

COLETOR HÍBRIDO TÉRMICO FOTOVOLTAICO: REVISÃO DE SIMULAÇÕES E DIMENSIONAMENTOS

Edison Estivaleta Bilhalva Junior – edisonbilhalv@gmail.com

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica

Letícia Jenisch Rodrigues – leticia.jenisch@gmail.com

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica

Resumo. *Edificações precisam de energia para seu funcionamento, que incluem calor e eletricidade, podendo ambos ser providos por sistemas solares. Os coletores híbridos térmicos fotovoltaicos (PVT) vêm ganhando destaque nas últimas décadas, devido ao seu potencial energético, e consistem em uma combinação simultânea de um módulo fotovoltaico (PV) e um coletor solar térmico. A agregação das duas tecnologias melhora a eficiência total do sistema, reduz o uso de materiais, custo e o espaço de uso. O dimensionamento dos coletores e o desenvolvimento e validação de modelos matemáticos são importantes para implementação de soluções numéricas e controle de parâmetros de projeto, visando uma otimização de resultados. Neste sentido, o propósito deste trabalho é reunir e analisar trabalhos e artigos em que são feitos dimensionamentos e simulações computacionais de coletores híbridos térmicos fotovoltaicos, buscando uma avaliação das diretrizes, tendências, avanços e técnicas em pesquisas na área de estudo. É feita também uma breve descrição dos coletores, de acordo com suas características e fatores de projeto. Os resultados mostraram-se satisfatórios, mostrando um maior interesse da comunidade acadêmica neste assunto. O foco principal tem sido em torno do controle de parâmetros de design e melhoria da eficiência térmica, e o tipo de simulação usualmente empregado é o modelo dinâmico.*

Palavras-chave: *Coletor solar híbrido térmico fotovoltaico, Simulação de PVT, Avaliações de PVT.*

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é reconhecido por ter uma matriz energética limpa, e com baixos níveis de emissão de gases de efeito estufa. Porém, apesar das grandes centrais hidrelétricas do país ser consideradas de baixo impacto ambiental, é possível aumentar o uso de outras fontes com um menor impacto ainda. Uma solução para a diminuição dos gases poluentes e atender uma demanda crescente de energia é a utilização e desenvolvimento de fontes renováveis alternativas, principalmente pela elevada quantidade de radiação solar disponível em nosso país. A energia solar e fotovoltaica são exemplos de energias alternativas, sendo o coletor híbrido térmico fotovoltaico, que tem a função de coletor térmico e módulo fotovoltaico ao mesmo tempo, uma nova e possível solução energética de edificações. Um coletor PVT tem a função de gerar energia elétrica e térmica simultaneamente, a partir de uma única área de seu módulo. A ideia principal é utilizar a radiação solar, retirando, e utilizando o calor desperdiçado que é gerado pelos módulos fotovoltaicos. Como o aumento de temperatura torna a célula fotovoltaica menos eficiente, o calor removido é utilizado também para resfriar os módulos. Seu uso é recomendado em edificações com limitação de área de instalação. Estimativas indicam que o módulo PVT é aproximadamente 10% mais barato, quando comparado com a combinação dos módulos separados. Segundo Zondag *et al.* (2005), as pesquisas de PVT foram realizadas principalmente no nível de tecnologias de módulos, variando principalmente em design e função, de sistemas domésticos de aquecimento de água a fachadas fotovoltaicas ventiladas, e concentradores fotovoltaicos com refrigeração ativa. A expectativa é que o mercado de PVT irá se expandir, além do mercado de solar térmico, implicando no desenvolvimento direcionado no nicho específico residencial, conforme o mesmo autor.

Módulos híbridos começaram a ser estudados nos anos 70, após verificações de que a temperatura dos módulos fotovoltaicos aumenta à medida que a radiação solar é absorvida e não é convertida em energia elétrica, causando diminuição da eficiência. De acordo com Kalogirou & Tripanagnostopoulos (2006), para células de Silício monocristalino (c-Si) e policristalino (pc-Si), a eficiência diminui cerca de 0,45% para cada grau que aumenta a temperatura. Para células de Silício amorfo (a-Si), o efeito é menor, com decréscimo de aproximadamente 0,25% para cada grau de temperatura, dependendo do projeto do módulo. A eficiência térmica nos coletores PVT é menor que nos coletores térmicos. Porém, segundo Sathe & Dhobe (2016), apesar do calor em baixo grau produzido pelos módulos PVT, eles têm diversas aplicações térmicas, como aquecimento de ambientes, aquecimento em processos industriais, pré-aquecimento de fluidos industriais ou domésticos, entre outros.

A parte fotovoltaica dos coletores pode ser autônoma ou conectada à rede, e a térmica pode ser com temperatura média de calor, para aquecer água quente doméstica e aquecimento de espaços, ou temperatura baixa de calor, para aquecer piscinas, pré-aquecimento de ventilação de ar, e atualização de fonte de bomba de calor para aquecimento doméstico. Saber informações térmicas e elétricas do sistema, valores de geração de calor e eletricidade anual, e mudança de temperatura em diferentes camadas do coletor, é imprescindível para desenvolver ou melhorar um sistema

PVT. Porém, existem ainda muitas incertezas relacionadas ao projeto. Entre os fatores estão a obtenção de um projeto ótimo, melhores meios de extração de calor, rendimento de produção, entre outros, de acordo com Khelifa *et al.* (2016), que ainda afirmam que estas questões ainda não foram verificadas experimentalmente em um sistema de energia completo baseado em um PVT.

É importante a validação e detalhamento dos modelos matemáticos empregados para sistemas de coletores híbridos térmicos fotovoltaicos. Sabendo que o comportamento do sistema é equivalente ao proposto no modelo teórico implementado, é possível extrapolar resultados para outros lugares. Ter um modelo aplicável para prever o desempenho de um módulo PVT constitui uma grande vantagem para a indústria, de modo que esta ferramenta permite analisar a viabilidade de instalação de forma técnica e de perspectiva econômica. Neste sentido, objetivo deste trabalho é fazer uma revisão bibliográfica acerca dos coletores PVT, com ênfase nas tendências de estudos em simulações numéricas e dimensionamento dos sistemas, analisando também, de acordo com suas características e fatores de projeto, os sistemas fotovoltaicos térmicos híbridos. Para este propósito, vários artigos foram estudados, e várias ferramentas, como esquemas, fotos e figuras, foram usados para enriquecer o conteúdo, e produzir uma análise satisfatória.

2. SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO TÉRMICO

Os sistemas fotovoltaicos térmicos híbridos estão sendo estudados com prioridade nas últimas décadas, devido ao aumento da demanda global de energia elétrica e calor, e o maior interesse de melhorar a eficiência energética de edificações. Um coletor PVT consiste basicamente, em um módulo fotovoltaico acoplado em uma placa absorvedora, na qual o calor aumenta a temperatura de um fluido de trabalho, acarretando numa maior eficiência do sistema, maior uniformidade arquitetônica e redução de custos, para uma mesma área construída. A integração dos sistemas em um único módulo aumenta a eficiência da célula fotovoltaica e produz calor em baixo grau. Estudos são necessários para desenvolver melhor os sistemas, que precisam de otimizações e ainda tem poucos modelos disponíveis no setor comercial. Este capítulo busca fazer uma análise geral dos módulos híbridos, classificando-os, explicando suas características, e suas aplicações.

Sathe e Dhobe (2016) classificaram os coletores PVT de acordo com os tipos de sistemas e suas utilizações principais, dividindo-os em sistemas convencionais e sistemas novos, conforme a Fig. 1. Os mesmos autores afirmam que, no âmbito de sistemas convencionais, poucos autores examinaram a eficiência exergética de sistemas com fluidos de trabalhos convencionais, e poucos calcularam apenas a eficiência exergética, classificando como principais diretrizes de estudos atuais os parâmetros de projeto, configurações de placa absorvedora, estudos ambientais e novos métodos numéricos.

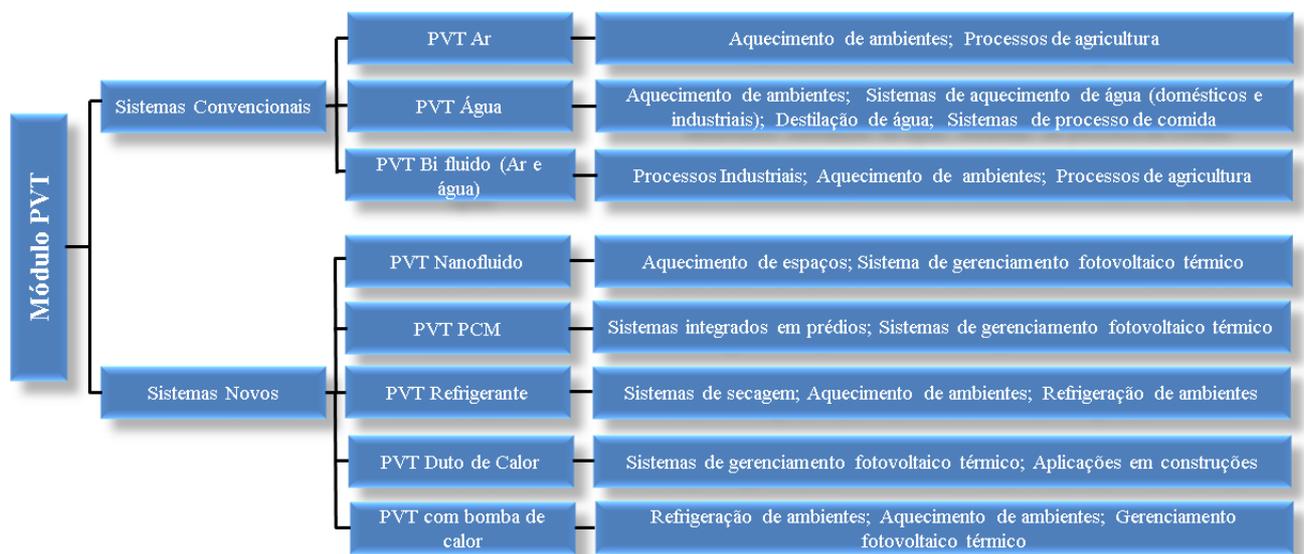


Figura 1 – Classificação de sistemas PVT baseado em técnicas de transferência de calor e integração com diferentes infraestruturas.

Elbreki *et al.* (2016) divide a classificação dos módulos PVT convencionais conforme o uso, ou não, de cobertura de vidro. Classifica também quanto ao fluido de trabalho, quando a ar, se dividindo em passagem simples ou passagem dupla. Os mesmos autores ainda classificaram os módulos segundo os fatores que afetam o comportamento de coletores PVT, dividindo-os em parâmetros de clima, projeto e condições operacionais, como pode ser visto na Fig. 2, com o objetivo de revisar informações e medir a precisão de influência de cada fator, nas eficiências térmicas, elétricas e globais. Foi concluído que os fatores que aumentam ou diminuem a eficiência global são mais similares aos parâmetros

que afetam a eficiência térmica, pois a eficiência global depende principalmente da eficiência térmica, enquanto há uma menor contribuição da eficiência elétrica.

Existem muitos estudos de casos na literatura discutindo parâmetros que afetam o desempenho do coletor híbrido. São discutidos aspectos de desenvolvimento e pesquisa na tecnologia, principalmente com água e ar como fluido de trabalho, projetos e comportamento dos coletores, estudos experimentais e instalações integradas. Outros autores ainda tentam classificar e avaliar os módulos das mais diversas formas, como questões econômicas, ciclo de vida, resíduos gerados, integração com edificações (telhado, parede), práticas de laboratório, efeito estufa, aquecimento global, eficiência exergetica, entre outros, que não serão o foco deste trabalho.

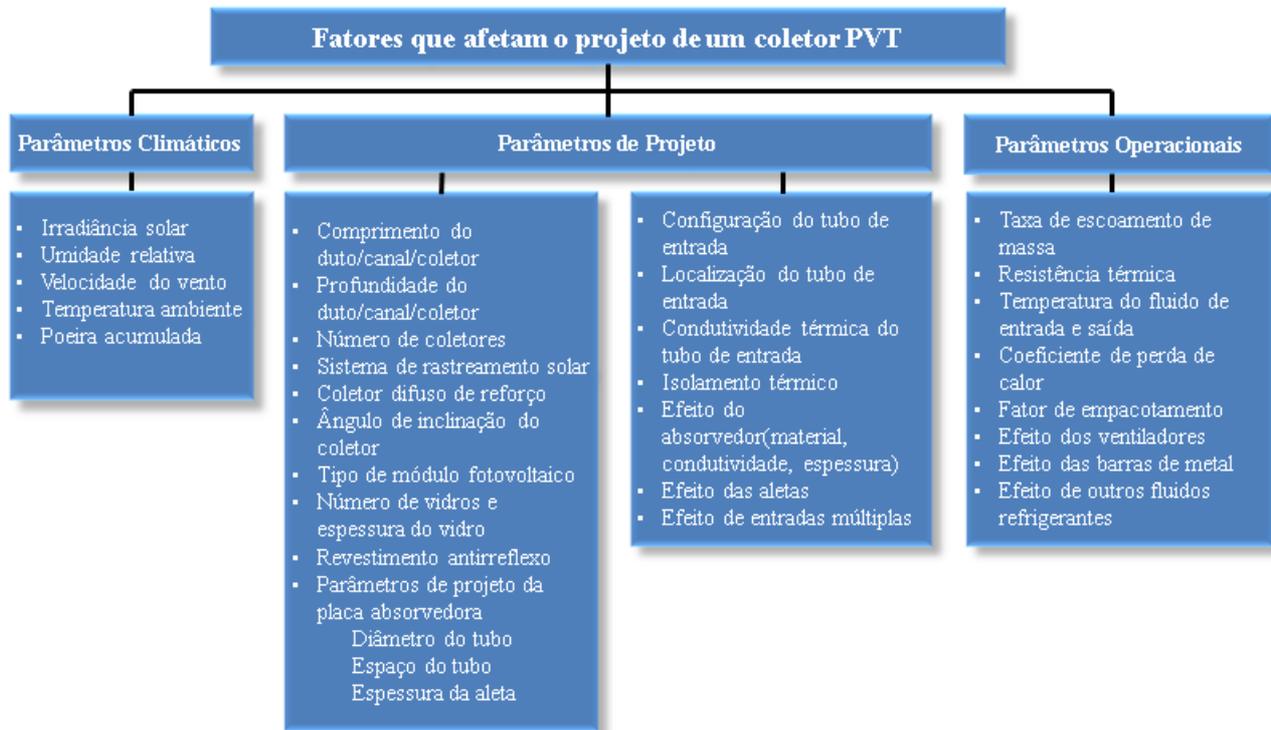


Figura 2 – Fatores e parâmetros que afetam o projeto de um coletor PVT.

2.1 Coletores de sistemas convencionais

Os coletores PVT de sistemas convencionais são divididos em três principais, de acordo com o fluido de trabalho: a água, ar e bi fluido (ar e água). Os módulos PVT ar são coletores com apenas ar como fluido de trabalho, causando o resfriamento das células fotovoltaicas. Podem ser com células PV integradas, em que o módulo PV funciona como a cobertura superior do canal de ar, ou com recuperação de calor, em que os módulos PV são integrados numa fachada de edifício. Nos integrados há uma passagem vertical de ar, onde o fluxo é a convecção natural, que limita as perdas térmicas do edifício com o ambiente. De acordo com Tripanagnostopoulos *et al.* (2005), a circulação natural ou forçada do ar é uma técnica simples e de baixo custo para remover calor das células fotovoltaicas, porém, é menos eficaz em lugares de baixas latitudes, pois a temperatura ambiente é maior que 20°C por muitos meses ao longo do ano. Com o intuito de evitar problemas de pressão e eletricidade, a solução usual é usar a circulação de água através de um trocador de calor em contato térmico com a superfície traseira do módulo PV.

Os módulos PVT água consistem em uma placa absorvedora com uma serpentina, muito semelhante a um coletor térmico de placa plana, acoplado a um módulo fotovoltaico. O sistema é mais complexo, quando comparado com o ar, pois é mais difícil e caro a construção de um sistema que o aqueça a água, principalmente pela exigência de uma cobertura, que melhora substancialmente a eficiência térmica. Existe um número limitado para novas melhorias neste ramo, de acordo com Sathe & Dhobe (2016), com exceção de inovadores projetos com ênfase em sua arquitetura e estudos de simulação. Zondag *et al.* (2003) estudou nove projetos de coletores PVT água e os avaliou, classificando-os em quatro grupos, como podem ser vistos na Fig. 3, de acordo com um corte transversal: coletor do tipo placa e tubo; canal; escoamento livre; e dois absorvedores.

Os módulos PVT bi-fluido são coletores em que o fluido de trabalho é ar e água simultaneamente, superando usualmente as desvantagens dos dois sistemas separados, uma vez que o sistema produzirá ar quente, água quente e eletricidade. Eles garantem também maior resfriamento do módulo PV, aumentando a eficiência energética do coletor. A desvantagem do sistema é que as aplicações dos fluidos de trabalho são muito limitadas, necessitando uma análise de custos e recursos.

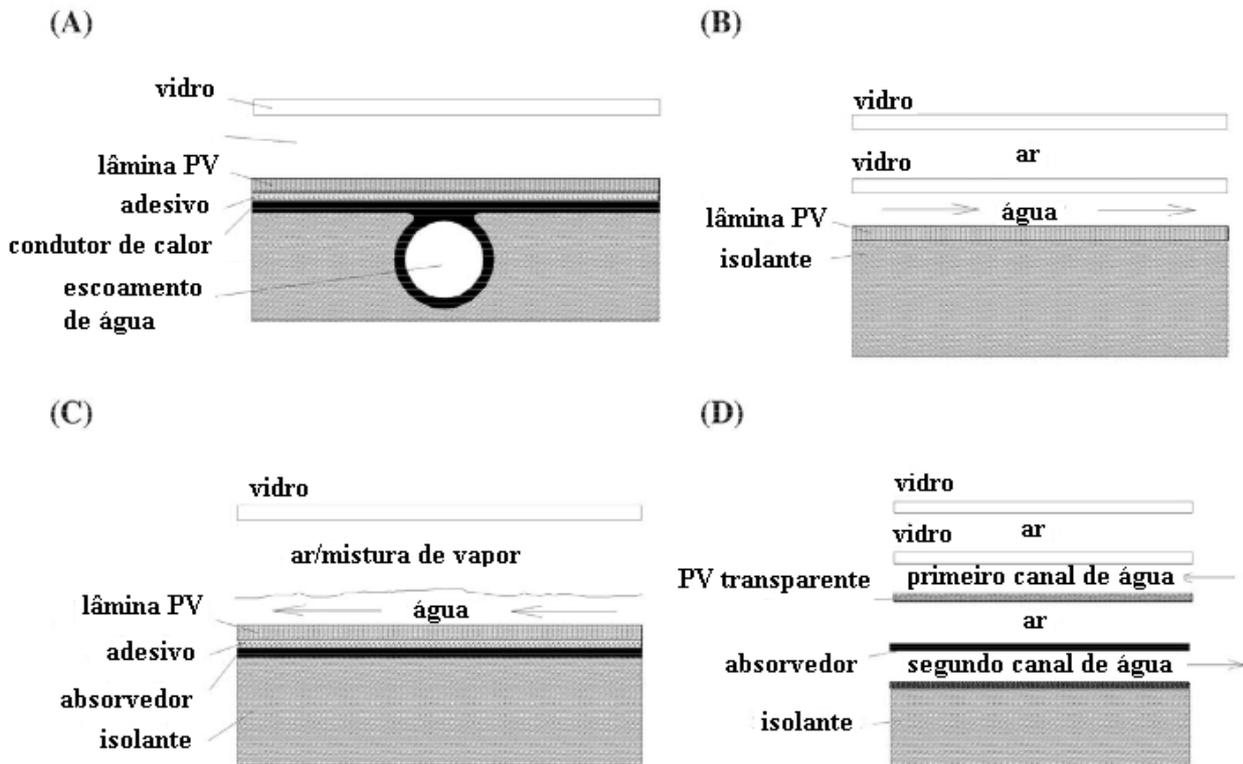


Figura 3 – Tipos de coletores PVT água: (A) Placa e tubo, (B) Canal, (C) Escoamento livre, (D) Dois absorvedores (Adaptado de Zondag, 2003).

2.2 Coletores de sistemas não convencionais

Nos últimos anos, algumas novas técnicas térmicas vêm sendo aprimoradas, substituindo os convencionais sistemas de saída de ar e água, sendo elas feitas pela integração de: nano fluidos, duto de calor, materiais de mudança de fase (também conhecidos pela sigla PCM, em inglês, *Phase Change Materials*), líquidos refrigerantes e bomba de calor. Os coletores PVT com nanofluidos foram primeiramente introduzidos para elevar a condutividade térmica de fluidos convencionais, uma vez que eles aumentam a transferência de calor e podem ser usados com eficiência em diversos sistemas de conversão de energia solar. As principais aplicações para nanopartículas e nanofluidos são com o propósito de filtro solar e refrigeração.

Os coletores com dutos de calor são geralmente usados para transportar calor usando técnicas de evaporação e condensação sem usar forças externas, onde o próprio duto é usado para extrair calor da superfície fotovoltaica. O fluido geralmente usado é água, e o material do duto é cobre. De acordo com Kutz (2006) o fluido de trabalho na seção do evaporador transporta o calor do sistema circundante e o converte em vapor, que passa para a seção do condensador devido à diferença de pressão através de uma seção adiabática. Na seção do condensador, o vapor libera calor, convertendo o fluido em líquido e novamente retornando para a seção do evaporador por capilaridade.

Os coletores com materiais envolvendo mudança de fase têm sido usados largamente para diversas aplicações, como baterias, células cheias, automóveis, sistemas de refrigeração, sistemas de armazenamento de água quente para edificações, entre outros, de acordo com Browne *et al.* (2015). A seleção de parâmetros é importante para a aplicação dos coletores PCM, tais como: temperatura de derretimento, material do container, e profundidade, todas estas soluções viáveis para o gerenciamento térmico.

Coletores PVT refrigerantes são aqueles em que é integrado diretamente um aparato de refrigeração de Rankine no coletor térmico, sendo o coletor usado como um evaporador onde o refrigerador absorve energia térmica da radiação solar, segundo Ji *et al.* (2009). E coletores PVT com bomba de calor são considerados uma medida para a redução do uso de energia em edifícios, com a vantagem significativa de uma fácil integração em redes inteligentes futuras, além de eliminar a preparação de água quente doméstica, especialmente nos períodos de calor, como verão. Este sistema deve ser analisado para cada uso específico, pois a eletricidade gerada para o sistema é reduzida pelo uso combinado dos módulos fotovoltaicos junto da bomba de calor.

3. SIMULAÇÕES E DIMENSIONAMENTO DE PVT

Um grande número de simulações numéricas vem sendo desenvolvidas ao longo dos últimos anos, visando conduzir os estudos de performances elétricas e térmicas de coletores PVT. As simulações são classificadas em modelos de regime permanente, modelos dinâmicos, e mecânica dos fluidos computacional (CFD). Neste capítulo será feita primeiramente uma descrição dos modelos matemáticos computacionais usualmente usados na área, e após uma revisão sobre estudos de caso de coletores PVT, utilizando-se modelos e softwares, no Brasil e no mundo, conforme modelos estudados, tipo de edificação, local, e resultados obtidos.

3.1 Visão sobre modelos matemáticos computacionais

Os modelos de regime permanente são originados pela equação de Hottel-Whillier (1955), onde a eficiência térmica dos coletores é em função do fator de remoção de calor, coeficiente de perda de calor e temperatura de saída do fluido, sendo precedido por Florschütz (1979), que fez modificações para aplicar os modelos a coletores híbridos, segundo a Eq. 1. Esta equação permite o cálculo direto da energia de saída do coletor combinado, em termos dos parâmetros convencionais relativos ao coletor térmico, mais os parâmetros da célula η_r e β_r , sendo a eficiência da disposição das células referência e o coeficiente de temperatura da eficiência das células solares, respectivamente. A equação depende ainda da temperatura ambiente, da temperatura de entrada do fluido e da intensidade incidente do sol.

$$Q_e = \frac{A_c S \eta_a}{\alpha} \left\{ 1 - \frac{\eta_r \beta_r}{\eta_a} \left[F_r (T_{f,i} - T_a) + \frac{S}{U_L} (1 - F_r) \right] \right\} \quad (1)$$

Modelos dinâmicos são considerados aplicáveis em condições de trabalho dinâmicas. Equações de balanço de energia são geralmente representadas como equações diferenciais parciais e resolvidas com o método de elementos finitos. Embora necessite de um custo computacional maior e implementações complexas, modelos dinâmicos são aplicáveis a solucionar projetos e controlar otimizações. Na prática, modelos semi-empíricos são usados para configurar as condições de trabalho mais parecidas possíveis com as condições reais. Modelos semi-empíricos podem ser encontrados no software TRNSYS. O software TRNSYS é um programa de simulação, desenvolvido pela universidade de Wiscosin, amplamente utilizado em processos térmicos, e tem sido usado em diversos casos, para um modelo de simulação dinâmica. Foi originalmente desenvolvido para aplicações em energia solar, e simulação de edificações com projetos solares. O programa utiliza uma série de rotinas e sub-rotinas para descrever os componentes do sistema, conforme parâmetros inseridos pelo usuário, permitindo assim, prever o funcionamento em situações reais. As rotinas são programadas de acordo com os componentes utilizados, como o coletor PVT, base de dados climática, armazenamento térmico, inversor, entre outros, para cada sistema sendo utilizado um “type”.

Softwares de mecânica dos fluidos computacional têm sido usados para investigar a transferência de calor e padronização de escoamentos. Os resultados estão na forma de velocidade, pressão e temperatura dos volumes de controle no domínio do fluido. De acordo com Sathe e Dhoble (2016), a simulação de sistemas PVT é muito significativa e pode reduzir os custos de experimentos, afirmando ainda que as simulações de mecânica dos fluidos computacionais têm muitas aplicações em sistemas solares como compreensão, distribuição da temperatura do módulo fotovoltaico em uma região específica, e analisar as diferentes configurações para sistemas PVT. Por isso, deve ter uma importância significativa nos próximos anos. Porém, segundo Fan *et al.* (2017), os modelos CFD requerem recursos computacionais significantes para curtos períodos de simulação, não estando aptos para controles em tempo real e conectados a outros sistemas. Além do mais, a seleção apropriada do modelo de turbulência e método de malha é um desafio fundamental, uma vez que eles podem ter um efeito significativo na precisão dos resultados de simulação.

3.2 Estudos de caso usando modelos matemáticos e softwares

Almeida e Oliveira (2008) estudaram painéis PVT com parâmetros variáveis: as células PV (silício monocristalino e silício amorfo); e o tipo de uso da edificação (residencial, em menor escala de construção, e hotel, em maior escala). Eles usaram uma modelagem no programa SolTerm, para calcular a energia de saída, para as cidades de Porto, Lisboa, Faro e Bragança, objetivando abranger três diferentes climas, pois o clima afeta o comportamento dos coletores. O SolTerm é um programa de análise de desempenho de sistemas solares, através de simulação numérica de balanços energéticos ao longo de um ano de referência, e especialmente concebido para as condições climáticas e técnicas de Portugal, sendo distribuído pela LNEG (Laboratório Nacional de energia e Geologia). Foi concluído que coletores híbridos com células de silício monocristalino têm maior eficiência global, e eficiência térmica um pouco menor. Foi feita uma análise do tempo de retorno para o investimento, vendendo eletricidade para a rede, onde se obteve um menor tempo de retorno na edificação residencial, sendo mais atrativo economicamente.

Aste *et al.* (2016) estudaram um coletor híbrido PVT de água sem cobertura, através de uma metodologia de simulação, monitoramento e previsão. Eles desenvolveram um modelo matemático que objetivou analisar parâmetros que influenciam o desempenho do módulo, que não haviam sido testados ainda em bibliografias anteriores. Os autores observaram que nas seções superiores e inferiores do coletor PVT, o valor da temperatura permanece muito maior que

na parte central. Isto se deve a dois motivos principais: a conexão entre o absorvedor e a módulo fotovoltaico, que é feita mecanicamente, por duas braçadeiras, proporcionando uma melhor união apenas no centro; e as serpentinhas do coletor térmico estão a uma distância de cerca de 20 centímetros das bordas. A Fig. 4 ilustra melhor o coletor estudado. As diferenças de temperatura em função das regiões do módulo, que causam perdas elétricas, não foram consideradas no modelo de simulação estudado.

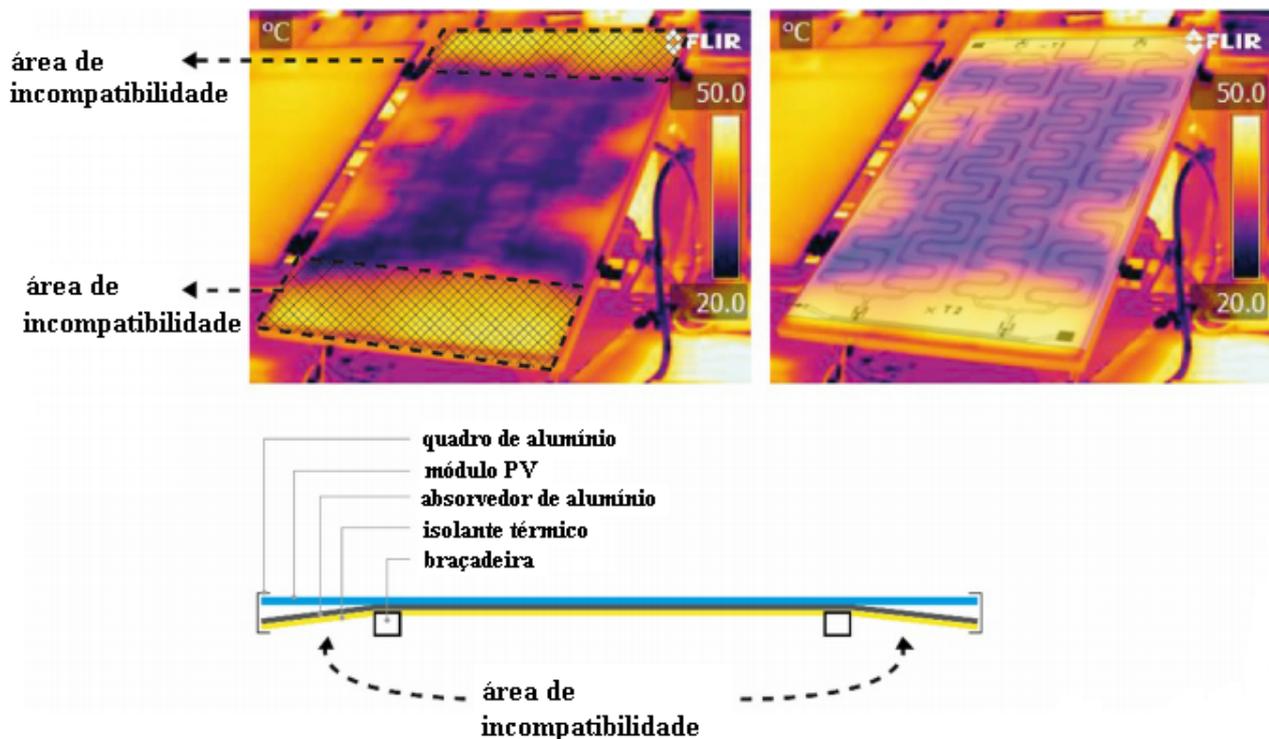


Figura 4 – Disposição e distribuição de temperatura do módulo PVT adaptada de Aste *et al.*(2016).

Os modelos matemáticos estudados por outros autores avaliam apenas a energia elétrica fornecida pelo módulo fotovoltaico, levando em consideração apenas a eficiência da célula, a radiação incidente na superfície, e o coeficiente de temperatura da tecnologia PV. Foi ressaltado que nenhum dos modelos avaliou outros fatores e perdas que afetam a eficiência do módulo PV, como a eficiência espectral, as perdas ópticas ou a troca de calor radiativo entre a cobertura e o céu, que não devem ser negligenciados, de acordo com Aste *et al.* (2016). Seu modelo foi feito no software TRNSYS, aplicado a três diferentes zonas climáticas europeias: continental (Paris), semicontinental (Milão), e mediterrâneo (Atenas). As eficiências totais foram de 32,7%, 36,1%, e 40,6%, respectivamente. As eficiências elétricas, pelo contrário, diminuíram ligeiramente, sendo de 13,7%, 13,6% e 13,4%, respectivamente.

Fan *et al.* (2017) desenvolveram um modelo dinâmico para um coletor térmico fotovoltaico híbrido com aquecedor solar por ar (PVT-SAH), com aletas longitudinais, objetivando a avaliação do potencial do sistema prover altas temperaturas de saída do módulo, em torno de 60 a 90 °C. Foi feito um método de discretização do sistema em um número de volumes de controle, equações de balanço de energia para cada volume de controle e implementação de solução numérica, pela técnica de volumes finitos Crank-Nicolson. Um modelo equivalente foi criado, para fins de comparação, em regime permanente, sendo a capacitância de calor negligenciada nas equações analisadas. O modelo dinâmico foi considerado não aplicável computacionalmente e uma variedade de cenários de projeto pode ser comparada para um design ótimo, como número de aletas e altura delas. Um equipamento de teste, situado no terraço do Prédio e Centro de Pesquisa Sustentável, na universidade de Wollongong, na Austrália, foi usado para validar o modelo, sob condição real. Foi observado que, quando calculado pelo modelo de regime permanente, a energia térmica tem seu valor superestimado em 35%, quando comparado com a de modelo dinâmico. Foi constatado também que conforme aumentam o número de aletas ou diminui a altura delas, as eficiências térmicas e elétricas aumentam.

Pauly *et al.* (2016) fizeram uma simulação numérica de um coletor solar híbrido térmico fotovoltaico a ar, usando o programa ANSYS FLUENT 14.5.0, de dinâmica dos fluidos computacional (CFD), para avaliação do comportamento térmico. Os resultados foram validados com resultados experimentais da literatura. Segundo os autores, a análise numérica do fluxo de transferência de calor em módulos PVT é bastante complicada, além de ter baixo número de trabalhos publicados a seu respeito. Usando o modelo verificado, foi feita uma otimização de efeito de taxa escoamento de massa e profundidade do duto na performance do módulo. Um novo projeto foi proposto, usando-se uma seção do duto cruzada variável, com o intuito de aumentar a eficiência total do módulo. Houve uma melhora de 20% no aproveitamento geral, quando comparado ao modelo convencional. Notou-se também, que quanto maior a taxa de

escoamento de ar, mais energia térmica é produzida. Por outro lado, quanto maior a profundidade do duto, menor a eficiência global do módulo PVT.

Khelifa *et al.* (2016) modelaram um módulo do tipo placa e tubo, a Fig. 5 mostra os sistemas fotovoltaico e térmico, separados e depois ligados, sendo um colado na superfície traseira do outro. O modelo matemático foi feito baseado em equações de balanço de energia escritas para vários nós do sistema, e foram acompanhadas equações diferenciais obtidas e resolvidas pelo método de diferenças finitas. O escoamento de fluido e transferência de calor no módulo foi estudado através do software ANSYS14, e o fenômeno de transferência de calor entre as células fotovoltaicas e o líquido refrigerador foi feito pelo software FLUENT. Foi feito um estudo experimental, com a finalidade de comparar os resultados das simulações, construindo-se um módulo na cidade de Ghardaia, na Argélia. O resultado obtido foi que a temperatura do painel fotovoltaico diminuiu significativamente (de 15 a 20%), devido ao fluxo de água através do coletor na parte traseira do módulo, variando entre 60 e 80 °C.



Figura 5 – Sistemas fotovoltaico e térmico, separados e ligados.

Huide *et al.* (2017) compararam os comportamentos de um módulo híbrido térmico fotovoltaico água com um fotovoltaico e outro solar térmico. Foi feita uma modelagem no programa *EnergyPlus*, para sistemas dinâmicos, e feitas simulações para as cidade de Hong Kong, Lhasa, Shanghai e Pequim. A energia térmica gerada pelo sistema solar foi usada apenas para aquecimento de água quente doméstica. Foram comparados espaços urbanos e rurais.

Buonomano *et al.* (2017) avaliaram um inovador sistema poligenizador baseado em módulos PVT integrado a prédios, com um resfriador de adsorção e sistema de armazenamento de eletricidade integrados, objetivando satisfazer todas as necessidades do prédio, em termos de aquecimento e resfriamento, pelo desenvolvimento de um modelo de simulação dinâmica, no ambiente TRNSYS. Foram comparados resultados das cidades de Torino, Florença, Napoli e Palermo. As energias primárias totais obtidas variaram de 59% em Torino, para 69% em Palermo. O tempo de retorno de investimento nos coletores menor foi em Torino (10,6 anos) e o maior em Palermo (11,3 anos).

Del Amo *et al.* (2017) validaram a modelagem em TRNSYS de um coletor PVT-ar, para uso em uma construção multi-residencial, e resolver as necessidades de aquecimento de água. Os módulos têm a particularidade da adição de uma cobertura de insolação transparente (TIC), com o objetivo de reduzir perdas de calor de sua parte frontal, que são compostas por uma camada de argônio em substituição ao ar. As TIC's melhoram a eficiência térmica de módulos à alta temperatura, e conseqüentemente realizam um melhor aproveitamento de energia por metro quadrado, através da diminuição das perdas convectivas da camada de ar entre a cobertura e o módulo PV. Comparando diferentes tipos de TIC's com um painel híbrido sem cobertura, nota-se uma melhora de três vezes da eficiência térmica. Foi feito o monitoramento real de uma construção em Zaragoza, na Espanha, a fim de validar o modelo proposto, que permitiu o cálculo da produção de calor e eletricidade e eficiência no sistema com um erro menor que 6.5%.

Em âmbito nacional, Tachon *et al.* (2016) calcularam e analisaram uma instalação com desempenho ideal em um sistema PVT em residências de baixa renda. Para isso, simulações de PVT com água como fluido de trabalho foram utilizadas no software TRNSYS, seguido por uma análise energética, de acordo com os quesitos mínimos previsto na norma brasileira e instalações de água quente, de 36 litros por pessoa por dia. A tecnologia PVT mostrou-se uma excelente opção para as residências. Dependendo da latitude, entre três e cinco coletores PVT por telhado são suficientes para satisfazer a demanda mensal de água quente e eletricidade. Os autores ainda afirmam que o sistema PVT produz de 4 a 8% mais eletricidade que o módulo fotovoltaico convencional.

Silva e Lima (2016) apresentaram um modelo numérico computacional feito com base em um protótipo de coletor solar PVT, implementado e simulado pelo software COMSOL Multiphysics 4.4. Foram comparados os resultados experimentais e numéricos da temperatura de saída e da vazão mássica do coletor, obtendo-se uma variação percentual

média de 4%. Uma análise paramétrica na geometria do coletor, após a validação do modelo numérico, mostrou que existe uma altura do duto ideal, em que há um ganho de eficiência térmica, sem grandes prejuízos na eficiência elétrica.

4. CONCLUSÕES

Este estudo apresentou trabalhos e artigos em que são feitos dimensionamentos e simulações computacionais de coletores híbridos térmico fotovoltaicos. Foi feita também uma breve descrição dos coletores, de acordo com suas características e fatores de projeto. Os sistemas de coletores solares térmicos e módulos fotovoltaicos são tecnologias consolidadas em pesquisas acadêmicas e também no mercado, sendo aceito por empresas e consumidores, tendo subsídios e apoio governamental. Porém, os coletores híbridos fotovoltaicos térmicos ainda precisam de reconhecimento e maior confiança nas vantagens do sistema, principalmente nos parâmetros que alteram a eficiência térmica. É importante continuar as pesquisas e obter coletores PVT viáveis comercialmente, em larga escala, sabendo prever a eficiência global para várias localidades e efeitos em longo prazo, para assim, conseguir controle de tempo de período de retorno do investimento.

Para se obter uma correta previsão de comportamento dos módulos, é de vital importância o conhecimento de todos os parâmetros, tanto climáticos, como os de projeto, de acordo com o tipo de coletor usado, para que os resultados sejam válidos para situações reais. Grande parte das publicações tenta validar um modelo matemático de acordo com o tipo de módulo híbrido estudado especificamente, e suas características. Não há um consenso sobre qual software de modelagem usar, uma vez que se pode analisar o módulo em programas de regime permanente, modelos dinâmicos ou do tipo mecânica dos fluidos computacional, sendo o modelo dinâmico o mais usado nos artigos pesquisados. O software que se mostrou mais apto a resolver problemas, com maior número de publicações, e pela possibilidade de uso foi o TRNSYS.

Os estudos em modelagem, em geral, tentam dentro de um nicho específico de módulo PVT, validar um modelo matemático próprio para seu caso, comparar com um estudo experimental, e prever resultados, aplicando diferentes variáveis no modelo numérico (clima, localização, materiais), e obtendo um resultado com o mínimo de erro possível. Estão sendo publicados, principalmente nos últimos dois anos, estudos na área de simulação e dimensionamento de coletores PVT em maior quantidade, mostrando que o tema despertou interesse da comunidade científica.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece o apoio financeiro, em bolsa de mestrado, por parte do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil (CNPQ).

REFERÊNCIAS

- Almeida, L., Oliveira, A., Study of a hybrid PV-Thermal solar system to provide electricity and heat in Portugal. *International Journal of Ambient Energy*, 10. pp. 153-161.
- del Amo, A., Martínez-Gracia, A., Bayod-Rújula, A. A., Antonanzas, J., 2017. An innovative urban energy system constituted by a photovoltaic/thermal hybrid solar installation: Design, simulation and monitoring. *Applied Energy*, 186. pp. 140-151.
- Aste, N., del Pero, C., Leonforte, F., Manfren, M., 2016. Performance monitoring and modelling of an uncovered photovoltaic-thermal (PVT) water collector. *Solar Energy*, 135. pp. 551-568.
- Browne, M. C., Norton, B., McCormack, S., 2015. Phase change materials for photovoltaic thermal management. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 43. pp. 762-782.
- Buonomano, A., Calise, F., Palombo, A., Vicidomini, M., 2017. Adsorption chiller operation by recovering low-temperature heat from building integrated photovoltaic thermal collectors: Modelling and simulation. *Energy Conversion and Management*, 149. pp. 1019-1036.
- Elbreki, A., Alghoul, M., Al-Shamani, A., Ammar, A., Yegani, B., Aboghrara, A., Rusaln, M., Sopian, K., 2016. The role of climatic-design-operational parameters on combined PV/T collector performance: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57 pp. 603–647.
- Fan, W., Kokogiannakis, G., Ma, Z. Cooper, P., 2017. Development of a dynamic model for a hybrid photovoltaic thermal collector – Solar air heater with fins. *Renewable Energy*, 101. pp. 816-834.
- Florschuetz, L., 1979. Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors. *Solar Energy*, 22. Pg. 361-366.
- Hottel H., Whillier, A., 1955. Evaluation of flat-plate solar collector performance. *Trans. Conf. Use Sol.*, 3.
- Huide, F., Xuxin, Z., Lei, M., Tao, Z. Qixing, W., Hongyuan, S., 2017. A comparative study on three types of solar utilization technologies for buildings: Photovoltaic, solar thermal and hybrid photovoltaic/thermal systems. *Energy Conversion and Management*, 140. pp. 1-13.
- Ji, J., He, H., Chow, T., Pei, G., He, W., Liu, K. 2009. Distributed dynamic modelling and experimental study of PV evaporator in a PV/T solar-assisted heat pump. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52. pp. 1365-1373.

- Kalogirou, S. A., Tripanagnostopoulos, Y., 2006. Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production. *Energy Conversion and Management*, 47, pp. 3368–3382.
- Khelifa, A., Touafek, K., Moussa, H., Tabet, I., 2016. Modelling and detailed study of hybrid photovoltaic thermal (PV/T) solar collector. *Solar Energy*, 135. pp. 169-176.
- Kutz, M., (2006). Heat Pipes, em *Mechanical Engineers' Handbook: Energy and Power*, Volume 4, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA.
- Pauly, L., Rekha, L., Vazhappilly, C., Melvinraj, C., 2016. Numerical Simulation for Solar Hybrid Photovoltaic Thermal Air Collector. *Procedia Technology*, 24. pp. 513-522.
- Tachon, L., Hipolito, H., Passos, J., 2016. Analysis and application of combined photovoltaics/thermal (PV/T) flat-plate collectors for low income residences in Brazil. VI CBENS – VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belo Horizonte.
- Tripagnostopoulos, Y., Souliotis, M., Battisti, R., Corrado, A., 2005. Energy, cost and LCA of PV and hybrid PV/T solar systems, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 13. pp. 235-250.
- Sathe, T. M., Dhoble, A. S., 2015. A review on recent advancements in photovoltaic thermal techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28. pp. 645-672.
- Silva, F. A. G., Lima, F. R. S., 2016. Análise numérica de um coletor solar híbrido de placa plana (PV-T) para produção de eletricidade e água quente. VI CBENS – VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belo Horizonte.
- Zondag, H. A., Vries, D., van Helden, W., van Zolingen, R. van Stinhoven, A., 2003. The yield of different combined PV-thermal collector designs. *Solar energy*, 72. pp. 353-365.
- Zondag, H. A., van Helden, W., Bakker, M., Affolter, P., Eisenmann, W., Fechner, H., Fechner, H.,..., Tripanagnostopoulos, Y., 2005. PVT Roadmap, a European Guide for the Development and Market Introduction of PV-Thermal technology. PV Catapult Project.

HYBRID PHOTOVOLTAIC THERMAL COLLECTOR (PVT): A REVIEW OF SIMULATIONS AND DESIGNS

Abstract. *Buildings need energy to their normal operation, that includes heat and electricity, and both are provide by solar systems. The hybrids photovoltaic thermal modules (PVT) have been enhancing prominence in the last decades, due to its energetic potential, and the collector consists in a simultaneous combination of a photovoltaic module and a solar thermal collector. The aggregation of the both technologies increases the efficiency of the system, decreases the use of materials, cost and the useful space. The design of the collectors, the development and validation of the mathematical models are important to the implementation of numerical solutions and parameters of project control, aiming at optimization of results. In this sense, the purposes of this work is collect and analyze works and articles that are made by computational simulations of hybrid photovoltaic solar thermal collectors, seeking an evaluation of the guidelines, trends, advances and techniques in research in the study area. A brief description of the collectors is also made, according to their characteristics and design factors. The results were satisfactory, showing a greater interest of the academic community in this subject. The main focus of the researches has been controlling design parameters and thermal efficiency improvement, and the type of simulation usually employed is the dynamic model.*

Key words: *Hybrid Photovoltaic Thermal Solar Collector, PVT Simulation, PVT Evaluation.*