

SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA TROCADORES DE CALOR DE SISTEMAS HÍBRIDOS FOTOVOLTAICOS/TÉRMICOS (PV/T)

Vinícius Francisco do Nascimento, vfn14@hotmail.com¹

João Henrique Sartori Vieira, joao.sartoriv@gmail.com¹

Rodrigo Fiorotti, rodrigo.fiorotti@ifes.edu.br¹

Arthur Eduardo Alves Amorim, arthur.amorim@ifes.edu.br¹

¹Instituto Fedetal do Espírito Santo, Rodovia BR Norte Km 58, São Mateus, 101 – Litorâneo, ES, 29932-540.

Resumo. O crescimento da demanda por energia elétrica e a necessidade de diversificação da matriz brasileira, tem impulsionado o crescimento da energia fotovoltaica como fonte alternativa. Porém, os sistemas fotovoltaicos têm como desvantagem a ocorrência de um aumento na temperatura das células fotovoltaicas que pode causar efeitos negativos, como redução da eficiência e da vida útil do sistema. Para atender a esse requisito, são utilizados sistemas híbridos fotovoltaico/térmico (PV/T), responsáveis por aproveitar parte do calor produzido pelas células através de um fluido de trabalho que escoar em um trocador de calor. A principal vantagem do PV/T consiste no aproveitamento da energia térmica que pode ser utilizada em aplicações de baixa temperatura, fato que aumenta o rendimento global do sistema, além do resfriamento da célula fotovoltaica. Este trabalho selecionou o material para o tubo trocador de calor visando o melhor desempenho térmico. Os mapas de Ashby com os índices de méritos de condutividade térmica por custo e condutividade térmica por expansão térmica foram utilizados para pré-selecionar 6 materiais. Em seguida, o método de lógica digital foi aplicado para classificar os materiais entre aqueles pré-selecionados. As ligas de alumínio se demonstraram os materiais mais viáveis, podendo substituir o cobre usualmente empregado.

Palavras chave: PV/T, trocador de calor, seleção de materiais, eficiência energética.

Abstract. The growth in demand for electricity and the need to diversify the Brazilian matrix, have been pushing the photovoltaic energy growth as an alternative source. However, photovoltaic systems have the drawback of the occurrence of an increase in the temperature of photovoltaic cells that can cause negative effects, such as reducing system efficiency and service life. To improve this requirement, photovoltaic/thermal hybrid systems (PV/Ts) are used, that takes advantage of part of the heat produced by the cells through a work fluid that flows into a heat exchanger. The main advantage of PV/T is the utilization of the thermal energy, which can be employed in low temperature applications, thus, increasing the system global efficiency and reduction the photovoltaic cell temperature. The present work sought to select the material for the heat exchanger tube, aiming at the possible thermal performance. Ashby maps with the material index of thermal conductivity by cost and thermal conductivity by thermal expansion were used to pre-select 6 materials. Then, the digital logic method was applied to classify the materials among those pre-selected. Aluminum alloys proved to be the most viable materials being able to replace the copper ones usually used.

Keywords: PV/T, heat exchanger, material selection, energy efficiency.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Pinho e Galdino (2014), para fins de engenharia há dois métodos de extração da energia solar: fotovoltaica e térmica. Os sistemas fotovoltaicos, em geral, apresentam baixa eficiência, em torno de 12% a 22% (Sampaio, 2019; Silva *et al.*, 2019). A intensidade da radiação solar e a temperatura da placa de superfície são fatores que afetam a energia produzida pelos módulos fotovoltaicos. A radiação e a eficiência são proporcionais, já a temperatura e a eficiência são inversamente proporcionais.

O efeito indesejável produzido pelo aumento da temperatura pode ser reduzido pelo uso de sistemas híbridos PV/T. Eles são capazes de maximizar a absorção de energia solar pelas gerações elétrica e térmica. Portanto, a eficiência global do sistema aumenta e os custos de produção de energia são reduzidos em comparação com o sistema fotovoltaico tradicional. O PV/T aprimora os módulos fotovoltaicos, aumentando a vida útil e estabilizando a geração de tensão e corrente (Kalogirou, 2014).

Segundo Kalogirou (2014), o sistema PV/T pode funcionar com ar ou água como fluido de trabalho. Os sistemas com ar são preferíveis devido à simplicidade e custo de implementação. No entanto, eles não são adequados para países

localizados em baixas latitudes porque a temperatura do ar é superior a 20 °C na maior parte do ano. Assim, a produção de energia é limitada a um curto período de tempo. Para essas latitudes, os sistemas com água são mais adequados, pois podem ser usados durante todo o ano.

Os modelos de coletores PV/Ts a água, são constituídos por um módulo fotovoltaico e um trocador de calor, que é composto por chapas finas e metálicas com tubos por onde circula a água. O trocador de calor é posicionado para que haja o contato com a parte de baixo do módulo fotovoltaico e abaixo do trocador é colocado o isolante térmico, que também é responsável por isolar as bordas do painel. A cobertura de vidro por sua vez, tem como objetivo minimizar a perda de calor por convecção, a retirada dessa cobertura implicaria em uma convecção direta com o painel e consequentemente uma maior perda de calor e menor eficiência do sistema (Michael *et al.*, 2015)

Além das tecnologias bem conhecidas, pesquisas recentes foram feitas e novos conceitos de PV/T foram desenvolvidos. Chen, *et al.*, 2011 realizaram um sistema onde as células fotovoltaicas eram envolvidas por um cilindro de vidro. O trocador de calor foi construído em cobre e abaixo do módulo fotovoltaico existe um material intermediário feito em alumínio. No interior da estrutura cilíndrica formou-se vácuo para aumentar a eficiência térmica e minimizar as perdas térmicas para o ambiente.

Fu, *et al.*, 2012 propuseram três modos de operação para o PV/T. Situações de análise com: radiação suficiente; radiação insuficiente; e dias chuvosos ou radiação fraca. O primeiro modo usa água como fluido de serviço, o segundo modo usa um fluido de resfriamento e o terceiro modo usa fluido de resfriamento combinado com um ventilador. A conclusão é que o modo com água apresenta melhores resultados sob forte radiação.

Babu e Kamath (2015) destacam a importância de se conhecer a relação entre o fluido de trabalho e o trocador de calor. Em alguns casos, uma reação química ocorre causando falha. Neste mesmo trabalho, eles descrevem a compatibilidade entre alguns materiais e fluidos de serviço. Dentre as compatibilidades está a da água com o alumínio e inconel.

Muitos trabalhos acerca dos PV/Ts abordam mudanças construtivas e alterações no fluido de trabalho, no entanto, é dada pouca atenção ao material que constitui o trocador de calor do sistema. É comum utilizarem cobre, sem que haja qualquer comparação com outro material, ou estudo de viabilidade. Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo identificar materiais viáveis para o trocador de calor. A análise considera diferentes métodos, sendo eles: índice de mérito e lógica digital.

2. METODOLOGIA

2.1. Atributos analisados dos materiais

Neste trabalho indicou-se algumas características que o material escolhido para o trocador de calor deve ter.

- Condutividade térmica - Para a redução adequada da temperatura da placa, uma alta taxa de transferência de calor entre o ambiente confinado e o fluido de trabalho se faz necessária. Com essa redução o desempenho do equipamento é melhorado, proporcionando o máximo aproveitamento da energia térmica.
- Coeficiente de expansão térmica - O material deve possuir baixa expansão durante a operação, a fim de evitar danos estruturais devido à variação geométrica.
- Compatibilidade com fluido de serviço - Como mencionado acima, a água é um fluido apropriado para regiões de clima quente. Portanto, o material deve ser compatível com água.
- Densidade - Materiais leves reduzem os esforços da estrutura e cooperam com a mobilidade e instalação do PV/T.
- Módulo de elasticidade - Levado em consideração para identificar a importância da resistência mecânica do trocador de calor.

Além disso, estabeleceu-se como critério que os materiais selecionados sejam recicláveis, de forma a contribuir para a eficiência na utilização dos recursos naturais, redução do desperdício e menor impacto ambiental (Sheu, 2014).

2.2. Índice de mérito

Os índices de mérito foram usados em conjunto com os mapas de Ashby para a pré-seleção de 6 materiais, sendo estes os mais baratos segundo os critérios da seção 3.1. Os índices foram determinados a partir das correlações propostas por Ashby (2011) ou deduzidos de acordo com suas diretrizes. A seleção é baseada em uma análise multicritério, portanto, dois índices de mérito diferentes são combinados para realizar a seleção. Os índices de mérito escolhidos com base nos atributos são: índice de material para relacionar o coeficiente de expansão térmica e a condutividade térmica, visando menor expansão térmica e maior condutividade térmica, conforme a Eq. (1); índice de mérito que visa escolher o material de menor custo e maior condutividade térmica, conforme a Eq. (2).

$$IM_1 = \frac{k}{\alpha} \quad (1)$$

$$IM_2 = \frac{k}{\rho C_m} \quad (2)$$

Onde: k – condutividade térmica [W/m]; α – coeficiente de dilatação térmica [K⁻¹]; ρ – densidade [kg/m³]; e C_m – custo por unidade de massa [R\$/kg].

A região de seleção é definida pela linha de acoplamento (C_c), onde estará posicionado o vértice da área de seleção, como exemplificado na Fig. 1. A linha de acoplamento é dada pela constante de acoplamento, que representa a linha onde os dois índices de mérito correspondem à mesma taxa de transferência de calor, no caso deste trabalho IM_1 e IM_2 . Os materiais que estiverem acima da linha de acoplamento, possuem o IM_y com índice de mérito predominante, enquanto que abaixo da linha de acoplamento o IM_x é mais predominante.

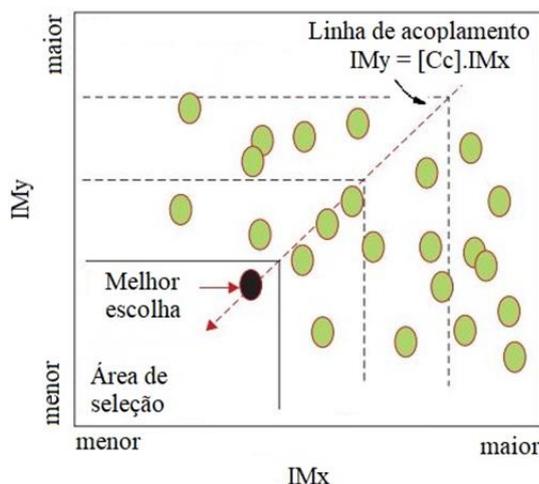


Figura 1. Mapa de Ashby com a linha de acoplamento (Ashby, 2011).

Dividindo as equações que originam os índices IM_1 e IM_2 obtém-se a linha de acoplamento, sendo representada pela Eq. (3).

$$C_c = \frac{IM_1}{IM_2} = \frac{C \Delta T}{\Delta A e} \quad (3)$$

Onde: C – custo máximo do trocador de calor [R\$], ΔT – variação de temperatura máxima [°C]; ΔA – variação de área máxima [m²]; e – espessura da chapa do trocador de calor [m].

Neste trabalho a linha de acoplamento será definida com base nos dados do trocador de calor de um sistema PV/T que está em construção no campus. Os tópicos a seguir apresentam as limitações do projeto.

- Custo máximo do trocador de calor igual a R\$ 300,00;
- Espessura de 0,6mm;
- Máxima variação de temperatura igual a 40°C;
- Máxima variação da área igual a $7,32 \times 10^{-3} \text{m}^2$.

Tanto o índice de mérito IM_1 quanto IM_2 devem ser maximizados, dessa forma o vértice da área de seleção irá deslocar sobre a linha de acoplamento da região superior direita para a região inferior esquerda do mapa de Ashby.

2.3. Método de lógica digital

Após a pré-seleção dos materiais pelos índices de mérito, o método de lógica digital foi utilizado para classificar os melhores materiais em uma ordem. Souza, *et al.*, 2007 definem o método de lógica digital. O método da lógica digital consiste em atribuir pesos (α_i) a cada atributo selecionado para comparação, utilizando uma matriz de decisão. Em seguida, cada peso normalizado (entre 0 e 1) é multiplicado pelo seu respectivo valor numérico normalizado (β), responsável por representar uma determinada propriedade, que está entre 0 e 100. Quando uma propriedade deve ser maximizada, utiliza-se a Eq. (4), porém quando é necessário que a mesma seja minimizada, deve-se utilizar a Eq. (5). Em seguida, deve ser encontrado o índice de desempenho (γ), conforme a Eq. (6); o material com maior índice de desempenho é o mais recomendado.

$$\beta = \frac{\text{valor numérico da propriedade}}{\text{máximo valor da lista}} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{\text{valor mínimo da lista}}{\text{valor numérico da propriedade}} \quad (5)$$

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \beta_i \alpha_i \quad (6)$$

Nesta etapa os materiais serão comparados de acordo com a condutividade térmica, densidade e módulo de elasticidade, de modo a garantir a seleção do material mais leve, condutor e resistente.

3. RESULTADOS

Combinando os índices de mérito aos mapas de Ashby foi possível selecionar seis materiais. A Fig. 2 apresenta os materiais selecionados e a ordem em que foram totalmente inseridos na área de seleção. A partir da Fig. 2 é possível observar que todos os materiais selecionados possuem o alumínio como base, isto ocorre devido ao baixo custo atrelado às ligas de alumínio, o que fez o índice de mérito IM_2 mais influente na seleção.

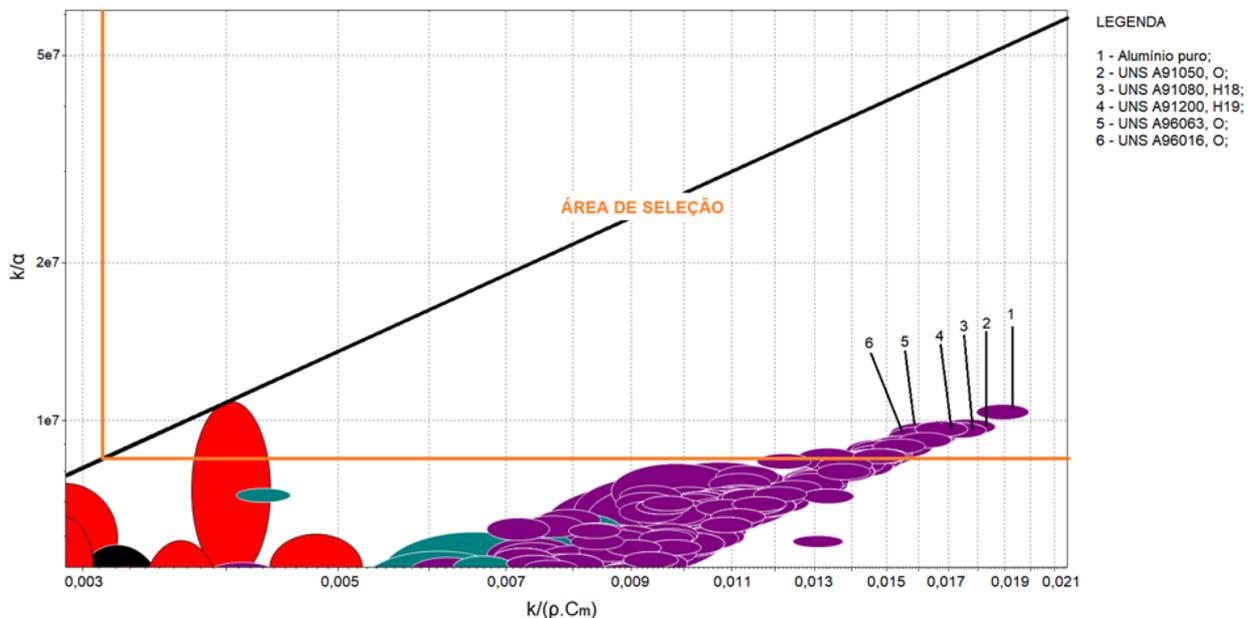


Figura 2. Materiais pré-selecionados.

O método de lógica digital conforme descrito acima requer que sejam atribuídos pesos a cada propriedade. Para a atribuição dos pesos foram consultados três profissionais de engenharia mecânica (professores) com maior know-how, visto que as diferentes opiniões de acordo com as diferentes experiências podem contribuir para a escolha do melhor do material. A Tab. 1 descreve os pesos padronizados de acordo com o ponto de vista de cada profissional, os quais foram obtidos após o preenchimento da matriz decisão conforme descrita por Silva, *et al.* (2017). Já a Tab. 2 apresenta as propriedades normalizadas dos materiais segundo o método de lógica digital.

Tabela 1. Pesos padronizados.

Propriedades	Pesos segundo cada avaliador [α]		
	A	B	C
Densidade	0,333	0,250	0,250
Condutividade térmica	0,500	0,417	0,417
Módulo de elasticidade	0,167	0,333	0,333

Tabela 2. Propriedades normalizadas dos materiais pré-selecionados,

Material	Densidade	Condutividade Térmica	Módulo de elasticidade
Alumínio puro	99,81	100,00	100,00
UNS A91050, O	99,45	93,85	100,00
UNS A91080, H18	99,81	94,26	100,00
UNS A91200, H19	99,45	92,42	100,00
UNS A96063, O	100,00	89,34	97,73
UNS A96016, O	99,81	90,16	98,58

A Fig. 3 apresenta os índices de desempenho obtidos para cada material pré-selecionado a partir dos índices de mérito. Cada letra maiúscula representa um profissional que preencheu a matriz de decisão e os pontos acima da letra representam a classificação dos materiais de acordo com o índice de desempenho. Observa-se que a classificação dos materiais foi a mesma, evidenciando uma convergência comum para o material mais indicado.

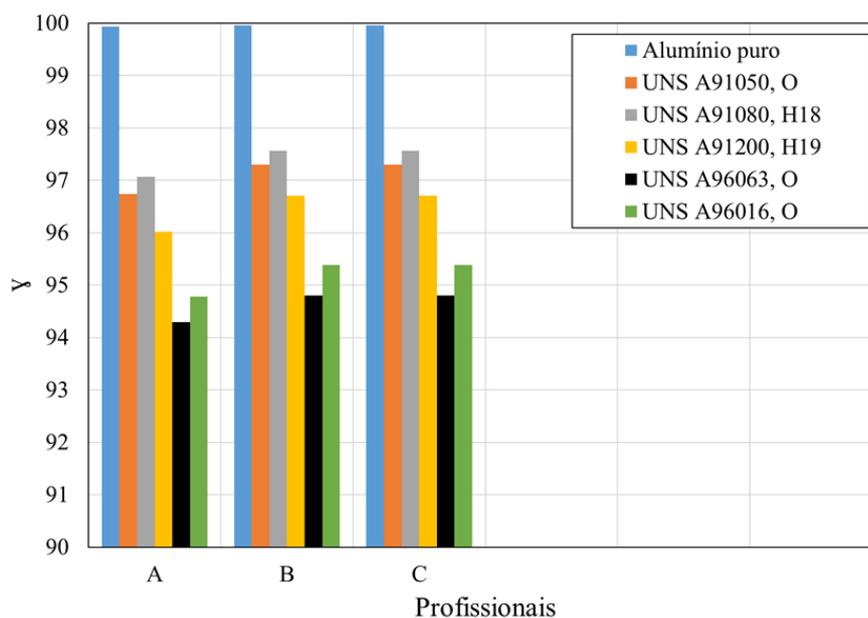


Figura 3. Índice de desempenho.

De acordo com os resultados, o material a ser selecionado seria o alumínio puro em função da sua condutividade ser superior aos demais materiais, porém o alumínio puro é um material de baixa resistência mecânica. Dentre os materiais selecionados, a maioria passou por ao menos um tratamento. O sufixo “O” indica que a liga passou por um processo de recozimento, em as durezas e resistências internas do material são reduzidas, já o sufixo “H” indica que o material foi submetido a um processo de encruamento, o que contribui para o aumento da resistência mecânica do material (Lumley, 2011; Kaufman e Rooy, 2004).

Caso os esforços da aplicação não sejam suportados pelo alumínio puro, a liga UNS A91080 (H18) pode ser uma alternativa, uma vez que passou por um processo de encruamento, portanto mais resistente, além de ser o material mais barato entre os selecionados e o segundo com maior condutividade térmica.

4. CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou selecionar seis materiais para o trocador de calor de um sistema PV/T, tendo como meio a combinação dos métodos de índice de mérito e lógica digital. O melhor material entre os selecionados foi o alumínio puro, mas devido à sua baixa resistência mecânica a liga UNS A91080 (H18) se demonstra mais viável, uma vez que é um material que passou por um processo de encruamento.

Como este trabalho busca estimular novos trabalhos nesta área, a análise limitou-se à seleção baseada apenas no material e sua aplicação. Para trabalhos futuros é necessário que os materiais selecionados sejam submetidos a experimentos, comparando os seus desempenhos em diferentes condições, geometrias e com outros materiais já utilizados no mercado, como o cobre.

5. REFERÊNCIAS

- Ashby, M.F., 2011. *Materials Selection in Mechanical Design*. Elsevier, Oxford, 4^a edition.
- Babu, N.N. and Kamath, H.c., 2015. "Materials used in Heat Pipe". *Materials Today: Proceedings*, Vol. 2, p. 1469-1478.
- Chen, H., Riffat, S.B. and Fu, Y., 2011. "Experimental study on a hybrid photovoltaic/heat pump system". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, p. 4132-4138.
- Fu, H.d., Pei, G. Ji, J., Long, H., Zhang, T. and Chow, T.T., 2012. "Experimental study of a photovoltaic solar-assisted heat-pump/heat-pipe system". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 40, p. 343-350.
- Kalogirou, S., 2014. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Elsevier, Oxford. 2^a edition.
- Kaufman, J.G. and Rooy, E.L. 2004. *Aluminum alloy castings: properties, processes and applications*. Asm, [S.l.].
- Lumley, R. 2011. *Fundamentals of aluminium metallurgy: production, processing and applications*. Woodhead Publishing, Philadelphia.
- Michael, J.J., Iniyar S. and Goic, R., 2015, "Flat plate solar photovoltaic–thermal (PV/T) systems: A reference guide". *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, Vol. 51, p. 62-88.
- Pinho, J.T. and Galdino, M.A. 2014. *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*. CEPTEL-CRESESB, Rio de Janeiro.
- Sampaio, J.A., 2019. *Silício grau solar: uma revisão das tecnologias de produção*. CETEM/MCTIC, Rio de Janeiro.
- Sheu, J., 2014. "Buyer Behavior in Quality-Dominated Multi-Sourcing Recyclable-Material Procurement of Green Supply Chains". *Production And Operations Management*, Vol. 25, p. 477-497.
- Silva, H.J., Batista, J.P., Rocha, L.A. and Nassar, E.J., 2019. "Improved efficiency of silicon polycrystalline commercial photovoltaic cells coated with a co-doped Er³⁺/Yb³⁺ silica matrix". *Journal Of Materials Science: Materials in Electronics*, Vol. 30, p. 16886-16891.
- Souza, A.R., Netto, T.A. and Pasqualino, I.P., 2007. "Materiais Poliméricos para dutos sanduíche aplicados em águas ultra-profundas". *PDPETRO*, Vol. 4, p. 1-10.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.