

# SIMULAÇÃO DE VIABILIDADE ECONÔMICA E DESEMPENHO TÉRMICO DE TROCADOR DE CALOR PARA MÓDULO FOTOVOLTAICO

**Bruna de Oliveira Busson** – bruna.busson@yahoo.com.br

**Victor César Pigozzo Filho**

**Alexander Leyton Mopan**

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Instituto  
Avançado de Tecnologia e Inovação (IATI)

**Daniel Sottovia Gomide**

**Júlio César Passos**

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica

**Loic Tachon**

**Henrique Hipólito**

Soluz Energia

**Felipe Cardim de Araújo**

Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação (IATI)

**Mateus A. Gabiatti**

Engie Brasil Energia

## 4.7. PVT – Coletores e sistemas híbridos térmico-voltaicos: tecnologias e aplicações

**Resumo.** O Brasil ultrapassou 9 GW de potência operacional de painéis fotovoltaicos (FV) em 2021. As altas temperaturas de operação dos módulos que operam no país causam perda na eficiência de conversão FV. O objetivo do presente artigo é utilizar trocadores de calor de polipropileno (PP) de baixo custo e fácil instalação para converter módulos FV em fotovoltaico-térmico (FVT) para produzir tanto mais eletricidade como água quente para uso doméstico. A viabilidade econômica de um painel que combina módulos FV e FVT é investigada por meio do parâmetro tempo de retorno do investimento (TRI) que, por sua vez, foi estimado considerando a geração de eletricidade para diferentes regiões do Brasil por simulações no software TRNSYS. Um painel FV + FVT apresenta, em média, TRI 3,5% menor do que uma instalação que combina painel FV e coletores solar térmico (ST) e 28,5% menor do que o uso apenas do painel FV. Além disso, a área ocupada pelo painel FV + FVT é menor do que a área ocupada pelos outros dois cenários. Um balanço de energia implementado no software EES, validado por resultados experimentais mostrou em quais condições de operação o trocador de PP cumpre adequadamente a função de resfriar o módulo FVT, aquecendo a água, potencializando a geração FV. O uso de isolamento térmico sob o trocador de calor diminui as perdas térmicas por convecção e o controle da vazão a partir da temperatura de entrada da água nos minicanais paralelos garantem melhores desempenho térmico e elétrico do módulo FVT.

**Palavras-chave:** Módulo FVT, Viabilidade Econômica, Desempenho Térmico

## 1. INTRODUÇÃO

Diferentemente das fontes convencionais de energia, a energia solar é temporalmente intermitente e apresenta variabilidade espacial elevada. No Brasil encontra-se alto nível de irradiação solar e baixa variabilidade da mesma. A região Nordeste supera a irradiação solar média mensal dos países ibéricos e, além disso, apresenta menor variabilidade. Já a região Sul apresenta o menor nível de irradiação solar média mensal do país, que ainda assim, é superior à países como a Alemanha (Pereira *et al.*, 2017). Em 2021, o Brasil ultrapassou 9 GW de potência operacional de painéis fotovoltaicos (FV) instalados (ABSOLAR, 2021). Sendo que cerca de 86% das instalações geram eletricidade na própria unidade consumidora (Greener, 2021).

O aproveitamento da energia solar FV acontece a partir da conversão de radiação solar em potência elétrica por meio de células de material semicondutor com eficiência entre 14% e 22% (Blakesley *et al.*, 2020). A eficiência de conversão FV é inversamente proporcional à temperatura de operação da célula (Dubey *et al.*, 2013). Uma solução para contrastar esse fenômeno é a adoção de um sistema de arrefecimento de módulos FV para reduzir a perda de rendimento devido à alta temperatura da célula e à conversão de 80% da irradiação solar em calor (Zarrela *et al.*, 2019).

Também é possível utilizar o recurso solar na forma de calor, por isso é uma fonte tão promissora (Pinho e Galdino, 2014). Uma forma bastante comum de utilização da energia térmica da irradiação solar é através de coletores solares térmicos (ST) que aquecem água com eficiências entre 60% e 90%. A água quente gerada durante o período de incidência

da irradiação solar é armazenada em um reservatório térmico para posterior uso em diversas aplicações, tanto residenciais como industriais (Huide *et al.*, 2017).

Módulos fotovoltaico térmicos (FVT) baseados em água combinam a geração de eletricidade de módulos FV e fornecem água quente como coletores ST a partir da remoção de calor da parte posterior dos módulos FV (Huide *et al.*, 2017; Sultan e Efsan, 2018). Além de serem diferenciados entre si pelo tipo de fluido de trabalho, os módulos FVT são categorizados a partir do tipo de absorvedor que empregam. O absorvedor pode ser do tipo placa e tubo com dutos fixados sob a superfície inferior de uma chapa fixada no módulo FV ou do tipo completamente molhado com canais retangulares na superfície inferior do módulo, o que promove um aumento na área de troca de calor (Kim e Kim, 2012).

No entanto, o maior desafio envolvendo módulos FVT está no balanceamento entre a otimização das eficiências elétrica e térmica (Shyam *et al.*, 2015). As duas, por sua vez, aumentam com a elevação da vazão de água, pois a transferência de calor global para a água é melhorada e a eficiência elétrica também (Nasrin *et al.*, 2018). Além disso, a eficiência do FVT depende do tipo de fluido de trabalho, material das células, cobertura vítrea, padrão de escoamento e tipo de trocador de calor (Chow, 2010; Herrando *et al.*, 2019).

O presente artigo busca prever a viabilidade econômica de um novo conceito de trocador de calor capaz de transformar de forma simples um módulo FV em um módulo FVT a partir do acoplamento de um absorvedor completamente molhado composto por canais de polipropileno (PP) com perfil retangular (ver Fig. 1) sob o módulo FV. A principal vantagem desse novo conceito são a habilidade e a flexibilidade de converter um módulo FV em um FVT a baixo custo e fácil instalação em comparação a módulos FVT comercialmente disponíveis. As simulações quantificam a geração de eletricidade e de energia térmica para aquecer água para uso doméstico em quatro diferentes cenários. Por fim, é implementado um balanço energético do trocador de PP no *software Engineering Equation Solver (EES)* para estimar o seu comportamento térmico e a capacidade de transferir calor para a água circulante nos canais retangulares.

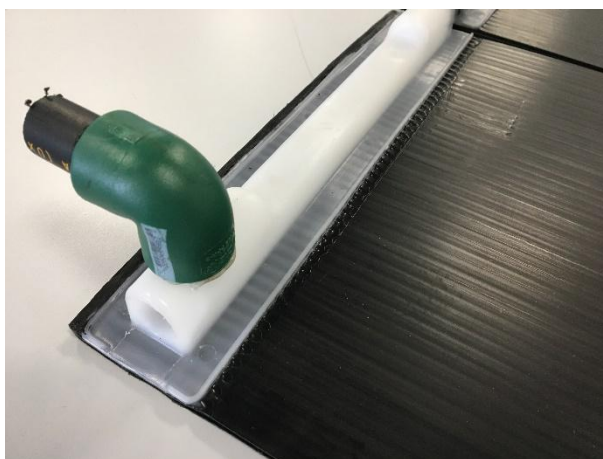


Figura 1 – Trocador de calor de PP.

## 2. METODOLOGIA

A metodologia é dividida em duas partes. Na primeira, são comparados quatro cenários diferentes de fornecimento de eletricidade e água quente para uma residência nas 5 regiões geográficas brasileiras. Um desses cenários possui um painel FVT cujo trocador de calor de PP é analisado na segunda parte da metodologia. A análise do desempenho térmico do trocador permite verificar sua capacidade de atender à proposta de retirar calor do módulo FV para aumentar sua eficiência de conversão e de aquecer a água para uso doméstico.

### 2.1 Viabilidade econômica dos painéis FV, FVT e coletores ST

Os quatro diferentes cenários, que fazem parte das simulações no *software TRNSYS*, estão instalados numa residência com 4 moradores, cujo consumo mensal de eletricidade da rede é de 700 kWh/mês e o consumo diário de água é de 100 litros/morador/dia na temperatura de 40 °C. O esquema simplificado dos quatro cenários detalhados pode ser visto na Fig. 2. O perfil de consumo de água quente é dividido em 30% entre 6:00 e 9:00 horas, 10% entre 11:00 e 13:00 horas e 60% entre 19:00 e 22:00 horas. As cidades brasileiras, que farão parte das simulações com seus respectivos Ano Meteorológico Típico (TMY) advindos da base de dados SWERA (SWERA, 2021), pertencem às 5 regiões: Belo Horizonte, Brasília, Florianópolis, Manaus, Recife, Salvador, Santa Maria e São Paulo.












| CENÁRIO   | CONSUMO   | FORNECIMENTO   |
|-----------|---|--|
| Cenário 1 |  |    |
| Cenário 2 |  |     |
| Cenário 3 |  |    |
| Cenário 4 |   |     |

Figura 2 – Esquema simplificado dos quatro cenários em estudo.

O Cenário 1 representa o consumo energético para aquecimento de água do chuveiro e demais consumos de equipamentos da residência (iluminação e utilização de diversos aparelhos domésticos) atendidas pela rede de distribuição de eletricidade. Este cenário será a referência do consumo de eletricidade exclusivo do chuveiro e o consumo das demais demandas da residência. Os resultados das simulações do Cenário 1 servirão de base para os dimensionamentos dos cenários seguintes.

O Cenário 2 possui um painel FV dimensionado para suprir mais de 90% da demanda de 8.400 kWh/ano da residência. Os módulos FV que compõem o painel são de 400W com eficiência de conversão FV de 18,11% e estão posicionados com inclinação igual à latitude local. Cada cidade que faz parte da simulação apresenta uma quantidade específica de módulos utilizados de acordo com o máximo de fração elétrica possível.

O Cenário 3 envolve uma combinação de painel FV e coletores ST para aquecimento de água. Também fazem parte deste cenário um reservatório térmico de 400 litros sem apoio elétrico e um chuveiro elétrico com controle de potência. O painel FV está projetado para suprir a demanda por eletricidade da residência mais o complemento da potência térmica não atendida pelos coletores ST. A instalação para água quente é dimensionada para alcançar uma fração solar térmica entre 80% e 90%, cujos coletores ST têm eficiência de 79,3% e estão posicionados com inclinação 10° a mais do que a latitude local.

O Cenário 4 possui módulos FV, FVT e reservatório térmico semelhante ao do Cenário 3. Os módulos FVT decorrem da aplicação do trocador de calor de PP na superfície posterior dos módulos FV já utilizados nas simulações dos cenários anteriores. A água circula dentro dos minicanais pelo acionamento de uma bomba conectada ao reservatório térmico. A bomba que aciona o fluxo de água consome menos de 2% da eletricidade gerada. Para definir a quantidade de trocadores, foram simuladas diferentes quantidades para uma mesma cidade até que a melhor escolha estivesse atrelada ao menor tempo de retorno do investimento (TRI). Antes de tudo, esse cenário deve suprir a demanda por eletricidade por meio de todo o painel FV + FVT.

Os valores obtidos pelo Cenário 4 servirão de base para justificar a aplicação do trocador de calor de PP por meio da viabilidade econômica que depende do TRI, do acréscimo anual de 8% no valor da eletricidade e da taxa mínima de atratividade (TMA) mensal de 0,73%, equivalente a 9,12% ao ano. Em todos os cenários e para todas as cidades, para fim dos cálculos realizados no presente trabalho, foram considerados apenas os custos com aquisição de equipamentos e instalação de sistemas, cujos valores vieram de cotações realizadas com fornecedores já atuantes no mercado brasileiro de energia solar, desconsiderando despesas com manutenção e reposição.

As simulações da Seção 2.2 verificarão o desempenho térmico do trocador e sua capacidade de cumprir o que estimou as simulações do Cenário 4 da Seção 2.1.

## 2.2 Balanço de energia de módulo FVT

Para caracterizar o desempenho térmico do trocador de calor de PP que tornará um módulo FV em um módulo FVT são realizadas simulações no *software* EES. A modelagem baseada no balanço de energia do módulo FVT é validada por uma bancada experimental localizada no laboratório LEPTEN da UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina).

A modelagem no EES representa o balanço de energia unidimensional do trocador de calor de PP em regime estacionário. As equações, que fazem parte desse balanço, advêm do balanço de energia entre os nós e representam a condução de calor entre as camadas, a convecção dentro dos canais e a convecção na superfície inferior de um módulo com trocador de calor como pode ser visto na Fig. 3.

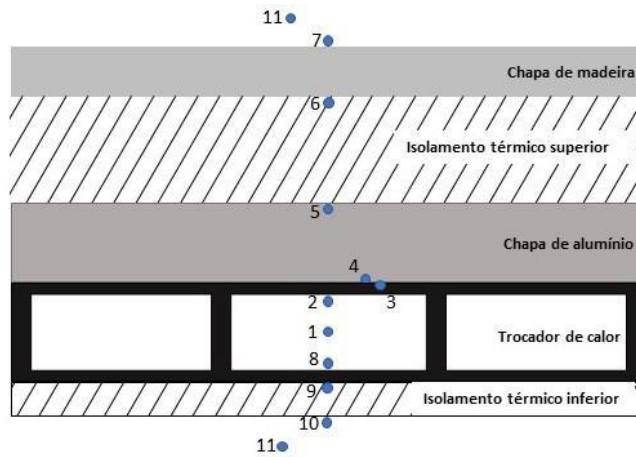


Figura 3 – Corte transversal da bancada do trocador de calor.

No nó 5 é aplicado um fluxo de calor representando a radiação solar atingindo a superfície do módulo FVT. Entre os nós 4 e 3 está a resistência térmica de contato entre a superfície traseira do módulo FV e a superfície superior do trocador de PP. Esse é um parâmetro de incerteza que terá simulações feitas para determinar seu valor. A água circula dentro dos canais retangulares para roubar o calor da superfície inferior do módulo. Uma parte desse calor ainda é transferida para a superfície posterior do trocador de calor por condução entre os nós 8 e 9. Caso não haja isolamento térmico, o calor que chegou ao nó 9 é em parte dissipado para o ambiente.

Dentro dos canais, por onde a água circula, determinou-se o coeficiente convectivo  $h_{28}$  a partir de um número de Nusselt, para duto retangular com escoamento laminar e fluxo de calor não uniforme, constante e igual a 3,73. O número de Reynolds dentro dos canais de PP varia entre 35 e 55. Já a convecção de calor na superfície inferior é uma combinação da convecção natural e forçada:

$$h_{1011} = (h_{1011,nat}^3 + h_{1011,for}^3)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

$$h_{1011,nat} = 1,78(T_{10} - T_{11})^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

$$h_{1011,for} = 2,8 + 3v \quad (3)$$

Onde  $h_{1011}$  é o coeficiente convectivo que ocorre na superfície inferior do módulo FVT, os subscritos “nat” e “for” representam a convecção natural e forçada respectivamente,  $T_{10}$  é a temperatura média da superfície posterior,  $T_{11}$  é a temperatura ambiente e  $v$  é a velocidade do vento.

A validação da modelagem unidimensional do módulo FV com trocador de calor de PP, ou seja, do módulo FVT com inclinação de  $32^\circ$  é realizada por comparação da simulação no *software* EES com resultados da bancada de testes (Fig. 4) composta por uma estrutura de apoio onde estão localizados os aquecedores elétricos, a placa de alumínio, o trocador de PP e o isolamento térmico. Os aquecedores elétricos aplicam um fluxo de calor sobre a placa metálica cuja função é distribuir uniformemente esse fluxo. Um banho termostático fornece a água na temperatura de entrada desejada. Uma bomba e uma válvula exercem a função de controle da vazão desse fluido.

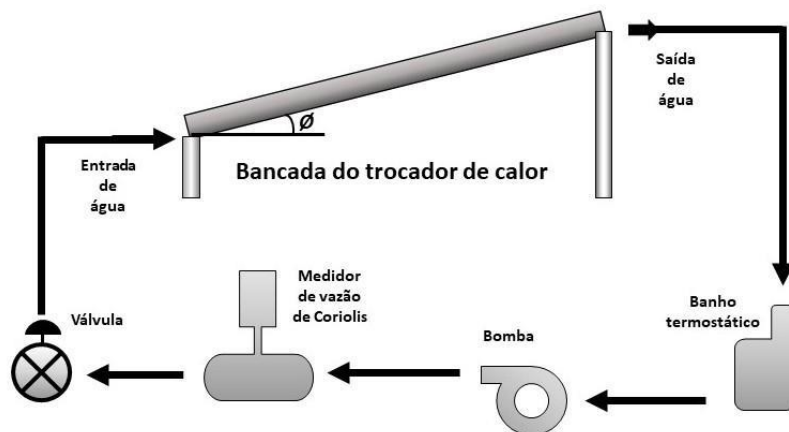


Figura 4 – Esquema da bancada experimental do trocador de calor de PP.

O trocador de calor que faz parte da bancada de testes tem 300 mm de largura e 1800 mm de comprimento, possui 44 canais retangulares com diâmetro hidráulico de 4,24 mm por onde circula uma vazão de água de 20 kg/h. Abaixo do trocador pode ser colocado um isolamento térmico de isopor com 30 mm de espessura para evitar que o calor absorvido pela água seja transferido ao ambiente.

A Tab. 1 apresenta algumas características dimensionais e físicas da bancada experimental cujos resultados servem como parâmetros para a modelagem desenvolvida no EES.

Tabela 1 – Características da bancada experimental.

| PROPRIEDADE                      | VALOR      |
|----------------------------------|------------|
| Condutividade do PP              | 0,21 W/mK  |
| Emissividade do PP               | 0,95       |
| Condutividade do isolamento      | 0,035 W/mK |
| Condutividade do alumínio        | 240 W/mK   |
| Espessura do isolamento superior | 50 mm      |
| Espessura da chapa de alumínio   | 15,88 mm   |
| Espessura da madeira de apoio    | 25 mm      |

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Análise da viabilidade econômica dos cenários

A Fig. 5 retrata os resultados obtidos para o Cenário 1 utilizando o TMY das cidades em estudo. O gráfico mostra a demanda de eletricidade residencial que é utilizada para aquecer água, o restante dos 700 kWh/mês é utilizado para os demais consumos de equipamentos da residência. O consumo de eletricidade para aquecer a água envolve a energia necessária para elevar a água que inicialmente está na temperatura ambiente até 40 °C. Como o padrão de consumo é o mesmo, no caso em estudo, é possível deduzir que as cidades localizadas em regiões mais frias do país dependem mais energia elétrica com chuveiros, chegando a representar até 45% do total de eletricidade da residência.

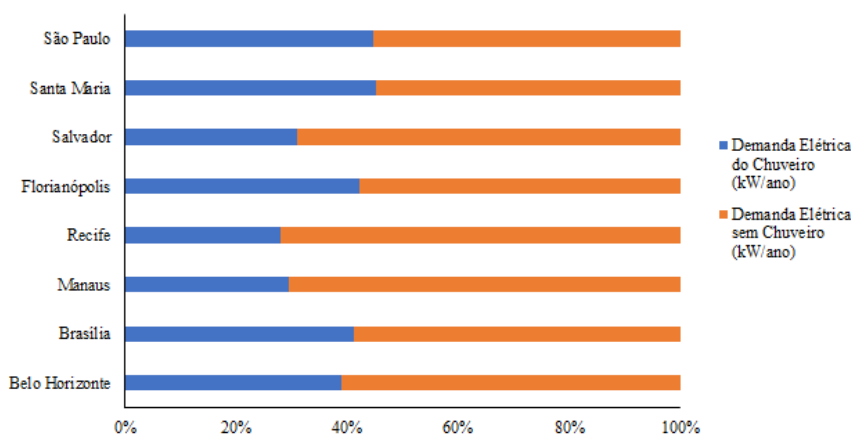


Figura 5 – Participação do consumo de eletricidade do chuveiro no consumo total da residência.

A Fig. 6(a) apresenta a fração solar elétrica anual atendida pelo painel FV em cada cidade do estudo. No topo das barras verticais azuis está a quantidade de módulos FV que fazem parte do sistema e que suprem pelo menos 90% das necessidades anuais de eletricidade da residência tanto com chuveiro elétrico como com demais atividades. Já a Fig. 6(b) mostra a quantidade de módulos que compõem o painel FV no topo das barras azuis, uma média de 87% de fração solar elétrica anual para o painel FV e de mais de 90% de fração solar térmica anual para os coletores ST. Em média, 94% da necessidade de água quente da residência conseguiu ser suprida pelos coletores ST, o número de módulos FV que compõem o painel reduziu consideravelmente.

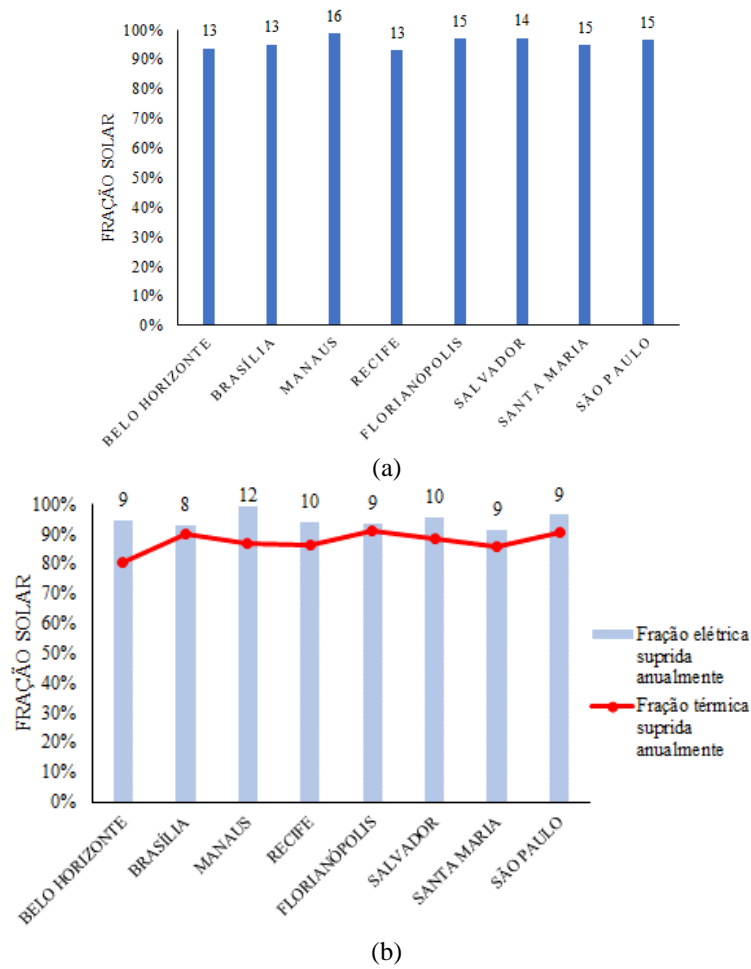


Figura 6 – Dimensionamento (a) do painel FV referente ao Cenário 2 e (b) da combinação entre painel FV e coletores ST referente ao Cenário 3.

A Tab. 2 apresenta a configuração final do painel que combina módulos FV e FVT (Cenário 4) após simulações realizadas com o uso de 1 a 4 módulos FVT para cada cidade do estudo. A quantidade de módulos FVT corresponde à quantidade de módulos FV que tiveram o trocador de calor de PP fixado. A configuração mostrada na Tab. 2 foi definida seguindo o critério de menor TRI obtido para cada cidade. Em relação ao sistema FV do Cenário 2, a área ocupada pelo conjunto FV + FVT do Cenário 4 reduziu, em média, entre as cidades avaliadas, a área ocupada em 24%. Em comparação com o sistema do Cenário 3, houve, em média, uma redução de 14,6% na área ocupada pelo sistema completo FV + FVT em relação ao conjunto completo FV + ST. Provavelmente, a menor necessidade de módulos compondo o painel FV + FVT deve-se aos ganhos na eficiência de conversão FV quando os módulos FVT são resfriados pela água, que passa pelo trocador de calor para posterior consumo doméstico. O ganho térmico com o aquecimento da água no módulo FVT diminui a necessidade de utilização do chuveiro elétrico, diminuindo também a quantidade de módulos FV que são utilizados para um possível acionamento do chuveiro elétrico.

Tabela 2 – Quantidade definida de módulos FV e FVT para cada cidade segundo critério de menor TRI.

| CIDADE         | MÓDULOS FV | MÓDULOS FVT |
|----------------|------------|-------------|
| Belo Horizonte | 9          | 2           |
| Brasília       | 8          | 3           |
| Manaus         | 12         | 2           |
| Recife         | 10         | 2           |
| Florianópolis  | 10         | 3           |
| Salvador       | 10         | 2           |
| Santa Maria    | 10         | 3           |
| São Paulo      | 10         | 3           |

Sendo os resultados obtidos para o Cenário 1 da Fig. 5 a referência e conhecendo o investimento inicial para aquisição dos sistemas, o TRI dos outros três cenários foram obtidos e estão dispostos na Tab. 3 para cada cidade. A área ocupada por cada configuração também é apresentada.

Tabela 3 – TRI (em anos) e área ocupada pelo painel FV, painel FV + coletores ST e painel FV + FVT.

| CIDADE         | CENÁRIO 2 |                      | CENÁRIO 3 |                      | CENÁRIO 4 |                      |
|----------------|-----------|----------------------|-----------|----------------------|-----------|----------------------|
|                | TRI       | ÁREA                 | TRI       | ÁREA                 | TRI       | ÁREA                 |
| Belo Horizonte | 6,42      | 30,94 m <sup>2</sup> | 4,58      | 22,89 m <sup>2</sup> | 4,42      | 19,89 m <sup>2</sup> |
| Brasília       | 6,25      | 30,94 m <sup>2</sup> | 4,50      | 22,39 m <sup>2</sup> | 4,25      | 17,68 m <sup>2</sup> |
| Manaus         | 7,00      | 35,36 m <sup>2</sup> | 5,58      | 28,52 m <sup>2</sup> | 5,42      | 26,52 m <sup>2</sup> |
| Recife         | 6,50      | 30,94 m <sup>2</sup> | 5,00      | 25,81 m <sup>2</sup> | 4,83      | 22,10 m <sup>2</sup> |
| Florianópolis  | 7,00      | 35,36 m <sup>2</sup> | 5,08      | 26,60 m <sup>2</sup> | 4,92      | 22,10 m <sup>2</sup> |
| Salvador       | 6,67      | 33,15 m <sup>2</sup> | 5,08      | 26,31 m <sup>2</sup> | 4,83      | 22,10 m <sup>2</sup> |
| Santa Maria    | 7,00      | 35,36 m <sup>2</sup> | 5,17      | 27,10 m <sup>2</sup> | 5,00      | 22,10 m <sup>2</sup> |
| São Paulo      | 7,00      | 35,36 m <sup>2</sup> | 4,92      | 24,39 m <sup>2</sup> | 4,83      | 22,10 m <sup>2</sup> |

Em relação ao Cenário 2, o Cenário 3 apresentou, em média, uma redução de 23,7% na área ocupada pelo conjunto FV + ST e de 28,5% no TRI. Já o Cenário 4 em relação ao 3 obteve uma redução média de 14,6% na área ocupada pelo conjunto FV + FVT e de 3,5% no TRI. Pelo menos os valores obtidos para o TRI e a área ocupada pelo sistema na residência mostram que a utilização do trocador de calor de PP, cuja instalação e aquisição têm baixo custo, mostra-se interessante.

O Cenário 4 apresenta TRI atrativo tanto comparado ao Cenário 2 como ao Cenário 3, sem contar que o trocador de calor de PP é de simples instalação, mais barato do que um coletor ST e ocupa o espaço de um módulo FV já previamente instalado não necessitando, assim, de uma área extra. As simulações de custo do investimento inicial do sistema FV + FVT ficaram entre R\$ 21.000,00 e R\$ 30.000,00 que foi, em média, 5,1% e 14,6% menor do que os custos para os sistemas FV + ST e somente FV, respectivamente. O custo do investimento inicial leva em consideração os gastos com aquisição de equipamentos e dispositivos e com instalação, desconsiderando despesas com manutenção e reposição.

A Subseção 3.2 apresentará simulações que analisam o comportamento térmico de um módulo FVT que possui um trocador de calor de PP.

### 3.2 Análise do desempenho térmico do trocador de calor de PP

O balanço de energia determinado a partir das resistências térmicas que unem os pontos presentes na Fig. 3 apresenta a resistência térmica de contato como parâmetro influente nas simulações e que é obtido por comparação com os resultados experimentais da bancada de testes da Fig. 4. Com a medição das temperaturas e do fluxo de calor obteve-se o valor de 0,008 m<sup>2</sup>K/W para a resistência térmica de contato.

Como o objetivo é determinar a capacidade do trocador de PP de retirar calor do módulo FVT e transferir para a água dentro dos canais, é relevante observar a Fig. 7 e fazer comparações entre o que a modelagem estima para o fluxo de calor absorvido pela água e o que a bancada de teste mostra por meio das medições. Os pontos do gráfico da Fig. 7 foram colhidos variando a velocidade do vento de 0 m/s a 2 m/s. Nesse gráfico, as barras de erro representam a incerteza expandida que está associada com as incertezas de medição da temperatura de 1% e da vazão de 1% também. Os valores negativos da Fig. 7 devem-se ao fluido com temperatura alta o suficiente para perder mais calor para o ambiente do que absorver da superfície posterior do módulo FVT.

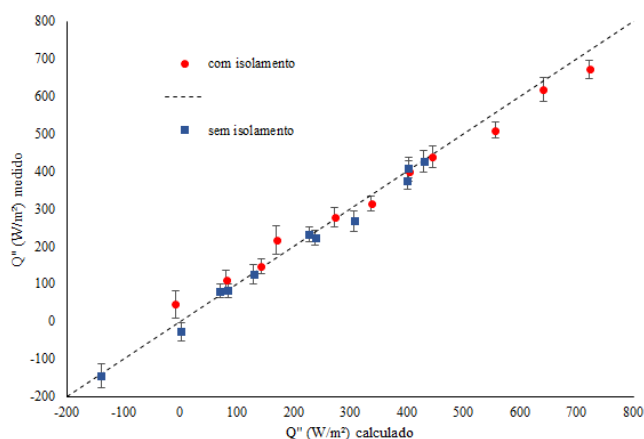


Figura 7 – Fluxo de calor medido e calculado transferido para a água circulante.

A Fig. 8 analisa o efeito da aplicação do isolamento térmico sob o trocador de calor de PP através da simulação no EES com fluxo de calor de 400 W/m<sup>2</sup> aplicado na superfície 4 (Fig. 3). Sem o isolamento, conforme a velocidade do vento aumenta, mais calor é perdido por convecção e, portanto, menos calor é absorvido pela água o que diminui o

desempenho do trocador. Contudo, com o isolamento térmico o efeito da velocidade do vento nas perdas térmicas da água é negligenciável. A temperatura de entrada da água também influencia na performance do trocador. Quanto maior a diferença entre as temperaturas da água e ambiente pior a performance, pois o fluido acaba perdendo em parte a capacidade de absorção de calor devido às maiores perdas térmicas para o ambiente.

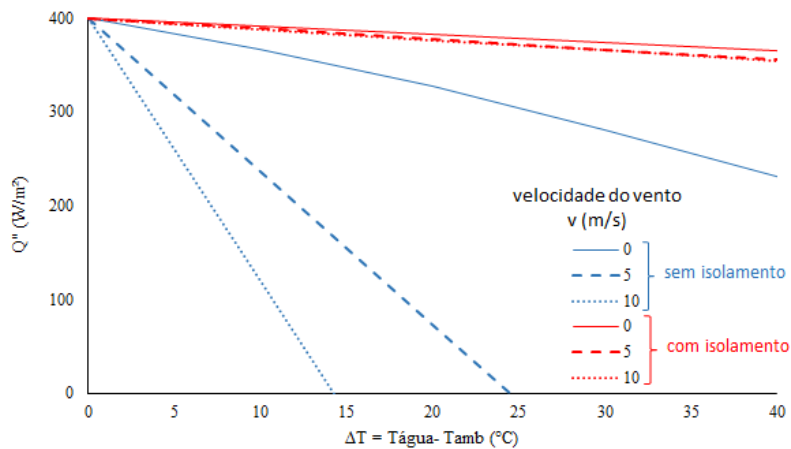


Figura 8 – Efeito do vento no acúmulo de calor na água.

As curvas da Fig. 8 mostram, por meio das simulações, que a performance do trocador de PP na prática vai depender da temperatura da água e do isolamento térmico. Então, para que os resultados obtidos na Tab. 3 sejam replicados em instalações reais é importante que seja usado isolamento térmico e que o acionamento da bomba de circulação de água seja realizado com base na temperatura de entrada da mesma, que circula pelos canais retangulares do trocador de calor, seja controlado. Mas não somente o efeito térmico do trocador interessa, também a melhora na geração elétrica do módulo FVT em relação ao FV.

As linhas da Fig. 9 comparam os resultados da simulação no EES para a geração do módulo FV com a do módulo FVT com três diferentes temperaturas de entrada da água e velocidade do vento constante de 1 m/s. Se a temperatura da água na entrada for de 25°C, semelhante à temperatura ambiente, há uma melhoria na eficiência de conversão FV e, assim, o módulo FVT gera, em média, 5% mais do que o módulo FV. Quando a temperatura da água é de 45°C, não há diferença entre a geração dos dois módulos. A 45°C, a geração elétrica do FVT e do FV são semelhantes. Já quando a temperatura de entrada da água atinge 60°C, a produção do módulo FV é 7% maior do que a do módulo FVT.

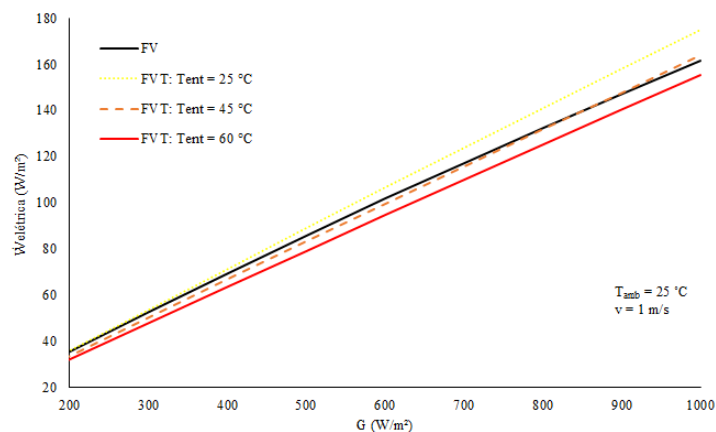


Figura 9 – Geração de eletricidade de módulos FV e FVT para diferentes temperaturas de entrada da água.

#### 4. CONCLUSÕES

O presente artigo dividiu-se em duas etapas. A primeira buscou analisar por meio de simulações no *software* TRNSYS a viabilidade econômica na instalação de módulos FVT com trocador de calor de PP para atender à demanda por água quente e eletricidade de residências. A segunda etapa analisou o comportamento térmico do trocador de calor e quais as suas condições ideais de operação. Esse trocador é de baixo custo e simples instalação e transforma módulos FV em módulos FVT.



A produção de eletricidade e água quente dos quatro cenários analisados para 8 cidades brasileiras juntamente com o investimento inicial do projeto foram a base do cálculo do TRI. O Cenário 1 cuja demanda residencial era completamente suprida pela rede comum de distribuição de eletricidade foi a referência de configuração a superar. O Cenário 4 que combina módulos FV e FVT rendeu o menor TRI com 4,8 anos de média e a menor área ocupada pela instalação com 21,8 m<sup>2</sup>, em média, seguido pelo Cenário 3 que combinava painel FV e coletores ST.

Como a água que circula pelos canais retangulares do trocador de PP retira calor do módulo causando redução na temperatura de operação FV, a eficiência de conversão FV aumenta gerando, assim, mais energia elétrica. A água aquecida pode então atender, pelo menos, em parte a demanda por água quente da residência. Dessa forma reduz-se o consumo elétrico do chuveiro, logo a demanda por eletricidade diminui e a quantidade de módulos necessários para suprir a demanda energética da residência também diminui.

A comparação entre os resultados experimentais da bancada de testes e calculados pelo balanço de energia no *software* EES previu que a resistência térmica de contato entre a superfície inferior do módulo FVT e o trocador de calor é de 0,008 m<sup>2</sup>K/W. Os experimentos serviram para validar o modelo desenvolvido no EES.

A temperatura de entrada da água no módulo FVT é a principal influência na temperatura do próprio módulo FVT. Se a temperatura da água for superior a 60 °C, a produção elétrica diminui, mas se a temperatura da água for próxima à do ambiente a geração aumenta. Quando a água entra a uma temperatura inferior à do módulo, consegue intensificar a troca térmica com este, diminuindo sua temperatura, aumentando sua eficiência de conversão FV e, conseqüentemente, a geração de eletricidade.

A presença de isolamento térmico também influencia no comportamento térmico do trocador de calor de PP. Sem isolamento há maior perda de calor por convecção na superfície inferior do trocador. Assim, menos calor é acumulado pela água devido à ação do vento.

### Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido no Projeto P&D PD 00403 0049/2020 financiado pelo Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e Engie Brasil Energia S. A. Os autores agradecem aos financiadores ANEEL e Engie e ao laboratório LEPTEN da UFSC, ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (POSMEC/UFSC), ao Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação (IATI) e à Soluz Energia.

### REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), 2021. Energia Solar Fotovoltaica no Brasil - Infográfico ABSOLAR. Agosto/2021. Edição n° 34. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/wp-content/uploads/2021/08/2021.08.09-Infografico-ABSOLAR-no-34.pdf>>. Acesso em: 23 de agosto de 2021.
- Blakesley, J. C., Huld, T., Müllejans, H., Gracia-Amillo, A., Friesen, G., Betts, T. R., Hermann, W., 2020. Accuracy, cost and sensitivity analysis of PV energy rating, *Solar Energy*, vol. 203, pp. 91–100.
- Chow, T. T., 2010. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology, *Applied Energy*, vol. 87, n. 2, pp. 365–379.
- Dubey, S., Sarvaiya, J. N., Seshadri, B., 2013. Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world - A review, *Energy Procedia*, vol. 33, pp. 311–321.
- Greener, 2021. Estudo Estratégico Geração Distribuída: Mercado Fotovoltaico. Disponível em: <[greener.com.br/estudo/estudo-estrategico-mercado-fotovoltaico-de-geracao-distribuida-1- semestre-de-2021/](https://greener.com.br/estudo/estudo-estrategico-mercado-fotovoltaico-de-geracao-distribuida-1- semestre-de-2021/)>. Acesso em: 20 de setembro de 2021.
- Herrando, M., Ramos, A., Zabalza, I., Markides, C. N., 2019. A comprehensive assessment of alternative absorber-exchanger designs for hybrid PVT-water collectors, *Applied Energy*, vol. 235, pp. 1583–1602.
- Huide, F., Xuxin, Z., Ei, 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*, vol. 140, pp. 1–13.
- Kim, J. H., Kim, J. T., 2012. The experimental performance of an unglazed PV-thermal collector with a fully wetted absorber, *Energy Procedia*, vol. 30, pp. 144–151.
- Nasrin, R., Hasanuzzaman, M., Rahim, N. A., 2018. Effect of high irradiation and cooling on power, energy and performance of a PVT system, *Renewable Energy*, vol. 116, pp. 552–569.
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Costa, R. S., Lima, F. J. L., Rüther, R., Abreu, S. L., Tiepolo, G. M., Pereira, S. V., Souza, J. G., 2017. Atlas Brasileiro de Energia Solar, INPE.
- Pinho, J. T., Galdino, M. A., 2014. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos, CEPPEL- CRESESB.
- Shyam, Tiwari, G. N., Al-Helal, I. M., 2015. Analytical expression of temperature dependent electrical efficiency of N-PVT water collectors connected in series, *Solar Energy*, vol. 114, pp. 61–76.
- Sultan, S. M., Efzan, M. N. E., 2018. Review on recent Photovoltaic/Thermal (PV/T) technology advances and applications, *Solar Energy*, vol. 173, pp. 939–954.

- Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA), 2021. TMY. Disponível em: <[https://openei.org/wiki/Solar\\_and\\_Wind\\_Energy\\_Resource\\_Assessment\\_\(SWERA\)](https://openei.org/wiki/Solar_and_Wind_Energy_Resource_Assessment_(SWERA))>. Acesso em: 20 de agosto de 2021.
- Zarrella, A., Emmi, G., Vivian, J., Croci, L., Besagni, G., 2019. The validation of a novel lumped parameter model for photovoltaic thermal hybrid solar collectors: a new TRNSYS type, Energy Conversion and Management, vol. 188, pp. 414–428.

## **ECONOMIC FEASIBILITY AND THERMAL PERFORMANCE SIMULATIONS OF A HEAT EXCHANGER FOR PHOTOVOLTAIC MODULE**

**Abstract.** *Brazil has overtaken 9 GW of photovoltaic (PV) operational power in 2021. The high PV module operating temperatures of modules operating in this country cause a loss in PV conversion efficiency. The goal of this article is to apply a low cost, easy to install polypropylene (PP) heat exchangers that converts PV modules into photovoltaic-thermal (PVT) modules to produce electricity and hot water for domestic use. The economic feasibility of a panel that combines PV and PVT modules is investigated by return on investment parameter (ROI) which, in turn, was calculated based on the estimated electricity generation for different regions of Brazil by simulations in TRNSYS software. A PV + PVT panel has, on average, a TRI 3.8% lower than an installation that combines PV panel and solar thermal collectors (ST) and 26% lower than only PV panel. Furthermore, the area occupied by PV + PVT panel is smaller than the area occupied by the other two scenarios. The energy balance implemented in the EES software validates by experimental results verified what operating conditions do PP exchanger adequately fulfills the function of removing heat from PVT module, transferring it to the water and improving the PV generation. The use of thermal insulation under the heat exchanger prevents convection losses and the control of flow rate based on water inlet temperature in the minichannels ensure better thermal and electrical performance of the PVT module.*

**Key words:** *PVT Module, Economic Feasibility, Thermal Performance*