), Teixeira (2009) e Zondag (2008) comprovaram que a circulação forçada apresenta uma melhor eficiência, pois proporciona uma maior taxa de transferência de calor, gerando menos perdas no sistema. O arranjo pode ser de passagem simples ou dupla, disposto por meio de várias camadas de placas absorvedoras. Esse tipo de sistema é bastante utilizado em aplicações práticas devido, principalmente, ao uso de pouco material para sua construção de forma que os custos operacionais ficam em torno 5% mais baratos quando comparados com o sistema PVT baseado a água (TONUI; TRIPANAGNOSTOPOULOS, 2007).

As configurações existentes de coletores PVT do tipo ar se diferenciam conforme a passagem do fluxo de ar, que podem ser acima, abaixo ou nas laterais da placa absorvedora, ou ainda com passagem dupla ou simples. A Figura 4 mostra o corte transversal de diferentes tipos de coletores PVT do tipo ar. Esse tipo de tecnologia PVT é bastante útil, sobretudo para regiões frias, onde há demanda por ar quente, podendo ser utilizado em calefações de residências, por exemplo.

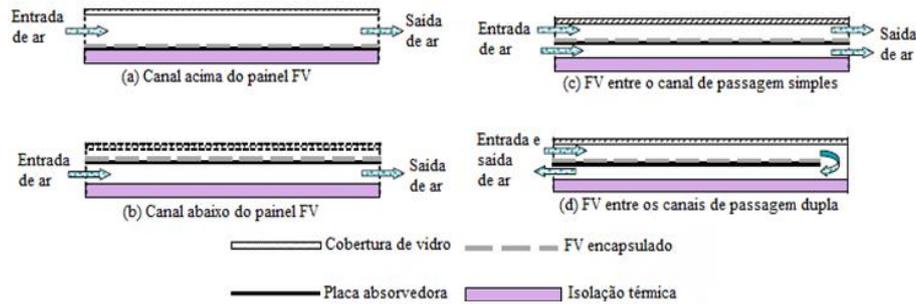


Figura 4 – Seções transversais dos coletores PVT baseados a ar mais comuns.
 Fonte: GUERRA (2016).

Uma das principais desvantagens apontada com relação a essa configuração diz respeito ao seu campo limitado de aplicações visto que, principalmente no verão, não há muita demanda por ar quente, uma vez que grande parte do calor já se encontra acessível, tornando dispensável a instalação de um sistema PVT baseado a ar (TEIXEIRA, 2009; ZONDAG, 2008).

2.2.3 Coletores PVT ar e água (bifluido)

Esta configuração, como o termo sugere, usa tanto a água quanto o ar como fluido de trabalho em um único sistema. Pesquisas acerca dessa tecnologia vem se desenvolvendo com o intuito de produzir simultaneamente ar quente, água quente e eletricidade, unindo assim, as características dos sistemas PVT independentes (SATHE; DHOBLE, 2017). Para essa configuração, tanto o ar como a água circulam no interior do coletor. Esse mecanismo faz com que o calor, que é indesejado para o módulo fotovoltaico, mas desejado para o fluido arrefecedor, seja retirado do módulo FV e assim possa ser convertido em calor útil para as aplicações ao qual se destina o sistema PVT (JARIMI *et al.*,2016). A Figura 5 ilustra a composição básica um sistema PVT bifluido.

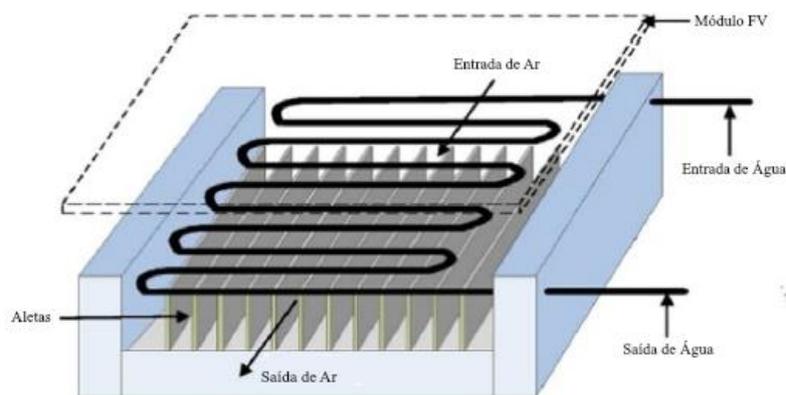


Figura 5 – Sistema PVT bifluido.
 Fonte: SATHE; DHOBLE (2017), adaptado pelo autor.

Esse tipo de coletor oferece mais versatilidade que os coletores PVT independentes, já que o fato de operar com dois fluidos diferentes confere aos mesmos uma maior variedade na aplicação final. Além disso, como indicado por Jarimi *et al.* (2016), espera-se que haja uma melhora na eficiência nos coletores solares, visto que ao usar os dois fluidos simultaneamente, a água irá compensar a baixa capacidade térmica do ar que, por sua vez, dificulta a extração do calor indesejado do módulo FV. A eficiência de um painel solar patentado pela empresa

Millenium Electric, pode atingir, de acordo com a empresa, até 85%, sendo 15% de geração de energia elétrica, 35% de água quente e 35% de ar quente (LOPEZ, 2012).

Na Tabela 1 é apresentado um comparativo entre as três configurações apresentadas anteriormente.

Tabela 1. Comparativo entre as três principais configurações dos coletores PVT.

Nome	Principal característica	Vantagem	Desvantagem	Eficiência geral	Principais aplicações
Coletor PVT água	Água como fluido de trabalho	Alta transferência de calor, alta eficiência geral, poucas perdas no sistema	Estrutura complexa e custos elevados	50% ou mais	Aquecimento de ambientes (domésticos/industriais), destilação de água, sistemas de processamento de alimentos
Coletor PVT ar	Ar como fluido de trabalho	Design simples, custos operacionais menores	Perdas por fuga e campo limitado de aplicações	Menor que 50%	Aquecimento de ambientes, processos agrícolas
Coletor PVT ar e água (bifluido)	Água e ar como fluidos de trabalho	Versatilidade, maior desempenho elétrico	Calor/água a baixas temperaturas, aplicações limitadas	Até 85%	Processos industriais e agrícolas, aquecimento de ambientes

Fonte: Autoria própria.

Na seção 3, serão apresentadas algumas pesquisas relacionadas à tecnologia híbrida solar fotovoltaica e térmica realizadas ao longo dos anos por diversos pesquisadores, tanto no mundo quanto no Brasil, testando diferentes configurações de coletores PVT com o principal objetivo de analisar sua eficiência global.

3. PRINCIPAIS PESQUISAS RELACIONADAS À TECNOLOGIA HÍBRIDA SOLAR FOTOVOLTAICA E TÉRMICA

Com o objetivo de analisar a eficiência geral dos coletores PVT, comparando-a muitas vezes com os coletores convencionais, diversas pesquisas vêm sendo realizadas tanto de forma experimental quanto analítica. A presente seção descreve alguns desses estudos, expondo as configurações estudadas, fluido de trabalho utilizado, método de análise, bem como os principais resultados acerca da eficiência geral de cada sistema analisado.

3.1 No mundo

As pesquisas acerca da tecnologia híbrida PVT começaram a partir da década de 70 e o pioneiro nesses estudos foi Martin Wolf que analisou o desempenho de um sistema híbrido de placa plana para aplicação residencial, na ocasião foi comprovado a viabilidade do sistema (CHOW, 2010; ZONDAG, 2008; SATHE; DHOBLE, 2017). Com o passar do tempo, várias pesquisas foram sendo realizadas com o principal intuito de analisar a eficiência dos coletores PVT e comparar os resultados encontrados com o desempenho de coletores fotovoltaicos e térmicos convencionais. Até os dias atuais diversas configurações vêm sendo testadas de modo a avaliar a influência de vários parâmetros que possam afetar negativa ou positivamente a eficiência do sistema PVT.

Modelos analíticos, experimentais e simulações vêm sendo realizados com o intuito de prever e melhorar o desempenho das várias configurações dos coletores PVT (CHARALAMBOUS et al., 2007). O desempenho de coletores PVT baseados a ar com passagem simples e dupla, mostrado na Figura 6, por exemplo, foi analisado analiticamente, em 1996, variando apenas alguns parâmetros em ambos os modelos (SOPIAN et al., 1996).

Nesse experimento foi possível encontrar uma eficiência geral máxima de 30% para o coletor com passagem simples e 45% para o coletor com passagem dupla. Após comparar os dois sistemas, foi possível inferir que, embora possua uma construção mais complexa, o coletor PVT de passagem dupla apresentou um melhor desempenho.

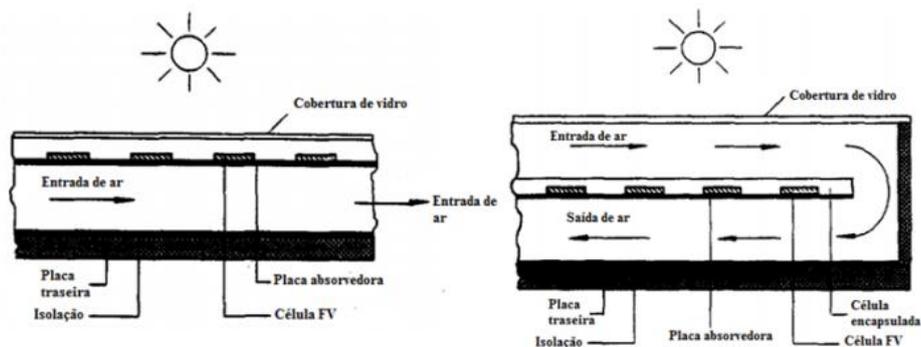


Figura 6. Configuração PVT com passagem simples e dupla, respectivamente.

Fonte: SOPIAN *et al.* (1996), adaptado pelo autor.

Em 1999, quatro configurações diferentes (ar fluindo acima da placa absorvedora, abaixo e em ambos os lados com passagem simples e dupla), mostradas na Figura 7, foram comparadas analiticamente e foi constatado que a configuração com ar fluindo sobre a placa absorvedora foi o caso que se obteve o menor desempenho, já para os demais arranjos, se observou resultados semelhantes de eficiência (HEGAZY, 2000). Ao final do estudo, o coletor com passagem dupla se mostrou mais eficiente, semelhante ao experimento de Sopian *et al.* (1996).

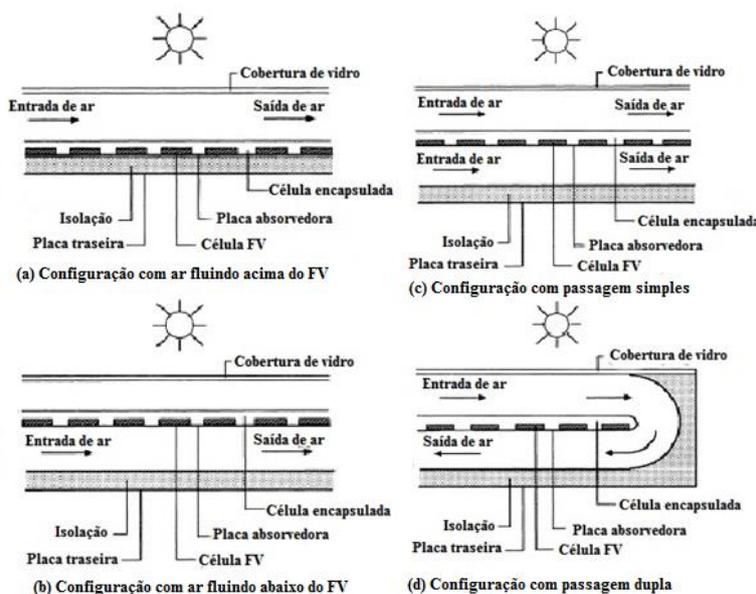


Figura 7. Configurações PVT com a) ar fluindo acima do FV, b) ar fluindo abaixo do FV, c) passagem simples e d) passagem dupla.

Fonte: HEGAZY (2000), adaptado pelo autor.

Em 2003, foi realizada uma análise numérica com nove diferentes arranjos de coletor PVT baseado a água, foram eles: três coletores chapa-tubo (com uma cobertura, com duas e sem cobertura); canal acima das células FV; abaixo das células FV com material opaco e outro com material transparente; coletor PVT com fluxo livre; e dois coletores com canais de dupla passagem (tipo isolado e não isolado). Os coletores foram classificados em quatro grupos, conforme mostra a Figura 8. Como resultado foi observado que o coletor chapa-tubo sem cobertura foi o que obteve a menor eficiência geral que foi de 61,7%. O coletor com canais de dupla passagem (tipo isolado) apresentou o melhor desempenho geral com um percentual de 74,5% (ZONDAG *et al.*, 2003).

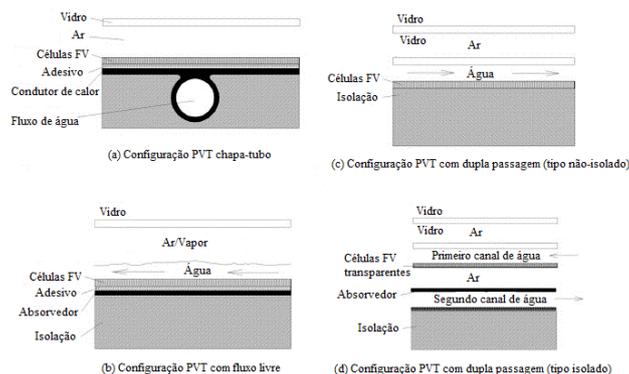


Figura 8. Classificação das configurações PVT.
Fonte: ZONDAG *et al.* (2003), adaptado pelo autor.

Em 2008, um estudo com intuito de analisar analiticamente a viabilidade econômica de três diferentes configurações de coletores híbridos destinados ao aquecimento de água e micro geração de energia elétrica foi realizado. A pesquisa foi realizada em Portugal nas cidades de Porto, Bragança e Faro de modo a avaliar o comportamento anual dos coletores em diferentes condições climáticas (MARQUES, 2008). O autor utilizou os coletores híbridos placa-tubos com e sem cobertura e coletores placa-tubos com células transparentes, modelos semelhantes aos utilizados por Zondag *et al.* (2003). O coletor de placa-tubo com cobertura composto por células policristalinas demonstrou melhores resultados no rendimento térmico quando comparado aos demais sistemas estudados, porém, com relação a eficiência elétrica, esse tipo de coletor apresentou valores reduzidos. No que tange o modelo com cobertura de vidro, esse proporcionou um menor percentual de perdas de calor, ocasionando uma melhor eficiência térmica, no entanto, ela também provocou perdas de radiação por reflexão, baixando o desempenho elétrico do sistema. O arranjo que apresentou melhor desempenho elétrico foi a configuração placa-tubo sem cobertura composto por células monocristalinas, ao passo que o coletor placa-tubo com células transparentes não obteve bons desempenhos elétrico e térmico quando comparado aos outros arranjos.

Ainda sobre o estudo de Marques (2008), foi possível concluir que os coletores de placa-tubos com cobertura apresentam uma maior eficiência global que ficou em torno de 33,1%, sendo 22,1% de energia elétrica e 11% de energia térmica. Porém, os coletores placa-tubo sem cobertura são mais rentáveis, pois os mesmos produzem uma maior taxa de eletricidade, energia mais valorizada que a térmica.

No ano seguinte, ainda em Portugal, foi desenvolvido um estudo no qual um termogerador foi acoplado a um sistema PVT e através da elaboração de um modelo computacional foi possível simular para uma residência de quatro pessoas nas regiões de Porto, Bragança, Lisboa e Faro o comportamento do sistema no decorrer de um ano e utilizando duas configurações diferentes. Além de avaliar seus impactos sobre o sistema, foi feita uma análise comparativa do sistema com e sem o termogerador. Como resultado, foi observado que, apesar de a eficiência elétrica apresentar valores ligeiramente superiores, o termogerador apresentou baixa eficiência térmica e uma baixa potência de saída para o caso proposto. A Figura 9 mostra a representação do sistema com o termogerador entre os coletores e o reservatório. Desta forma, o autor concluiu que o aumento na eficiência elétrica proporcionada pelo termogerador não compensa quando se observa o investimento que esse equipamento precisa (TEIXEIRA, 2009).

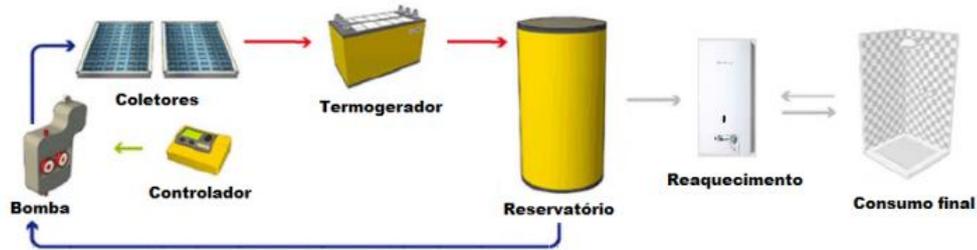


Figura 9. Representação para o sistema com termogerador.
Fonte: TEIXEIRA (2009), adaptado pelo autor.

No ano de 2012, em Singapura, dois diferentes coletores PVT baseados a água, um do tipo placa-tubo e outro do tipo canal em caixa, mostrado na Figura 10, foram instalados em um prédio com o propósito de analisar o desempenho de ambos. O módulo fotovoltaico do PVT placa-tubo era constituído de células monocristalinas, com a parte responsável pela troca de calor feita de cobre, enquanto o segundo tipo era composto de células policristalinas e a parte térmica de alumínio. Para o coletor PVT placa-tubo foi verificada uma eficiência térmica de 40,7%, ao passo que para o coletor canal em caixa se registrou 39,40%. A eficiência elétrica foi de 11,8% e 11,5%, respectivamente (DUBEY; TAY, 2012).



Figura 10. Módulos PVT instalados.
Fonte: DUBEY; TAY (2012), adaptado pelo autor.

Outro sistema experimental PVT placa-tubo baseado a água também foi desenvolvido, em 2013, utilizando células policristalinas na composição do módulo FV, com a parte condutora de calor feita de cobre e a circulação da água sendo forçada (HUANG; SUNG; YEN, 2013). Os principais resultados observados mostraram que a água chegou a uma temperatura máxima de 40°C nas condições normais de irradiância solar e a eficiência elétrica e térmica máxima esteve em torno de 14,5% e 47,2%, respectivamente, ou seja, um pouco acima dos resultados obtidos por Dubey e Tay (2012). A Figura 11 traz o coletor PVT que foi montado para esse estudo.



Figura 11. Coletor PVT montado.
Fonte: HUANG; SUNG; YEN (2013).

Três coletores PVT baseados a água com diferentes configurações de absorvedores (absorvedor em rede, absorvedor de fluxo direto e absorvedor de fluxo em espiral), mostrados na Figura 12, foram analisadas experimentalmente em laboratório no ano de 2014, de modo a determinar de que forma fatores como temperatura do módulo FV e vazão mássica do fluido interferem na eficiência do sistema PVT. Nesse experimento ficou comprovado que a eficiência geral do PVT aumenta de acordo com a vazão mássica do fluido e isso se deve ao fato de que quanto maior o fluxo, maior será o índice de resfriamento do sistema, logo, a vazão mássica contribui de forma indireta para o aumento da temperatura da água, como consequência, contribuindo para melhorar o desempenho global do sistema PVT. A configuração que apresentou melhor desempenho foi a que possui placa absorvedora com tubos em espiral com uma eficiência global de 68,40% (FUDHOLI *et al.*, 2014).

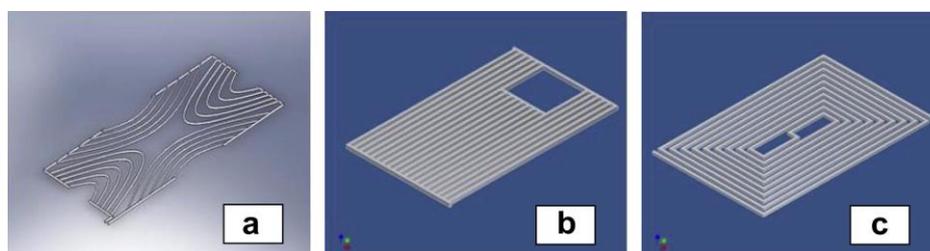


Figura 12. Coletor com absorvedor de a) fluxo de rede, b) fluxo direto, c) fluxo em espiral.
Fonte: FUDHOLI *et al.* (2014).

Ainda em 2014, um estudo sobre o desempenho de um coletor PVT do tipo água, placa plana com tubo retangular de absorção, foi realizado por meio de simulação e os resultados mostraram que, com um tempo de exposição de sete horas diárias, essa configuração apresentou um desempenho satisfatório tanto no arrefecimento, quanto nas eficiências elétrica e térmica, com valores máximos de 11,4% e 54,4%, respectivamente. A eficiência global máxima foi de 65,8%. A partir desse estudo o autor percebeu que a produção elétrica e térmica do sistema PVT aumenta conforme há uma diminuição na temperatura ambiente, por isso ele recomendou que melhorias, tais como, aprimorar a superfície de contato entre o módulo FV e os tubos retangulares fossem implantadas para aperfeiçoar o desempenho do sistema PVT (KADHIM *et al.*, 2014).

No ano de 2015, um novo estudo experimental com o objetivo de se alcançar um melhor arrefecimento e melhores desempenhos elétrico e térmico de um sistema PVT baseado a água foi produzido na China, a estrutura estudada foi mostrada na Figura 02. O equipamento foi montado no telhado de um prédio e através de testes realizados foram analisados os três fatores que poderiam influenciar nas eficiências térmicas e elétricas, que foram: a temperatura da água, a irradiância solar e a vazão mássica da água. A partir dos dados coletados, foi

possível perceber que tanto a eficiência térmica quanto a elétrica diminuíram gradualmente com o aumento da temperatura da água que entrava no sistema. Já o aumento da irradiância solar proporcionou um aumento na eficiência térmica, mas em contrapartida, a eficiência elétrica sofreu uma redução em seu percentual. No que tange o efeito da vazão mássica da água, foi verificado que tanto a eficiência térmica quanto a elétrica sofreram uma redução em seus valores com o aumento da vazão mássica. O parâmetro que menos influenciou no rendimento foi a irradiância solar, que deixou a eficiência global em 24,89% (HONGBING et al., 2015).

Em 2016, através de simulações e análise computacional, Jarimi *et al.* (2016) realizou um estudo para avaliar o desempenho de um coletor PVT utilizando ar e água como fluidos de trabalho. Foram realizados testes experimentais para diferentes condições de ambiente de modo a analisar a eficiência para cada fluido de trabalho separadamente e em conjunto, no qual o autor observou que, fixando um valor de vazão mássica, a eficiência do sistema PVT bifluido se sobressaiu em relação à análise dos sistemas PVT com os fluidos de trabalho separados. Comparando a avaliação experimental com as simulações foi constatado concordância entre os resultados comprovando o modelo elaborado que foi equivalente ao modelo apresentado na Figura 5, onde se obteve uma eficiência geral máxima de 57,63%.

Ainda em 2016, Su *et al.* (2016) desenvolveu e analisou o desempenho de quatro configurações diferentes de coletores PVT bifluido com passagem dupla, variando a combinação de fluidos nos canais de passagem, como é mostrado na Figura 13, e também a altura dos canais que se encontravam acima e abaixo do módulo FV. Após realizar todas as comparações pertinentes, percebeu-se que o coletor PVT com água circulando nos dois canais do sistema se mostrou mais eficiente tanto na parte elétrica quanto na térmica, chegando a uma eficiência geral de cerca de 84,2%. Verificou-se, ainda, que há uma relação direta entre a eficiência geral do coletor PVT água-água, a vazão mássica do fluido e a altura em que se encontram os canais superior e inferior (SU *et al.*, 2016).

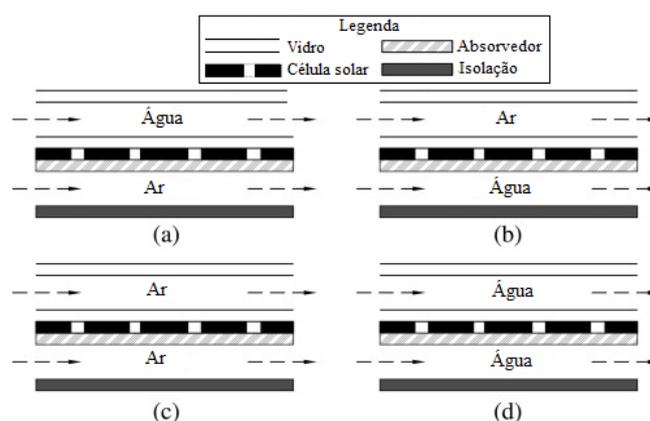


Figura 13. Corte transversal coletor PVT com passagem dupla.
Fonte: SU et al. (2016), adaptado pelo autor.

As pesquisas relacionadas ao desempenho das várias configurações possíveis de sistemas PVT continuam sendo realizadas. A participação internacional nesse campo se mostra presente com pesquisas significativas na área, sejam elas experimentais ou de revisão, contribuindo para a disseminação desse conceito que apesar de ser estudado desde o século passado, ainda se mostra tímido com relação à aplicação de projetos reais (CHOW, 2010; SATHE; DHOBLE, 2017). A Tabela 2 mostra um resumo das principais pesquisas realizadas acerca da tecnologia PVT pelo mundo, as quais foram descritas neste estudo.

Tabela 2. Resumo dos coletores PVT pelo mundo descritos neste estudo.

Ano	Tipo de	Método de	Eficiência	Descrição/características do coletor
-----	---------	-----------	------------	--------------------------------------

	coletor PVT	análise	geral (%)	PVT
1996	Ar	Analítica	45,00	Passagem dupla, mais eficiente que os demais; construção complexa.
1999	Ar	Analítica	NI	Passagem dupla, mais eficiente que os demais; construção complexa.
2003	Ar/água	Analítica	74,50	Passagem dupla do tipo isolado mais eficiente que os demais.
2008	Água	Analítica	33,60	Placa-tubo com cobertura; teste em diferentes condições climáticas; menos rentável.
2009	Água	Analítica	NI	Configurações com e sem termogerador; inviável devido ao alto investimento.
2012	Água	Experimental	52,50	Placa-tubo, células monocristalinas; parte responsável pela troca de calor feita de cobre.
2013	Água	Experimental	61,70	Placa-tubo, células policristalinas; parte responsável pela troca de calor feita de cobre.
2014	Água	Experimental	68,40	Absorvedor de fluxo em espiral; relação direta entre a vazão mássica do fluido e a eficiência.
2014	Água	Analítica	65,80	Placa plana; bom desempenho; exposição diária de sete horas.
2015	Água	Experimental	24,89	Placa plana; irradiação solar influenciou menos no desempenho; temperatura contribuiu para a redução da eficiência.
2016	Ar/água	Analítica/ Experimental	57,63	Coletor bifluido simples; teste em diferentes condições climáticas; rendimento razoável.
2016	Ar/água	Analítica	84,20	Coletor bifluido simples água-água; relação direta entre a vazão mássica do fluido, altura dos canais e a eficiência.

Nota: NI significa que o autor não informou o percentual para a eficiência geral.

Fonte: Autoria própria.

3.2 Brasil

O Brasil, devido à sua localização geográfica, é propenso a receber altos índices de radiação solar e possui regiões com altas temperaturas, tendo capacidade para se tornar referência no aproveitamento da energia solar. Contudo, a variação da incidência de radiação solar e da temperatura local provoca uma variação na temperatura das células constituintes dos módulos FV, que consequentemente afeta o desempenho do sistema, reduzindo sua vida útil, tendo em vista que os fabricantes realizam testes nas células com uma temperatura média de superfície de 25°C (GUERRA 2016). Neste sentido, o estudo sobre os coletores híbridos PVT têm despertado interesse de alguns pesquisadores brasileiros que procuram inserir essa vertente da energia solar entre as fontes alternativas, uma vez que o Brasil tem grande potencial para o desenvolvimento da mesma.

Assim como em diversas partes do mundo, no Brasil tanto estudos teóricos quanto experimentais também vêm sendo realizados nos coletores híbridos PVT desenvolvidos com o principal objetivo de realizar adaptações que contribuam para a realidade brasileira e, posteriormente, comparar a eficiência térmica e elétrica desses coletores PVT com os coletores solares de um sistema convencional. Nesse sentido, essas pesquisas se tornam importantes, pois além de sua contribuição teórica, torna possível sua aplicação prática.

O primeiro coletor híbrido PVT desenvolvido no Brasil que se tem registro foi em 2010, quando dois pesquisadores elaboraram um projeto experimental de coletor PVT baseado a

água produzido com quatro elementos chaves: um trocador de calor, um conjunto de células FV, um coletor solar térmico e um *boiler*. O trocador de calor foi acoplado na parte de trás do conjunto de células FV e ligado ao coletor solar térmico; já o *boiler* foi utilizado para o armazenamento da água aquecida pelo sistema PVT, a Figura 14 ilustra uma visão geral com os quatro elementos principais. Essa configuração proporcionou uma melhora na eficiência do sistema, provocada pelo arrefecimento das células FV. (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, 2010).

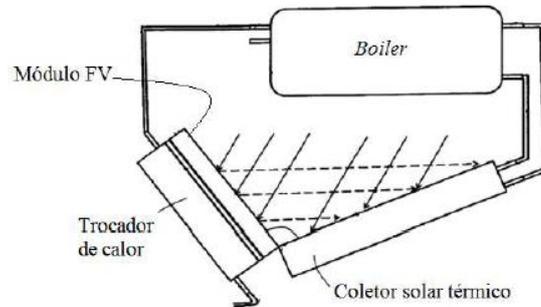


Figura 14. Visão global do sistema PVT com destaque nos quatro principais elementos.
Fonte: GUERRA (2016).

Em 2014, Viana (2014) construiu um protótipo de um coletor PVT para aplicações residenciais ao qual é mostrado na Figura 15. O protótipo foi constituído por uma placa absorvedora composta por tubos internos por onde a água iria circular por meio de circulação natural; células fotovoltaicas policristalina; e um reservatório térmico. O experimento se deu durante quatro dias consecutivos com o intuito de analisar o comportamento diário do sistema PVT. Como resultado, foi observada uma eficiência térmica média de 33,1%, eficiência elétrica ficou em torno de 6,8%, bem como uma eficiência média global de 39,9%. Por fim, o autor constatou a viabilidade técnica e econômica do sistema para aplicações residenciais mostrando que o aproveitamento da área e o retorno de investimento para esse sistema se sobressai quando comparado com o sistema convencional. Salienta ainda que o sistema PVT poderia ser utilizado para atender regiões onde não há atendimento por parte da rede elétrica ou ainda usado como sistema auxiliar na geração de eletricidade e água quente para residências ou comércios.



Figura 15. Coletor PVT.
Fonte: VIANA (2014).

Analisando a literatura foi possível observar que grande parte das pesquisas desenvolvidas no Brasil foram realizadas no ano de 2016. Um dos estudos, por exemplo, foi

realizado na cidade de Brasília com o intuito de verificar a viabilidade técnica de um sistema PVT para geração de eletricidade e aproveitamento de água para uso doméstico comparando os resultados alcançados com um sistema já operante em Dublin (RIBEIRO, 2016). Para esse modelo, mostrado na Figura 16, em que a eficiência global foi de 28,02%, foi constatado um pequeno aumento na temperatura da água, o qual foi atribuído à reduzida área de superfície do módulo estudado, concluindo assim, a relação direta entre o ganho de temperatura e a área do coletor. Apesar de o clima brasileiro oferecer condições mais favoráveis para a implantação do sistema PVT quando comparado à Dublin, os resultados encontrados foram inferiores aos obtidos na capital da Irlanda. A autora atribuiu fatores como dimensão do projeto, metodologia não automatizada de coleta de dados e o caráter experimental de elaboração do projeto como causas para essa diferença de resultados. Por fim, ela conclui que o sistema estudado teria uma aplicação mais viável para pré-aquecimento de água ou para situações nas quais a água não precisasse operar a altas temperaturas.

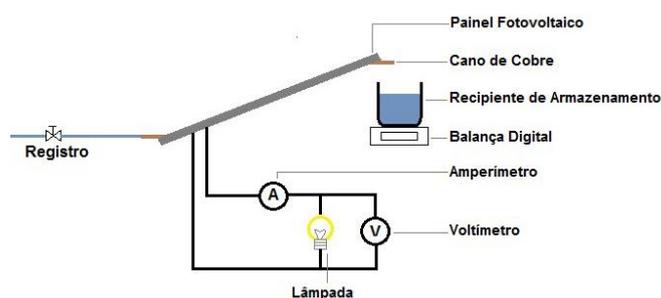


Figura 16. Esquema do sistema PVT criado.
Fonte: RIBEIRO (2016).

No mesmo ano, foi realizado um estudo experimental com o propósito de comparar a eficiência de um sistema híbrido PVT com as eficiências elétrica e térmica separadamente de um módulo fotovoltaico e um coletor térmico de placa plana convencional, respectivamente. O ensaio foi realizado em Porto Alegre e para obter melhores resultados na análise comparativa, as três configurações foram submetidas às mesmas condições meteorológicas, dispostas uma ao lado da outra, conforme mostra a Figura 17. É válido ressaltar que, diferentemente do coletor térmico convencional, o coletor PVT não possuía cobertura de vidro, fator este que contribuiu para que a eficiência térmica do coletor híbrido se mostrasse três vezes menor à do coletor térmico convencional, visto que a cobertura de vidro minimiza as perdas de calor com o ambiente. Após dados obtidos através de simulações, foi concluído que a eficiência elétrica anual do sistema PVT apresentou um rendimento 5,5% melhor em comparação com o módulo FV convencional. Por fim, a autora ressalta que é possível aperfeiçoar a parte térmica do coletor híbrido PVT de modo que não se comprometa o rendimento elétrico, desta forma fazendo com que o sistema possa ser utilizado para aplicações domésticas, por exemplo (ANCINES, 2016).

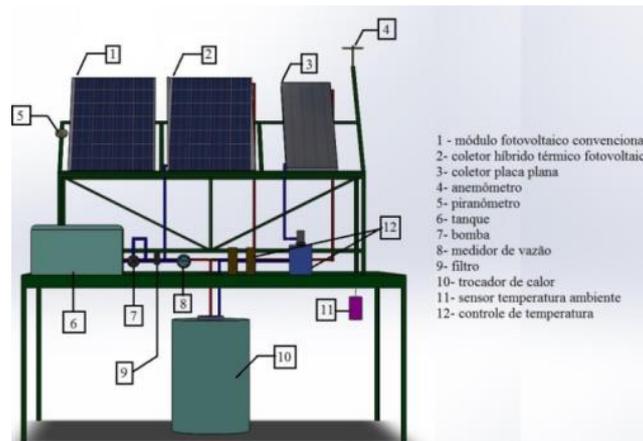


Figura 17. Ilustração do sistema montado e seus componentes.

Fonte: ANCINES (2016).

- conventional photovoltaic module
- hybrid thermal photovoltaic collector
- flat plate collector
- anemometer
- piranômetro
- tank
- pump
- flow meter
- filter
- heat exchanger
- ambient temperature sensor
- temperature control

Ainda em 2016, foi realizada uma simulação numérica com o intuito de analisar a eficiência de um coletor PVT utilizando como base os dados do mapa solarimétrico de Minas Gerais, por meio de uma média da radiação solar para cada três meses referente ao ano de 2012. A geometria escolhida para a simulação foi o coletor híbrido PVT com tubos acoplados a face posterior do módulo FV, ilustrada na Figura 18. Mantendo a temperatura de entrada da água igual para os períodos estudados, os resultados das simulações numéricas mostraram que, assim como nos coletores solares convencionais, a eficiência térmica também tem relação direta com a irradiância solar, ou seja, o aumento da irradiância solar aumentará a temperatura dos módulos FV e proporciona um acréscimo na eficiência térmica do coletor PVT. Em relação à eficiência elétrica, diferentemente do esperado, ela diminui com o aumento da irradiância solar. Ao término do estudo, concluiu-se que o período que apresentou uma maior eficiência global foi o último trimestre do ano, ou seja, de outubro a dezembro que foi quando o índice de irradiância solar apresentou valores mais altos (LIMA *et al.*, 2016).

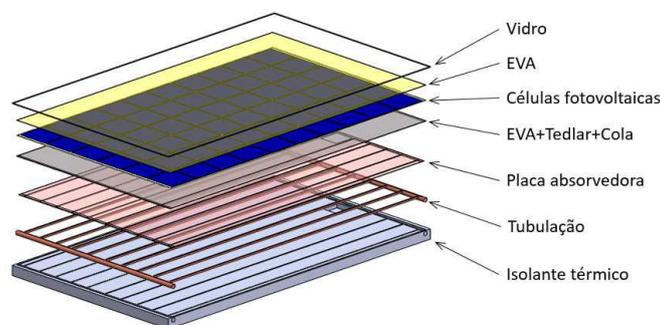


Figura 18. Modelo do sistema PVT.

Fonte: LIMA et al. (2016).

No mesmo ano, um estudo experimental também foi realizado com o propósito de se comparar o funcionamento de um coletor híbrido baseado a água (P1) com um painel fotovoltaico convencional (P2), que é apresentado na Figura 19. Os dados foram coletados de modo a se utilizar a maior incidência solar disponível. Com o fim do experimento foi possível concluir que o coletor PVT apresentou melhor desempenho na geração de energia elétrica, totalizando 569,3 W. Como esperado, a eficiência elétrica do sistema PVT foi superior ao desempenho do módulo FV convencional, com valores em média de 4,55% e 4,22%, respectivamente. Para esse experimento, a geração de calor foi considerada baixa, pois as temperaturas alcançadas pela água foram insuficientes para garantir armazenamento nos períodos sem radiação (SANTOS *et al.* 2016).



Figura 19. Sistema PVT montado.
Fonte: SANTOS *et al.* (2016).

Através de ensaios, também em 2016, foi analisado o desempenho de um gerador fotovoltaico com adaptações que possibilitasse a acoplagem de um sistema para arrefecer o módulo FV utilizando a água como fluido de trabalho e os resultados foram comparados com um sistema convencional. A análise se deu pela elaboração de dois modelos térmicos, um considerando a célula FV sem resfriamento e outro composto por uma célula FV com trocador de calor. Foram elaborados dois protótipos, Figura 20, um baseado no coletor PVT do tipo água e ar chapa-tubo e outro usando como referência o coletor PVT água e ar com duas superfícies absorvedoras, porém o segundo protótipo não foi ensaiado devido às dificuldades durante o processo de confecção do protótipo. Através dos resultados das simulações foi observada uma eficiência elétrica superior a 18% para o modelo térmico com trocador de calor, já o sistema convencional apresentou uma eficiência elétrica de 15%, para os níveis de irradiância de $1000\text{W}/\text{m}^2$ e temperatura ambiente de 30°C . Foi verificada ainda, uma redução de 32°C na temperatura do sistema híbrido PVT. Ao final do experimento, foi constatada uma redução da temperatura de 33°C , o que proporcionou uma eficiência geral de 17,98% para o coletor adaptado PVT, sendo 17,5% para a parte elétrica e apenas 0,48% para a parte térmica, enquanto que a eficiência elétrica do sistema convencional ficou em 15,46%. Desta forma, percebeu-se que um sistema híbrido PVT é capaz de recuperar 13,2% da eficiência elétrica de um módulo FV convencional e ainda aproveitar a água que ficou aquecida após o processo de arrefecimento (GUERRA, 2016).

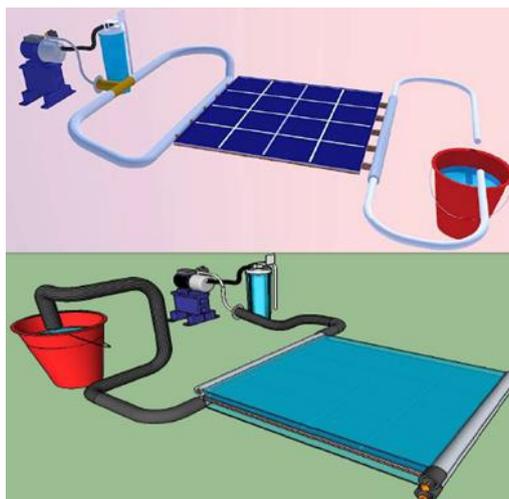


Figura 20. Sistema composto pelo protótipo (a) água e ar chapa-tubo e (b) água e ar com duas superfícies absorvedoras.

Fonte: GUERRA (2016).

Recentemente, Zanlorenzi, Szejka e Souza (2017) propuseram um modelo conceitual de um PVT do tipo água com arrefecimento utilizando serpentinas. De início, foi utilizado um software com o intuito de verificar a dimensão de todos os componentes que foram utilizados no projeto para assim projetar a serpentina de modo que o tubo atingisse todas as células do módulo escolhido. Foi utilizada também uma lâmina de alumínio para revestir as serpentinas com o propósito de aumentar a área de dissipação, de forma a causar uma homogeneização na temperatura média do módulo. O modelo experimental foi aplicado em Curitiba com duração de oito dias. Devido às boas condições climáticas, foi escolhido o dia 13/01/2017 para a aquisição dos dados. Com a análise dos resultados foi possível obter uma eficiência elétrica de 12,62% e uma eficiência térmica de 23,5% e uma eficiência global máxima de 36,93%, estes valores utilizaram como base o momento em que os módulos estavam gerando uma potência máxima e o instante em que se atingiu a sua maior temperatura, respectivamente, o que ocorreu às 13h52min. Assim, como era esperado, em mais um modelo o sistema híbrido apresentou uma eficiência superior quando comparado com o sistema fotovoltaico convencional, pois a geração simultânea de energia contribuiu com a diminuição da temperatura do módulo fotovoltaico que, para esse caso, foi registrado uma redução de 14,6°C. A Tabela 3 mostra um resumo dos coletores PVT desenvolvidos pelos pesquisadores brasileiros que foram descritos neste estudo.

Tabela 3. Resumo dos coletores PVT no Brasil descritos neste estudo.

Ano	Tipo de coletor PVT	Método de análise	Eficiência geral (%)	Descrição/características do coletor PVT
2010	Água	Experimental	NI	Quatro elementos chave (trocaador de calor, células FV, coletor solar térmico, <i>boiler</i>); melhora no rendimento.
2014	Água	Experimental	39,00	Células policristalinas; placas absorvedoras; reservatório térmico; circulação natural; sistema viável.
2016	Água	Experimental	28,02	Pequeno aumento na temperatura da água; aplicação mais limitada; resultados inferiores ao sistema em Dublin.
2016	Água	Experimental	NI	Placa plana; sem cobertura de vidro; mais eficiente quando comparado ao modelo FV convencional.
2016	Água	Analítica	NI	Medições trimestrais; dados do mapa solarimétrico de MG; melhor eficiência

2016	Água	Experimental	NI	nos meses de outubro a dezembro. Utilização da maior incidência solar; baixa geração de calor; temperatura da água baixa para armazenamento.
2016	Água/ar	Experimental	17,98	Chapa-tubo do tipo água e ar; recuperação na potência do sistema; baixa eficiência térmica.
2017	Água	Experimental	36,93	Utilização de serpentina no modelo elaborado; bons índices de eficiência elétrica e térmica.

Nota: NI significa que o autor não informou o percentual para a eficiência geral.

Fonte: Autoria própria.

4 – AVANÇOS DA TECNOLOGIA NO CENÁRIO MUNDIAL

A tecnologia híbrida solar fotovoltaica e térmica tem se mostrado bastante promissora especialmente por agregar as duas principais formas de captação da energia solar em um só sistema. Nos últimos anos, os estudos evoluíram e novas técnicas estão sendo incorporadas às tradicionais pesquisas sobre o uso da água e do ar como fluido arrefecedor. Como exemplo pode-se citar o coletor PVT com base em nanofluido, este que normalmente é obtido por meio da suspensão de partículas de fluidos convencionais e possuem nanopartículas menores que 100nm. Os nanofluidos são essencialmente fluidos de transferência de calor, por isso podem desempenhar um importante papel nos sistemas de conversão solar (SATHE; DHOBLE, 2017).

Em sua obra, Sathe e Dhoble (2017) traz três conceitos de novas técnicas aplicadas ao sistema PVT, são elas: PVT utilizando os nanofluidos como fluido de trabalho que, conforme citada anteriormente, gera um aumento na eficiência global e aprimora de forma significativa os parâmetros do sistema em geral; PVT com materiais de mudança de fase (*phase change materials* – PCM), que se mostra eficiente para gerenciamento térmico e melhora a performance do sistema, elevando o desempenho global; e PVT com tubos de calor, utilizado para transportar calor por meio de evaporação e condensação sem necessitar de energia externa, também proporcionando uma melhora na eficiência do sistema, pois causa uma diminuição na temperatura dos módulos FV. A Figura 21 mostra um esquema para cada uma dessas técnicas.

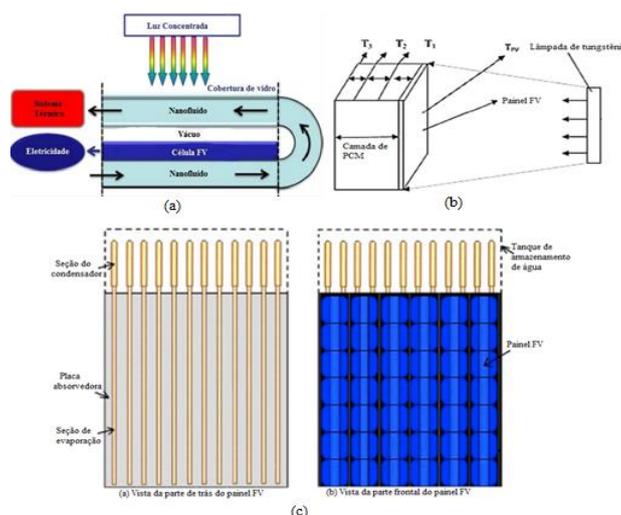


Figura 21. Coletores PVT usando (a) nanofluidos, (b) material de mudança de fase, (c) tubos de calor.

Fonte: SATHE; DHOBLE (2017).

Outras áreas que demonstram grande potencial para se desenvolver diz respeito aos absorvedores térmicos para sistemas PVT. Por exemplo, os sistemas PVT do tipo concentradores buscam garantir uma coleta efetiva de radiação solar devido à concentração dos raios solares. Nessa tecnologia, grande parte da área do módulo FV é substituída por área espelhada, fazendo com que o coletor se torne mais barato e o tempo de retorno de investimento seja reduzido. Outro modelo é o sistema PVT com laminação baseado em EVA, que tem se destacado por ser uma das melhores opções para o encapsulamento da célula solar. Uma terceira tecnologia é o módulo PVT integrado com recuperação de calor (BIPVT) que pode ser usado diretamente para aplicações de baixa temperatura, tornando-se uma boa opção para fornecer calor para edifícios gerando menos perdas (WU *et al.*, 2017).

Os avanços nos estudos que envolvem os sistemas híbridos PVT contribuem para evidenciar ainda mais as vantagens que essa tecnologia tem, como a possibilidade da cogeração de energia.

5 – VANTAGENS

Além de trazer vantagens como a cogeração de energia e o aumento da eficiência geral quando comparada com sistemas independentes, a tecnologia híbrida fotovoltaica e térmica, geram uma redução nos custos de instalação, já que ao invés de se instalar dois sistemas para usufruir dos benefícios da energia solar, será necessária a instalação de apenas um sistema adquirindo as duas formas de energia solar (ZONDAG, 2008). Os coletores PVT oferecem vantagens, tais como: um novo e maior mercado, fato causado pela combinação das duas principais formas de se aproveitar a energia solar; novas possibilidades de integração em edifícios, devido a menor ocupação de espaço; e menor tempo de amortização que é causado principalmente pela melhora na eficiência e custos reduzidos de instalação, quando comparado com os sistemas independentes (TEIXEIRA, 2009).

Além disso, os sistemas podem satisfazer a demanda por eletricidade e calor de edifícios com uma redução de poluentes, como o CO₂, por exemplo.

São considerados sistemas confiáveis, possuindo uma prolongada vida útil que dura em torno de 30 anos e com baixos custos de manutenção.

6 – BARREIRAS PARA DISSEMINAÇÃO

Apesar de ser uma tecnologia amplamente diversificada e de fácil adaptação, os coletores híbridos ainda apresentam algumas limitações quanto à 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; SUMATHY, 2010). Como visto anteriormente, os sistemas PVT que apresentam eficiência elétrica inferiores aos coletores FV convencionais, não se torna tão atrativo em aplicações nas quais o principal foco está na maior produção de eletricidade.

Os principais obstáculos com relação à tecnologia híbrida PVT diz respeito a sua comercialização, a falta de viabilidade econômica, a consciência pública, a padronização do produto, garantias e certificação de desempenho, além de treinamento de instalações e experiências (ANCINES, 2016). As condições climáticas também são apontadas com desvantagem, quando o foco está no aquecimento do fluido de trabalho, visto que em períodos que se têm baixos índices de irradiância solar, o sistema precisaria de uma entrada adicional de energia para atender a demanda por aquecimento, por exemplo (SATHE; DHOBLE, 2017).

7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando todos os aspectos apresentados no presente estudo, pode-se perceber que a tecnologia solar híbrida fotovoltaica e térmica se mostra como uma importante forma de produção simultânea de energia elétrica e térmica gerando diversos benefícios, porém a aplicação desse sistema se restringe às áreas onde se tenha necessidade de produção de calor e eletricidade simultaneamente.

De modo geral, os sistemas PVT tem grande potencial para se desenvolver, mas ainda há poucos estudos relacionados a essa tecnologia, principalmente no Brasil, onde os estudos experimentais realizados se encontram em pequeno número. Como foi visto, a maior parte das pesquisas se concentram em estudar os sistemas PVT que utilizam água ou ar como fluidos de trabalho. Estudos numéricos, experimentais e de revisão são realizados com o principal intuito de avaliar a eficiência do sistema, especialmente comparando-os com os valores apresentados por um sistema convencional, validando a premissa de que a eficiência global do sistema PVT se mostra superior aos sistemas independentes.

Para as configurações descritas neste estudo, àquela que se mostrou mais eficiente quanto ao desempenho elétrico e térmico combinados foi estudada analiticamente por Su *et al.* (2016) ao passo que Fudholi *et al.* (2014) estudou o modelo que obteve a maior eficiência experimentalmente. As pesquisas foram realizadas com o coletor PVT bifluido (água-água) e coletor do tipo água, respectivamente. Através dos estudos apresentados foi possível perceber que apesar de ser apontado pelos autores como a configuração mais complexa, os coletores de camada dupla se sobressaem no que diz respeito à eficiência geral, em comparação com as demais configurações descritas.

Foi visto também que o coletor PVT baseado a ar, de um modo geral, é a configuração que apresenta a mais fácil construção, logo, menores custos quando comparado aos coletores PVT do tipo água, que possuem um design mais complexo, tornando-os menos rentáveis. Contudo, a configuração placa tubo, que foi utilizada em várias pesquisas, possui fácil fabricação e, portanto, se mostra promissora para desenvolvimentos futuros dos coletores PVT do tipo água.

O coletor PVT desenvolvido no Brasil que obteve maior eficiência geral foi estudado por Viana (2014), o qual apresentou um rendimento total de 39%. Foi utilizada água como fluido de trabalho e na ocasião foi constatado sua viabilidade técnica e econômica para aplicações residenciais. Os estudos desenvolvidos no Brasil utilizaram, em sua grande maioria, coletores PVT do tipo água, visto que o país é considerado de clima quente, dispensando assim sistemas para aquecimento de ar.

É importante destacar que a eficiência de um coletor PVT depende de diversos fatores, dos quais se destacam a temperatura do ambiente, a irradiação solar e a vazão mássica. Assim, se faz necessário que estudos preliminares sejam realizados para que se tenha conhecimento de qual configuração se enquadra melhor às condições impostas, visando sempre adequar o sistema da melhor forma possível para que assim se possa usufruir dos benefícios do sistema PVT sem prejuízos.

As novas técnicas desenvolvidas utilizando nanofluido, tubos de calor e materiais de mudança de fase têm mostrado resultados significativos quanto ao nível de eficiência, no entanto, o campo de pesquisa experimental relacionada a esses novos métodos ainda se apresentam de forma limitada.

As pesquisas relacionadas à tecnologia híbrida solar fotovoltaica e térmica se concentram fora do Brasil e apresentam bons resultados em suas análises. O Brasil possui grande potencial para o desenvolvimento da mesma, porém há poucas pesquisas acerca desta tecnologia no país.

É notório que a tecnologia solar híbrida fotovoltaica e térmica tem grande potencial para se desenvolver futuramente, expandir seu campo de pesquisa, avaliando dentre as diversas configurações àquela que melhor se adequa às necessidades do projeto, padronização dos sistemas, bem como as garantias e certificados que possam gerar uma maior confiabilidade para os consumidores finais são medidas que se mostram importantes para que a tecnologia possa se difundir em um futuro próximo.

Neste sentido, é importante ressaltar que mais pesquisas relacionadas a essa tecnologia precisam ser realizadas de modo a aprimorar mais ainda sua eficiência e procurar reduzir os custos inerentes de forma a torná-la mais competitiva, contribuindo para a disseminação do uso de fontes renováveis e descentralizando o uso de combustíveis fósseis para a produção energética.

REFERÊNCIAS

AL-WAELI, Ali H. A. et al. Photovoltaic Thermal PV/T systems: A review. **International Journal Of Computation And Applied Sciences**. Uk, p. 62-67. abr. 2017. Disponível em: <<https://ijocaas.com/wp-content/uploads/2017/04/IJOCAAS-02-02-004-April2017.pdf>>. Acesso em: 18 jul. 2017.

ANCINES, C. A.. **Comparação entre o desempenho de um coletor híbrido térmico fotovoltaico com o de um coletor plano e um módulo fotovoltaico convencional**. 2016. 50 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/149352/001005231.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 27 jul. 2017.

CHARALAMBOUS, P.g. et al. Photovoltaic thermal (PV/T) collectors: A review. **Applied Thermal Engineering**, [s.l.], v. 27, n. 2-3, p.275-286, fev. 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431106002316>>. Acesso em: 16 ago. 2017.

CHOW, T. T.. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. **Applied Energy**, [s.i.], v. 87, p.365-379, fev. 2010.

CRESESB. **Energia Solar - Princípios e Aplicações**. 2006. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2017.

DUBEY, Swapnil; TAY, Andrew A. O.. Experimental Study of the Performance of Two Different Types of Photovoltaic Thermal (PVT) Modules under Singapore Climatic Conditions. **Journal Of Fundamentals Of Renewable Energy And Applications**, [s.l.], v. 2, p.1-6, 2012. Disponível em: <<https://www.omicsonline.org/open-access/experimental-study-of-the-performance-of-two-different-types-of-photovoltaic-thermal-pvt-modules-under-singapore-climatic-conditions-2090-4541-2-121.pdf>>. Acesso em: 26 ago. 2017.

FUDHOLI, Ahmad et al. Performance analysis of photovoltaic thermal (PVT) water collectors. **Energy Conversion And Management**, [s.l.], v. 78, p.641-651, fev. 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890413007383>>. Acesso em: 20 set. 2017.

GUERRA, M. I. da S.. **Análise do desempenho elétrico de um gerador fotovoltaico com o**

auxílio da tecnologia PVT.2016. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Energias Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016. Disponível em: <http://www.cear.ufpb.br/arquivos/ppger/documentos/Dissertação_-_Versão_final.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2017.

HASAN, M. Arif; SUMATHY, K.. Photovoltaic thermal module concepts and their performance analysis: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 14, n. 7, p.1845-1859, set. 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110000663>>. Acesso em: 27 ago. 2017.

HEGAZY, Adel A.. Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors. **Energy Conversion And Management**, [s.l.], v. 41, n. 8, p.861-881, maio 2000. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890499001363>>. Acesso em: 20 set. 2017.

HONGBING, Chen et al. Experimental Study on the Energy Performance of PV-HP Water Heating System. **Energy Procedia**, [s.l.], v. 75, p.294-300, ago. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215011194>>. Acesso em: 27 ago. 2017.

HUANG, Chao-yang; SUNG, Hsien-chao; YEN, Kun-lung. Experimental Study of Photovoltaic/Thermal (PV/T) Hybrid System. **International Journal Of Smart Grid And Clean Energy**, ., v. 2, n. 2, p.148-151, maio 2013. Disponível em: <<http://www.ijsgce.com/uploadfile/2012/1018/20121018111134178.pdf>>. Acesso em: 26 ago. 2017.

JARIMI, Hasila et al. Bi-fluid Photovoltaic/Thermal PV/T Solar Collector with Three Modes of Operation: Experimental Validation of a Theoretical Model. **Mediterranean Green Buildings & Renewable Energy**,[s.l.], p.445-464, 14 dez. 2016.

KADHIM, Ali Najah et al. Study on the Performance of Photovoltaic Thermal Collector (PV/T) with Rectangular Tube Absorber Design. In: ZAHARIM, Azami et al (Ed.). **Computer Applications in Environmental Sciences and Renewable Energy**. Kuala Lumpur: Wseas Press, 2014. p. 67-72. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Ali_Al-Shamani/publication/265507581_Study_on_the_Performance_of_Photovoltaic_Thermal_Collector_PVT_with_Rectangular_Tube_Absorber_Design/links/54828eeb0cf2e5f7ceac5204/Study-on-the-Performance-of-Photovoltaic-Thermal-Collector-PV-T-with-Rectangular-Tube-Absorber-Design.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2017.

KUMAR, Anil; BARENDAR, Prashant; QURESHI, Uzma. Historical and recent development of photovoltaic thermal (PVT) technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 42, p.1428-1436, fev. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114009757>>. Acesso em: 16 ago. 2017.

LIMA, Geisiane A. de et al. Análise de eficiência de um coletor solar PVT por simulação numérica com base no mapa solarimétrico de Minas Gerais. In: **Congresso Brasileiro de**

Gestão Ambiental, 07., 2016, Campina Grande. Disponível em: <<http://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2016/X-005.pdf>>. Acesso em: 27 jul. 2017.

LOPEZ, Ricardo Aldabó. **ENERGIA EÓLICA**. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2012.

MARQUES, Ricardo Licínio M. da R. P.. **Avaliação da Viabilidade de Colectores Híbridos Fotovoltaicos e Térmicos para Aplicação ao Aquecimento de Águas e Micro-geração de Eletricidade**. 2008. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008. Disponível em: <<https://paginas.fe.up.pt/~em00099/ralatorio.pdf>>. Acesso em: 19 ago. 2017.

RAMOS, Figueiredo; CARDOSO, António; ALCASO, Adérito. Hybrid Photovoltaic-Thermal Collectors: A Review. **Ifip Advances In Information And Communication Technology**, [s.l.], p.477-484, 2010.

RIBEIRO, Nadja C. C.. **Análise De Sistema Híbrido Solar: Fotovoltaico e Térmico**. 2016. 34 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade de Brasília - Unb, Brasília, 2016. Disponível em: <<https://fga.unb.br/articles/0001/6749/TCC-NADJA.pdf>>. Acesso em: 26 jul. 2017.

RIFFAT, S. B.; CUCE, E.. A review on hybrid photovoltaic/thermal collectors and systems. **International Journal of Low-carbon Technologies**, [s.l.], v. 6, n. 3, p.212-241, 21 jul. 2011. Disponível em: <<https://academic.oup.com/ijlct/article/6/3/212/681067/A-review-on-hybrid-photovoltaic-thermal-collectors>>. Acesso em: 26 ago. 2017.

SANTOS, Suellem V. dos et al. COLETOR SOLAR HÍBRIDO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA. **Unoesc & Ciência - Acet**, [s.i.], v. 7, n. 2, p.169-176, dez. 2016. Disponível em: <<http://editora.unoesc.edu.br/index.php/acet/article/view/11997>>. Acesso em: 16 ago. 2017.

SATHE, Tushar M.; DHOBLE, A.s.. A review on recent advancements in photovoltaic thermal techniques. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 76, p.645-672, set. 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117304136>>. Acesso em: 27 ago. 2017.

SOPIAN, K. et al. Performance analysis of photovoltaic thermal air heaters. **Energy Conversion And Management**, [s.l.], v. 37, n. 11, p.1657-1670, nov. 1996. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0196890496000106>>. Acesso em: 20 set. 2017.

SU, di et al. Dynamic performance analysis of photovoltaic-thermal solar collector with dual channels for different fluids. **Energy Conversion And Management**, [s.l.], v. 120, p.13-24, jul. 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890416303454>>. Acesso em: 20 set. 2017.

TEIXEIRA, Tiago R. C.. **Estudo de um Sistema Híbrido com Colectores Solares Termo-Fotovoltaicos Acoplados a um Termogerador Eléctrico**. 2009. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009. Disponível em:

<<https://paginas.fe.up.pt/~em00099/ralatorio.pdf>>. Acesso em: 19 jul. 2017.

TONUI, J.k.; TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y.. Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements. **Solar Energy**, [s.l.], v. 81, n. 4, p.498-511, abr. 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X06002003?via=ihub>>. Acesso em: 26 ago. 2017.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. Arthur Vieira de Oliveira; Newton Cesário Frateschi. Sistema híbrido de aquecimento solar de água e geração fotovoltaica com melhor aproveitamento da energia solar. 24 nov. 2010, 05 mar. 2013. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/84943?locale=pt_BR>. Acesso em: 26 jul. 2017.

VIANA, Paulo R. **Avaliação Experimental de um Protótipo de Coletor Solar Híbrido para Geração Simultânea de Água quente e Eletricidade**. 2014. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia de Energia, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgwpoAB/avaliacao-experimental-coletor-solar-pvt>>. Acesso em: 17 jul. 2017.

WU, Jinshun et al. A review of thermal absorbers and their integration methods for the combined solar photovoltaic/thermal (PV/T) modules. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 75, p.839-854, ago. 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116308085>>. Acesso em: 20 set. 2017.

ZANLORENZI, G., SZEJKA, A. L., SOUZA, T. M.. **Proposta conceitual de um módulo fotovoltaico híbrido com resfriamento por serpentina de água**. In: 6th International Workshop Advances in Cleaner Production, 06., 2017, São Paulo. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/317290166_Proposta_conceitual_de_um_modulo_fotovoltaico_hibrido_com_resfriamento_por_serpentina_de_agua_The_Conceptual_Proposal_of_a_Hybrid_Solar_Photovoltaic_Module_with_Water_Coil_Cooling>. Acesso em: 27 jul. 2017.

ZONDAG, H. Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 12, n. 4, p.891-959, maio 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032107000020>>. Acesso em: 27 ago. 2017.

ZONDAG, H.a. et al. The yield of different combined PV-thermal collector designs. **Solar Energy**, [s.l.], v. 74, n. 3, p.253-269, mar. 2003. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X0300121X>>. Acesso em: 26 ago. 2017.