

## ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DE UM COLETOR SOLAR PVT POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA COM BASE NO MAPA SOLARIMÉTRICO DE MINAS GERAIS

Geisiane Aparecida de Lima(\*), Fábio Moreira Teixeira, Marcos Vinícius da Silva, Rudolf Huebner, Lucas Paglioni Pataro Faria

\* Universidade Federal de Minas Gerais (lima.geisiane@yahoo.com.br)

### RESUMO

A energia solar é uma fonte inesgotável, limpa e renovável. Assim, é considerada uma alternativa energética promissora para diversificação da matriz energética mundial e redução dos impactos ambientais causados pelas fontes mais utilizadas na atualidade. A energia solar possui aplicação térmica, ligada diretamente aos sistemas de aquecimento de fluidos, principalmente água, e fotovoltaica que se baseia na conversão da radiação solar em eletricidade. Outra aplicação em desenvolvimento são os dispositivos com acoplamento de ambos sistemas citados, com geração simultânea de energia térmica e elétrica, conhecido como sistema PVT que será aprofundada no presente trabalho. Um dos meios disponíveis para análise de desempenho das placas solares, e também de outros sistemas de transferência de calor e mecânica dos fluidos, é feito por simulação numérica através de softwares que simulam o comportamento da temperatura e dos fluidos por meio de equações e condições de contorno que alimentam o sistema. Nesse contexto, o presente artigo apresenta o desempenho de um sistema PVT por meio de simulação numérica realizada no software ANSYS-CFX® 15.0 usando as informações de radiação fornecidas pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) através do Atlas Solarimétrico de Minas Gerais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia Solar, Radiação, Simulação numérica.

### INTRODUÇÃO

Atualmente, a busca por energias alternativas tem se tornado uma crescente demanda devido à crise energética e minimização dos impactos ambientais, principalmente no que se diz respeito às mudanças climáticas. Uma dessas alternativas viáveis é o fomento de pesquisas para o desenvolvimento e aplicação da energia solar.

Os meios mais comuns para aproveitamento da energia solar que se apresentam acessíveis no mercado são os sistemas térmicos, por meio de placas planas, empregados no aquecimento de um fluido pelo mecanismo de trocadores de calor e as placas fotovoltaicas para geração de eletricidade. Segundo Lopez (2012), os sistemas fotovoltaicos conectados à rede representaram, nos anos recentes, a tecnologia de geração com maior crescimento no mundo. No sistema fotovoltaico, apenas uma pequena parte da radiação incidente sobre a placa é convertida em eletricidade, cerca de 10 a 20% dependendo do material das células fotovoltaicas. O restante da radiação pode ser refletida ou transformada em calor ocasionando um inevitável aquecimento desse sistema resultando na queda de sua eficiência.

Um meio para minimizar essa queda na eficiência é acoplar ao sistema fotovoltaico, um sistema térmico para troca de calor entre a placa e um fluido, aqui sendo utilizado a água, mecanismo conhecido como PVT -*Photovoltaic-Thermal solar system*. Segundo Chow, Tiwari e Menezo (2012), os primeiros estudos teóricos e experimentais do PVT foram documentados em meados de 1970, mas só nos últimos anos que esse mecanismo tem ganhado atenção no setor da energia solar, sendo considerada uma tecnologia promissora. De acordo com Magliavacca (2013), a combinação dos sistemas térmicos e fotovoltaicos promove uma geração combinada de energia, resultando na obtenção de eletricidade e aquecimento de água, o que resulta em maior eficiência de conversão energética na mesma área de captação, minimizando assim a área de instalação.

Visto isso, o objetivo do trabalho é trazer ao conhecimento essa vertente da energia solar, o sistema PVT, e analisar seu desempenho por meio de modelagem computacional, utilizando como condição de contorno, valores estimados da radiação incidente na cidade de Belo Horizonte das estações do ano e assim apontar em qual época o dispositivo em estudo apresenta maior eficiência.

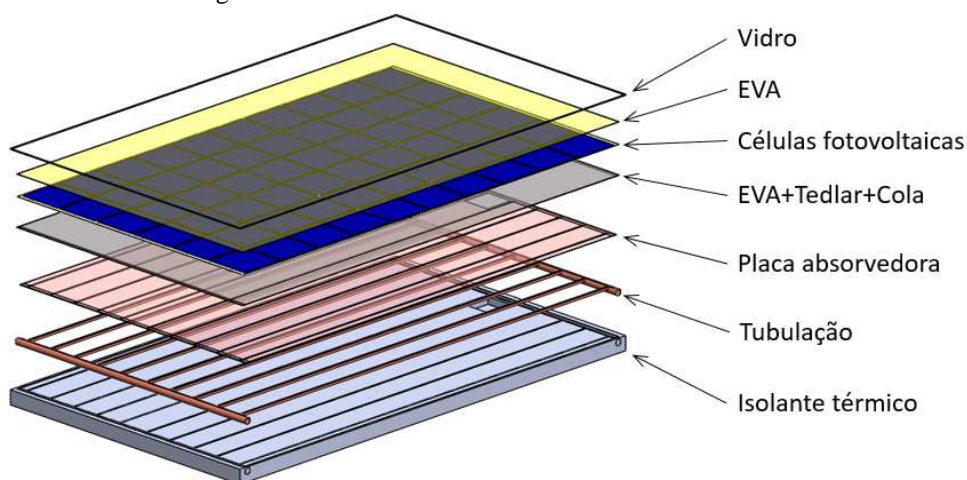
## METODOLOGIA

Os dados gerais inerentes ao sistema PVT, bem como seu desenvolvimento foram obtidos por meio de metanálise. Logo, os dados referentes a solarimetria do município de Belo Horizonte foram extraídos do Mapa Solarimétrico do Estado de Minas Gerais, elaborado pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) no ano de 2012, sendo utilizado os valores médios de radiação solar agrupados cada três meses, uma vez que o mapa dispõe de valores mensais conforme tabela 1.

**Tabela 1: Dados estimados de radiação solar em Belo Horizonte - Fonte: CEMIG, 2012.**

Mês	Radiação (W/m <sup>2</sup> )	Radiação para Simulação (W/m <sup>2</sup> )
Janeiro	1084,746	902,8
Fevereiro	890,411	
Março	733,3333	
Abril	740,2597	609,5
Maió	559,5238	
Junho	528,7356	
Julho	528,0899	710,5
Agosto	647,7273	
Setembro	955,8824	
Outubro	1015,625	1113,2
Novembro	1140,351	
Dezembro	1183,673	

Para a realização das simulações numéricas, utilizou-se o sistema SOLIDWORKS® para obtenção da geometria baseada no modelo de coletor solar plano tipo tubo aleta adaptado para inclusão de um painel fotovoltaico em sua parte superior, conforme é ilustrado na Figura 1.



**Figura 1: Modelo tridimensional do sistema PVT. Fonte: Autores do Trabalho.**

Posteriormente, essa geometria foi importada para o software ANSYS-CFX® 15.0 para geração da malha, como mostrado na figura 2, configuração dos materiais e domínios, inserção das condições de contorno e assim submeter o protótipo à simulação e subsequente análise de desempenho energético do sistema em regime permanente.

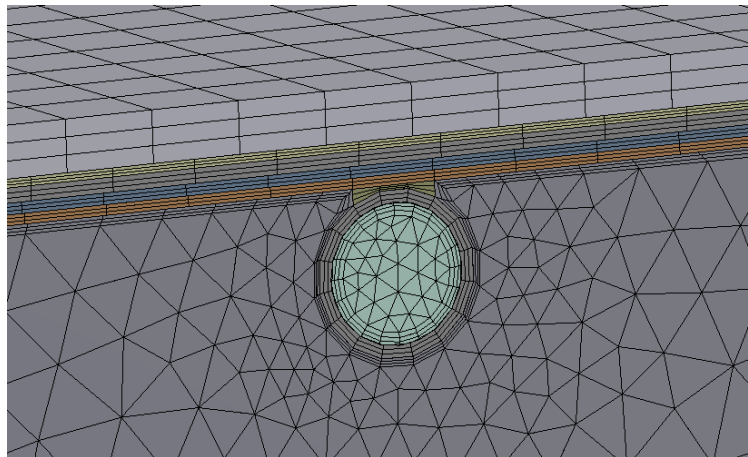


Figura 2: Detalhe da malha. Fonte: Autores do Trabalho.

Para inicialização da simulação, o software necessita ser alimentado com algumas condições de contorno que influenciam diretamente no desempenho da simulação e conseqüentemente na eficiência da placa solar em estudo, além dos dados da radiação solar. Tais condições são descritas na tabela 2.

Tabela 2: Condições de contorno adotados para simulação numérica. Fonte: Autores do Trabalho.

Inclinação do coletor	30°
Vazão da água	0,02 kg/s
Velocidade do vento	2 m/s
Temperatura ambiente	25°C
Área coletora	1,65 m <sup>2</sup>

Para determinação das eficiências térmica e elétrica do coletor tipo PVT, foi aplicado as equações 1 e 2 conforme Zondag et. al. (2003) e Evans et. al. (1975), respectivamente.

$$\eta_{th} \equiv \dot{m} \frac{c(T_{out} - T_{in})}{G} \quad \text{equação (1)}$$

$$\eta_{el} = \eta_{ref} [1 - (\beta_{ref} (T_{cel} - T_{ref}))] \quad \text{equação (2)}$$

Onde:

$\beta_{ref}$  = coeficiente de decréscimo da eficiência por aumento unitário de temperatura;

$c$  = capacidade térmica da água à temperatura média;

$G$  = radiação;

$\dot{m}$  = vazão mássica;

$\eta_{th}$  = eficiência térmica;

$\eta_{el}$  = eficiência elétrica;

$\eta_{ref}$  = eficiência elétrica nas condições padrões de teste do fabricante;

$T_{cel}$  = temperatura média das células;

$T_{in}$  = temperatura de entrada da água;

$T_{out}$  = temperatura de saída da água;

$T_{ref}$  = temperatura das células nas condições padrões de teste do fabricante.

Para melhor compreensão dos resultados, os valores de eficiência são apresentados por meio de gráficos em função da temperatura reduzida, segundo Zondag(2003), definida pela equação 3.

$$T_{red} \equiv \frac{T_{in} - T_{out}}{G} \quad \text{equação (3)}$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização da simulação numérica, foi obtido o perfil de temperatura das células fotovoltaicas e do coletor de uma forma geral. As figuras 3 e 4 mostram esse perfil de temperaturas para a condição simulada com  $G= 902,8 \text{ W/m}^2$  e  $T_{in}=25^\circ\text{C}$ .

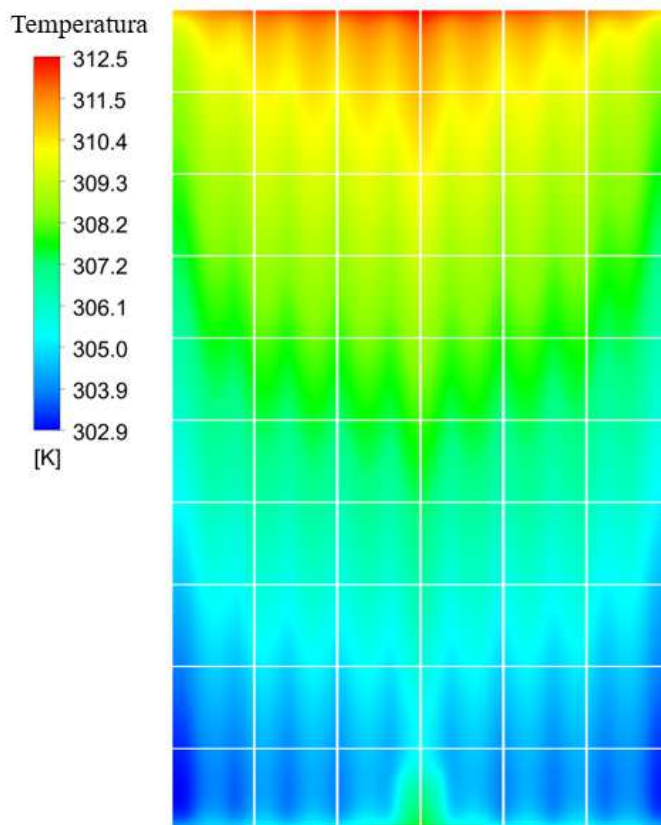


Figura 3: Perfil de temperatura das células fotovoltaicas. Fonte: Autores do Trabalho.

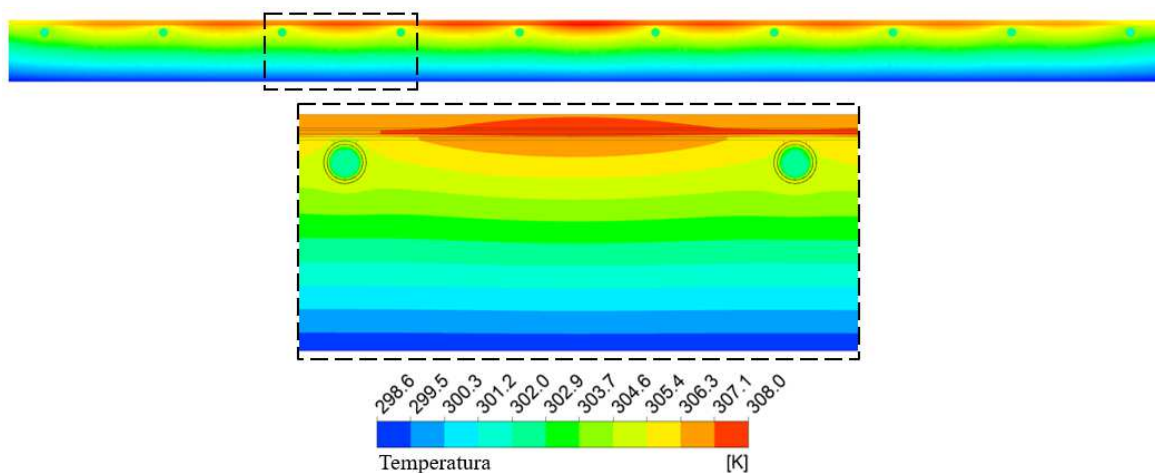


Figura 4: Perfil de temperatura da seção central do PVT. Fonte: Autores do Trabalho.

A partir das temperaturas obtidas, construiu-se a tabela 3 e os gráficos 1 e 2 que mostram as eficiências térmicas e elétricas, respectivamente, para cada condição simulada.

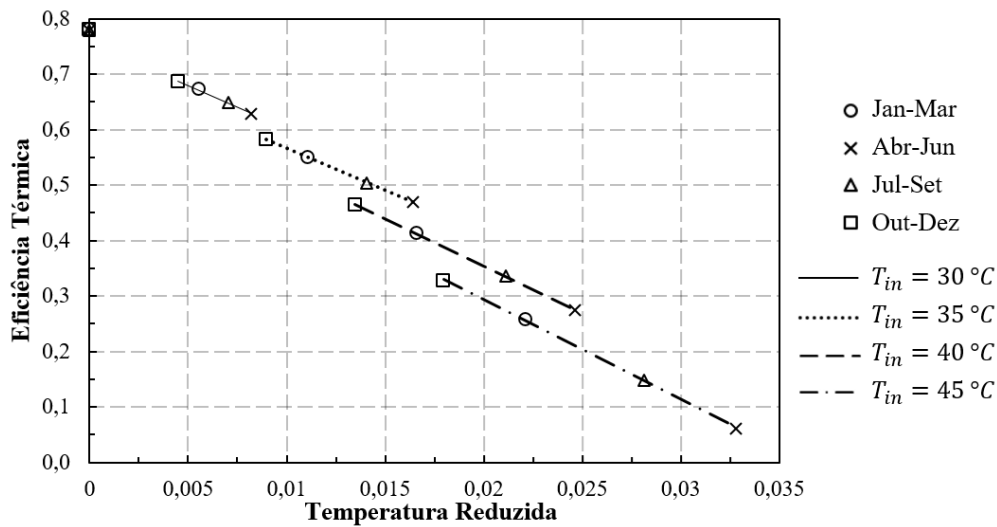


Gráfico 1: Eficiência térmica para diferentes níveis de radiação solar em função da temperatura reduzida. Fonte: Autores do Trabalho.

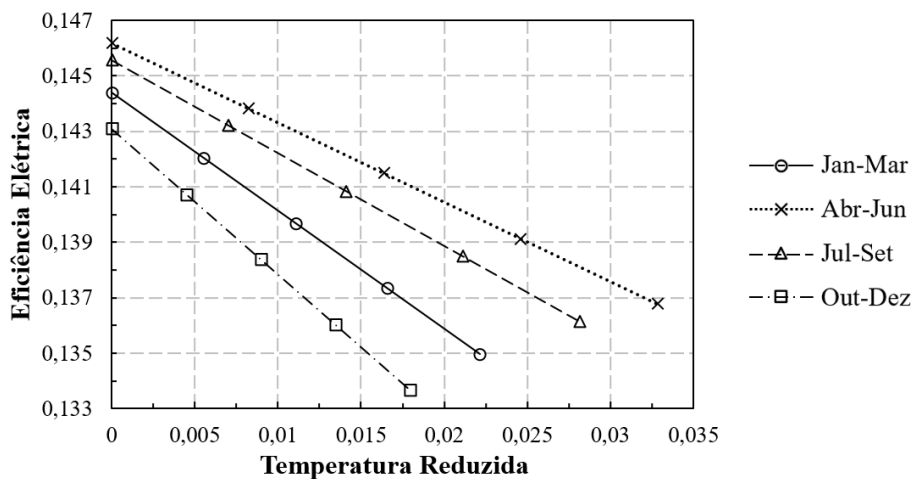


Gráfico 2: Eficiência elétrica para diferentes níveis de radiação solar em função da temperatura reduzida. Fonte: Autores do Trabalho.

Tabela 3: Eficiência térmica e elétrica para temperatura reduzida zero. Fonte: Autores do Trabalho.

Trimestre	Eficiência Térmica	Eficiência Elétrica
Jan-Mar	0,780	0,144
Abr-Jun	0,779	0,146
Jul-Set	0,779	0,146
Out-Dez	0,781	0,143

## DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Através do gráfico 1, é possível observar que a eficiência térmica aumenta quanto maior é o nível de radiação solar, levando-se em consideração a mesma temperatura de entrada da água. Para a eficiência elétrica, tomando-se uma mesma temperatura de entrada de água e aumentando o nível de radiação solar, a temperatura média das células aumenta e, como consequência, a eficiência das células fotovoltaicas é reduzida, como mostra o gráfico 2. A partir

disso, conforme é apresentado por Procópio et.al. (2016) em seu modelo matemático, percebe-se que um aumento conjunto das eficiências térmica e elétrica gera um conflito no sistema, uma vez que o aumento de uma eficiência resulta, inevitavelmente, na redução da outra.

Para a temperatura reduzida igual a zero, pela tabela 3 observa-se que a eficiência térmica é praticamente a mesma para todos os trimestres avaliados e a eficiência elétrica é ligeiramente maior de abril a setembro devido ao menor nível radiação solar nesse período e, por consequência, menor temperatura das células. Porém, à medida que a temperatura da água de entrada aumenta, há uma maior queda na eficiência térmica para os trimestres de menor radiação solar do que para os outros. Para maiores valores de temperatura reduzida, há uma queda na eficiência elétrica, porém não tão brusca quanto para a eficiência térmica. Sendo assim, o trimestre que apresentou a maior eficiência global, que é a soma das eficiências térmicas e elétricas, foi de outubro a dezembro.

É interessante notar que o valor de temperatura de água na entrada do sistema afeta bastante a eficiência do PVT. Se o objetivo é obter a máxima eficiência elétrica, deve-se utilizar água a baixas temperaturas na entrada do sistema. Por outro lado, se o objetivo é aquecer a água junto à geração de energia elétrica e armazenar essa água aquecida, deve-se levar em consideração a redução da eficiência elétrica à medida que a temperatura da água de entrada aumenta.

## CONCLUSÃO

O período em que o coletor solar em estudo apresentou o melhor desempenho foi no último trimestre do ano, entre os meses de outubro e dezembro, que são os meses que apresentam as maiores taxas de radiação solar. Entretanto, com o acoplamento de um sistema solar térmico a um sistema fotovoltaico, independentemente da época do ano, observa-se um aumento na eficiência elétrica uma vez que as células fotovoltaicas passam a trabalhar com valores menores de temperatura, favorecendo seu melhor desempenho.

A simulação numérica, através do método de volumes finitos, permite discretizar um modelo tridimensional de um módulo PVT e prever a distribuição de propriedades, como a temperatura, ao longo de todo o módulo e, como exemplo, observar quais células trabalharão em maior temperatura ou o comportamento do isolamento, o que modelos matemáticos integrais não permitem descrever. Informações como essas dão subsídio para otimização do projeto de um módulo PVT e comparar diferentes conceitos de projeto sem a construção de um modelo físico.

Finalmente, a aplicação de um sistema PVT subsidia a geração combinada de energia, promovendo a obtenção de energia elétrica e térmica em um mesmo mecanismo, sendo uma alternativa viável em locais com restrição de espaço ou com limitações estruturais. Além disso, é uma possibilidade de geração de receita ao conectar esse sistema a rede de uma concessionária de energia elétrica e economia de eletricidade usada para aquecimento de água em aparelhos como chuveiro elétrico ou aquecedor de piscina.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) pelo apoio financeiro através do projeto “D-498 – Desenvolvimento de Soluções PVT para aumento da eficiência de usinas solares” e a UFMG pela disponibilização dos softwares utilizados nesse trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Chow, T. T.; TIWARI, G. N.; MENEZO, C. **Hybrid Solar: A Review on Photovoltaic and Thermal Power Integration**. New Delhi: International Journal of Photoenergy, 2012.
2. Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). **Atlas Solarimétrico de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CEMIG, 2012.
3. Evans, D. L.; Florschuetz, L. W. **Cost Studies on Terrestrial Photovoltaic Power Systems with Sunlight Concentration**. United States of America: Solar Energy, 1977.
4. Lopez, Ricardo Aldabó. **Energia Solar para produção de eletricidade**. São Paulo: Artliber Editora, 2012.
5. Magliavacca, Alencar, ET AL. **Placas fotovoltaicas refrigeradas a água e a possibilidade de cogeração elétrica e térmica**. Santa Catarina: Instituto Federal de Santa Catarina, 2013.
6. Procópio, et.al. **Análise do desempenho térmico e Elétrico de um módulo fotovoltaico acoplado a um coletor solar plano**. Belo Horizonte: VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2016.
7. Zondag, H. A.; Vries, D. W. de; van Helden, W. G. J.; van Zolingen, R. J. C.; van Steengoven, A. A. **The yield of different combined PV-thermal collector designs**. The Netherlands: Solar Energy, 2003.