

TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM MEIOS POROSOS COM APLICAÇÃO EM RECEBEDORES VOLUMÉTRICOS EM PLANTAS HELIOTÉRMICASCarlos de Jesus Silva de Oliveira¹ (IC), Paulo Mohallem Guimarães (PQ)¹¹Universidade Federal de Itajubá – Campus Theodomiro Carneiro Santiago**Palavras-chave:** Heliostat Plant, Volumetric Receiver, Porous Matrix**Introdução**

A transição energética mundial tem se consolidado como um dos maiores desafios do século XXI, especialmente em função da necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, mitigar os impactos das mudanças climáticas e atender ao crescente consumo energético global. Neste cenário, as fontes renováveis têm desempenhado papel fundamental, sendo a energia solar uma das mais promissoras devido à sua abundância, facilidade de acesso e caráter limpo.

Entre as diferentes formas de aproveitamento da energia solar, a energia solar concentrada (CSP – Concentrated Solar Power) ocupa posição de destaque. Essa tecnologia permite a conversão da radiação solar em calor de alta temperatura, que por sua vez pode ser utilizado em ciclos termodinâmicos convencionais (como Rankine e Brayton) para geração de eletricidade. Além disso, sistemas CSP possuem a vantagem de integração a unidades de armazenamento térmico, possibilitando geração elétrica despachável, mesmo em períodos noturnos ou nublados.

Existem quatro principais configurações de plantas CSP: parabólica (Parabolic Trough), prato parabólico (Dish Stirling), Fresnel linear e torre central (Central Receiver System). Dentre essas, as usinas de torre central têm recebido maior atenção, pois permitem atingir maiores temperaturas de operação, resultando em eficiência superior de conversão solar-elétrica. Nessa configuração, um campo de heliostatos reflete e concentra a radiação solar em um receptor localizado no topo de uma torre.

O desempenho do receptor é elemento-chave para a eficiência global da usina. Tradicionalmente, receptores tubulares têm sido utilizados, mas apresentam limitações, como gradientes térmicos elevados na superfície exposta ao fluxo solar. Como alternativa, surgem os receptores volumétricos, que utilizam materiais porosos para distribuir a radiação solar em um

volume tridimensional. Essa configuração reduz os gradientes superficiais, aumenta a área de contato térmico entre o fluido de trabalho e o material sólido e, conseqüentemente, melhora a transferência de calor.

Apesar do grande potencial, o uso de meios porosos traz novos desafios: o aumento da perda de carga, a escolha de materiais resistentes a altas temperaturas, a otimização da geometria da matriz e o controle da temperatura máxima (THETAMAX), que pode comprometer a integridade estrutural do receptor. Nesse contexto, o presente trabalho realiza um estudo numérico da transferência de calor em receptores volumétricos com meios porosos, utilizando o software COMSOL Multiphysics®, com foco na análise do efeito da velocidade de entrada do fluido, porosidade, permeabilidade e fluxo de calor incidente.

Metodologia

O modelo físico (Figura 1) analisado consiste em um receptor volumétrico pressurizado, composto por um domínio de escoamento de ar e uma matriz porosa absorvedora. O fluido de trabalho considerado foi ar pressurizado, entrando no sistema com temperatura ambiente (293,15 K) e velocidade controlada.

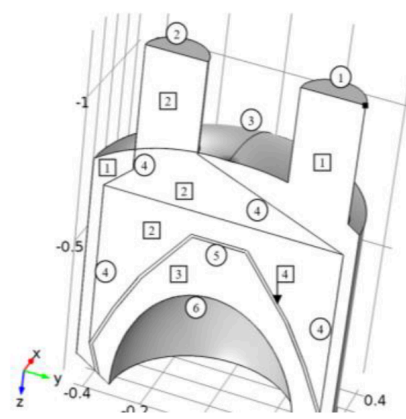


Figura 1 - Geometria e condições de contorno

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Superfície 1: entrada: Velocidade do ar pressurizado (V0): 0.2 a 1,5 m/s, temperatura(T0): 293.15 K;
 Superfície 2: saída: condições de escoamento desenvolvido;
 Superfícies 3, 4, 6: paredes externas: condição de não escorregamento e isolamento térmico;
 Superfície 5: Temperatura especificada de 800 K ou Fluxo de calor: 10.000 a 150.000 W/m²;
 Todas as superfícies pertencentes ao plano de corte estão sob condições de simetria.

As equações que regem o problema são as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia, respectivamente mostradas abaixo:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot \left[-p \mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u}) + (\nabla \mathbf{u})^T - \frac{2}{3} \mu(\nabla \mathbf{u}) \mathbf{I} \right] \quad (2)$$

$$\rho C_p \mathbf{u} \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

onde \mathbf{u} é o vetor velocidade, ρ é a massa específica do fluido, \mathbf{I} é o vetor velocidade, μ é a viscosidade dinâmica, C_p é o calor específico, k é a condutividade térmica do fluido, p é a pressão e T é a temperatura.

O problema foi modelado em regimes laminar e turbulento. Para o escoamento laminar, as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia foram resolvidas diretamente. Para o escoamento turbulento, utilizou-se o modelo k- ω , adequado para escoamentos internos e com gradientes de temperatura.

A matriz porosa foi modelada utilizando as equações de Brinkman, que permitem incorporar efeitos de permeabilidade e porosidade no balanço de momento. O balanço de energia no meio poroso foi tratado considerando condutividade térmica efetiva, resultante da combinação do sólido e do fluido intersticial.

Foram analisados três materiais para a matriz porosa: Carbetto de Silício (SiC), Alumina (Al₂O₃) e Grafeno. Cada material possui propriedades distintas de condutividade térmica, densidade e permeabilidade, permitindo avaliar seu impacto na eficiência do receptor.

A discretização espacial foi realizada por meio de uma malha de elementos tetraédricos, e testes de independência de malha foram conduzidos para garantir precisão dos resultados. A validação do modelo foi feita

com base em benchmarks clássicos de convecção natural em cavidades contendo meios porosos, conforme literatura e documentação oficial do COMSOL Multiphysics®.

Resultados e discussão

Os resultados obtidos permitiram analisar o desempenho do receptor volumétrico sob diferentes condições operacionais.

No regime laminar (Figura 2), observou-se aumento expressivo da temperatura do ar. O fluido, entrando a 293 K, atingiu até 796 K após atravessar a matriz porosa, representando incremento de aproximadamente 273%. Esse resultado evidencia a eficiência térmica da matriz porosa como absorvedora volumétrica. As isotermas mostraram distribuição de calor relativamente uniforme, resultado da difusão térmica pelo meio.

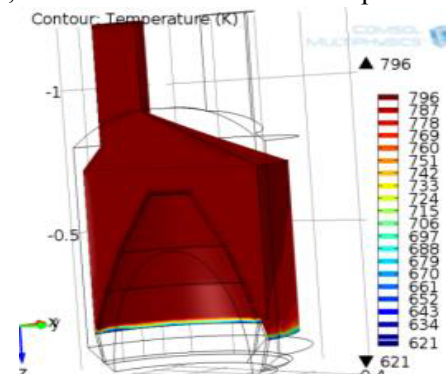


Figura 2 - Isotermas com temperatura de entrada 293 K e 800 K na superfície absorvedora.

As linhas de corrente (Figura 3) indicaram escoamento bem distribuído, sem recirculações significativas, o que favorece a transferência de calor. No entanto, verificou-se aumento da pressão ao longo do meio poroso, confirmando que a queda de carga é um fator que deve ser considerado no projeto.

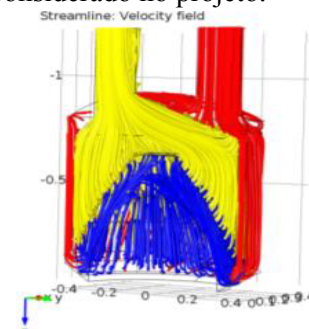


Figura 3 - Linhas de Corrente para o caso laminar.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Para o regime turbulento, a análise foi realizada com Alumina como meio poroso. Quando a condição de contorno foi de temperatura imposta (800 K), observou-se distribuição quase uniforme na matriz. Por outro lado, quando se utilizou fluxo de calor como condição de contorno (100 W/m² a 150.000 W/m²), os gradientes de temperatura tornaram-se mais realistas, com valores máximos da ordem de 532 K para casos de baixa velocidade de entrada. Isso sugere que a modelagem por fluxo térmico incidente é mais representativa das condições reais de operação de usinas solares.

A análise paramétrica revelou tendências importantes: a velocidade de entrada foi o parâmetro mais determinante, reduzindo THETAMAX de cerca de 11.000 K para 1.772 K quando aumentada de 0,2 para 1,5 m/s; a porosidade exerceu influência secundária, mas valores elevados (~0,95) aliados a boa permeabilidade favoreceram a performance térmica; e o fluxo de calor apresentou comportamento não linear, com crescimento acentuado de temperatura para valores acima de 75.000 W, evidenciando risco de superaquecimento.

Os diferentes materiais mostraram comportamentos complementares: o Carbetto de Silício apresentou elevada condutividade térmica e resistência mecânica; a Alumina mostrou menor condutividade, mas boa estabilidade térmica; e o Grafeno destacou-se pelo elevado potencial de condutividade, embora ainda seja um material em fase de pesquisa aplicada.

Da Figura 14, os resultados revelam uma correlação clara e fortemente positiva entre o fluxo de calor e o THETAMAX no receptor volumétrico. Com porosidade constante (0,95), permeabilidade (1×10⁻¹⁰ m²) e velocidade de entrada (2,0 m/s), o aumento do fluxo de calor de 10.000 W para 150.000 W leva a uma elevação acentuada da temperatura máxima — de 447 K para 2.615 K. O aumento da temperatura é não linear, tornando-se mais íngreme quando o fluxo de calor ultrapassa 75.000 W, indicando a crescente sensibilidade térmica do sistema à entrada radiativa em cargas mais altas. Isso sugere que, enquanto níveis moderados de fluxo de calor (como 75.000–100.000 W) podem oferecer captura eficaz de energia com temperaturas controladas, valores extremos como 150.000 W podem implicar risco de superaquecimento e demandar refrigeração reforçada ou limites de material. Entre os casos, 75.000 W (THETAMAX = 1.455 K) parece ser o

mais representativo das condições reais de operação, em que é necessário um equilíbrio entre eficiência térmica e segurança do material. Isso ressalta a importância crítica de ajustar a entrada de calor à capacidade de resfriamento do receptor.

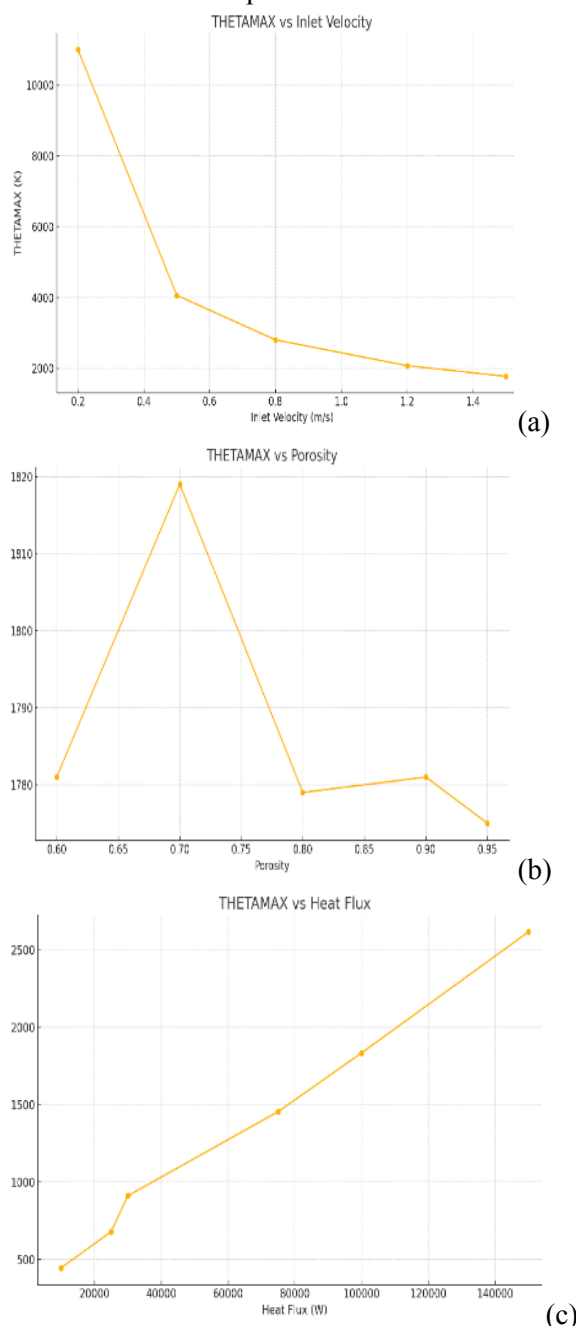


Figura 14 - THETAMAX versus (a) velocidade de entrada, (b) porosidade, e (c) fluxo de calor.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Conclusões

O presente trabalho analisou numericamente a transferência de calor em receptores volumétricos com meios porosos aplicados em usinas de torre central de energia solar concentrada. A partir dos resultados obtidos, conclui-se que: a velocidade de entrada do fluido é o parâmetro mais relevante para o controle da temperatura máxima, garantindo operação segura quando superior a 1,2 m/s; a porosidade elevada (~0,95) contribui para melhor desempenho térmico, embora seu efeito seja secundário em altas velocidades; o fluxo de calor incidente apresenta comportamento não linear, exigindo controle rigoroso para evitar superaquecimento acima de 75.000 W; e o uso de materiais avançados como grafeno apresenta potencial para aumentar a eficiência, embora aspectos econômicos e de escalabilidade ainda precisam ser investigados.

De forma geral, os receptores volumétricos com meios porosos representam uma solução eficiente e promissora para usinas solares de torre central, oferecendo maior estabilidade térmica e potencial de redução do custo nivelado de energia. Estudos futuros devem considerar novos arranjos geométricos, otimização topológica, integração com armazenamento térmico e testes experimentais em escala piloto.

Agradecimentos

Lefter100 (laboratório de engenharia fluida e térmica computacional experimental e numérica)
FAPEMIG
Universidade federal de itajubá-campus Theodomiro Carneiro Santiago

Referências

Albanakis, C., Missirlis, D., Michailidis, N., Yakinthos, K., Goulas, A., Omar, H., Tsipas, D., Granier, B., 2009. “Experimental analysis of the pressure drop and heat transfer through metal foams used as volumetric receivers under concentrated solar radiation”. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 33, pp. 246–252.

Ávila-Marín, A. L., 2011. “Volumetric receivers in Solar Thermal Power Plants with Central Receiver System technology: A review”. *Solar Energy*, Vol. 85, pp. 891–910.

Behar, O.; Khellaf, A.; Mohammedi, K., 2013. “A Review of studies on central receiver solar thermal

power Plants”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 23, pp. 12–39.

Buck, R., Brauning, T., Denk, T., Pfänder, M., Schwarzbozl, P., Tellez, F., 2002.

Solar-Hybrid Gas Turbine-based Power Tower Systems (REFOS). In *Proceedings of the ASME 201 at Forum 2001, Solar Energy: The Power to Choose*, April 21–25, 2001, Washington, DC.

Del Río, A., Korzynietzb, R., Brioso, JA., Gallasa, M., Ordóñez, I., Queroa, M., and Díaz, C. “Soltrec - Pressurized volumetric solar air receiver technology” Dowling, A.W., Zheng, T., Zavala, V.M., *Economic assessment of concentrated solar power technologies: a review*, *Renewable Sustainable Energy Rev.* 72 (2017) 1019–1032, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.006>.

He, Y.-L., Qiu, Y., Wang, K., *Perspective of concentrating solar power*, *Energy* 198 (2020), 117373, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117373>.

Hossain, M., Wilson, M., 2002. “Natural convection flow in a fluid-saturated porous medium enclosed by nonisothermal walls with heat generation”. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 41, pp. 447-454.

Kribus, A., Grijnevich, M., Gray, Y., *Parametric study of volumetric absorber performance*, *Energy Proc.* 49 (2014) 408–417,

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.044>. Kribus, A., Gray, Y., Grijnevich, M., *The promise and challenge of solar volumetric absorbers*, *Sol. Energy* 110 (2014) 463–481, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.09.035>.

B Li, M.-J., Tao, W.-Q., *Review of methodologies and policies for evaluation of energy efficiency in high energyconsuming industry*, *Appl. Energy* 187 (2017) 203–215,

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.039>. Mehos M., Turchi C., Vidal J., *Concentrating Solar Power Gen3 Demonstration Roadmap*, National Renewable Energy Lab, 2017.