

INFLUÊNCIA DO REGIME DE ESCOAMENTO EM UMA CHAMINÉ SOLAR DE PEQUENO PORTE

Janaína de O. Castro Silva^{1*}, Tauane S. Fernandes¹, Paulo F. Marinho Júnior¹, Luiz Fernando R. Ledo¹, Sérgio de M. Hanriot¹ e Cristiana B. Maia¹

1: Departamento de Engenharia Mecânica
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Av. Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico Belo Horizonte 30535-901 Brasil
e-mail: janainajocs@hotmail.com, tshaily@gmail.com, pfm@sga.pucminas.br,
hanriot@pucminas.br, cristiana@pucminas.br

Palavras-chave: Chaminé Solar, Simulação Numérica e Condições de Contorno.

Resumo. *Nas últimas décadas a demanda energética tem apresentado um crescimento acelerado e as preocupações ambientais estão cada vez maiores, incentivando a busca por fontes de energia renováveis. A chaminé solar é uma tecnologia promissora, que utiliza as componentes direta e difusa da radiação solar incidente para gerar um escoamento de ar quente. Os resultados obtidos a partir do primeiro protótipo construído em 1981 em Manzanares/Espanha demonstraram que o projeto foi satisfatório, confirmando sua viabilidade e confiabilidade. No entanto, o uso de chaminés solares para gerar energia elétrica exige estruturas muito altas para serem economicamente competitivas com fontes convencionais. Desta forma, chaminés solares de pequeno porte podem ser utilizadas para a secagem de produtos agrícolas. Uma das principais vantagens da chaminé solar é a sua capacidade para funcionar mesmo durante a noite, devido ao calor armazenado nas camadas mais profundas do solo. Este trabalho visa avaliar a influência das condições de contorno no escoamento turbulento no interior de uma chaminé solar utilizando as técnicas de dinâmica dos fluidos computacional (CFD, do inglês Computational Fluid Dynamics). A configuração geométrica utilizada foi obtida a partir de um protótipo experimental com uma torre de 12,3 m de altura e 1 m de diâmetro, um coletor com diâmetro de 25 m e altura em relação ao solo variando de 0,05 m na entrada para 0,5 m no restante da cobertura. A temperatura de entrada e a vazão mássica foram obtidas a partir de dados experimentais provenientes da literatura. O software ANSYS-CFX 14.5 foi utilizado para analisar o escoamento de ar no interior do dispositivo utilizando o modelo de turbulência k- ϵ e as equações de conservação da massa, momentum e energia. Foram avaliadas a distribuição de velocidades e de temperaturas ao longo do dispositivo, bem como a distribuição de temperaturas no solo. Os resultados indicaram que para a análise transiente a dimensão que propiciou os melhores resultados foi à profundidade do solo correspondente a 5m.*

1. INTRODUÇÃO

O atual cenário energético mundial tem propiciado a busca por fontes alternativas de energia. Nota-se que apenas nos últimos 10 anos a demanda energética dobrou, enquanto os recursos energéticos atuais são incapazes de atender às demandas do mercado. Esta situação tem incentivado a comunidade científica a trabalhar para aumentar o uso e a eficiência das fontes de energia renovável [1].

Dentre as fontes alternativas de energia, destaca-se a energia solar, por ser uma fonte renovável, limpa e abundante. A chaminé solar é um dispositivo que utiliza a energia solar para gerar um escoamento de ar quente, que pode ser usado para acionar uma turbina eólica, gerando eletricidade [2]; ou para a secagem de produtos agrícolas. Com base na experiência e nos conhecimentos adquiridos a partir do protótipo de Manzanares, demonstrou-se a viabilidade e confiabilidade do dispositivo [3]. Chaminés solares combinam as tecnologias de coletores solares, chaminés e turbinas. Parte da radiação solar que atinge o dispositivo atravessa o coletor e promove o aquecimento do solo. O solo aquecido transfere calor por convecção natural para a massa de ar sob o coletor, que por sua vez, escoam ascendente em direção à chaminé, devido às forças de empuxo causadas por gradientes de temperatura.

Vários estudos têm sido desenvolvidos em chaminés solares, envolvendo análise experimental, numérica, global e de otimização. Os estudos experimentais mais relevantes sobre o assunto referem-se à planta piloto em Manzanares/Espanha, que tem sido constantemente citado e usado como referência. Análises diferenciais do escoamento têm como objetivo prever os campos de velocidade e temperatura do escoamento no interior de chaminés solares. Chergui et al (2010) utilizaram o método dos volumes finitos para discretizar as equações de Navier-Stokes e da energia para o escoamento laminar de ar por convecção natural. Os resultados foram validados com uma solução de referência apresentada por Vahl (1983) [4;5]. Tingzhen et al (2008a) resolveram as equações de Navier-Stokes e a equação da conservação da energia para o escoamento de ar, bem como as equações de transporte para as variáveis de turbulência. Diferentes modelos matemáticos para o coletor, a chaminé e a camada de armazenamento de energia sob a chaminé solar foram desenvolvidos para serem utilizados como condições de contorno para as equações. O protótipo de Manzanares foi selecionado como um modelo físico para a simulação numérica [6]. Tingzhen et al (2008b) realizaram simulações numéricas de chaminés solares, utilizando técnicas de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). A influência da radiação solar na queda de pressão da turbina e do fluxo de transferência de calor na energia de saída foi analisada, bem como as perdas de energia da chaminé solar. Os resultados da simulação numérica revelaram que, para uma chaminé solar com torre de 400 m e com um coletor de 1500 m de raio e uma turbina de lâmina de 5 m, a potência máxima é de cerca de 10 MW e a eficiência da turbina é de 50% [7]. Koonsrisuk e Chitsomboon (2009) usaram a análise dimensional para combinar oito variáveis primitivas em um parâmetro adimensional para estabelecer similaridade dinâmica entre um protótipo e seus modelos em escala. Este parâmetro adimensional foi interpretado como a razão entre energia cinética total ascendente e a energia flutuante do ar quente. Para validar o parâmetro adimensional proposto, três classes de modelos em escala

foram criadas e as equações que regem o escoamento foram resolvidas utilizando análise CFD [8]. Maia et al (2009) realizaram uma análise numérica do escoamento transiente em uma chaminé solar de pequenas dimensões, utilizando-se a técnica de volumes finitos em coordenadas generalizadas. Foram resolvidas as equações de conservação da massa, quantidade de movimento linear, energia e as equações de transporte para as grandezas energia cinética turbulenta, k , e dissipação da energia cinética turbulenta, ε . A temperatura na superfície do solo utilizada como condição de contorno foi aproximada como uma função da radiação solar incidente e das propriedades térmicas do solo. A temperatura na cobertura foi obtida através da realização de um balanço de energia. Os resultados foram comparados com dados experimentais. Utilizando-se o modelo validado foi avaliada ainda a influência dos parâmetros geométricos na vazão, temperatura média de saída, perfis de velocidade e temperatura ao longo do dispositivo. A análise mostrou que a altura e o diâmetro da torre são os parâmetros mais importantes [9]. Xu et al (2011) desenvolveram um modelo bidimensional para a chaminé solar e para a camada de armazenamento de energia sob o dispositivo, avaliando a influência da radiação solar, da queda de pressão da turbina e da eficiência do fluxo e de transferência de calor e da perda de energia do sistema. O software Fluent foi usado para resolver as equações que regem o problema e o modelo foi validado com resultados experimentais do protótipo de Manzanares [10]. Sangi et al (2011) descreveram uma análise numérica detalhada de uma planta chaminé solar, utilizando o software Fluent para simular um modelo bidimensional axi-simétrico, com o modelo de turbulência k - ε . O modelo foi validado com dados a partir do protótipo de Manzanares. Os autores também desenvolveram uma expressão para a pressão estática no interior do coletor [11].

Este trabalho apresenta uma análise numérica da influência das condições de contorno no escoamento turbulento no interior de uma chaminé solar, utilizando o modelo de turbulência k - ε . Foi avaliada especialmente a influência da espessura da camada de solo utilizada abaixo da cobertura do dispositivo. As temperaturas obtidas para diferentes espessuras foram comparadas com resultados teóricos e experimentais, sendo avaliado o comportamento do escoamento tanto em regime permanente como em regime transiente. O software comercial Ansys - CFX [12] foi usado para resolver as equações governantes do problema. Os resultados experimentais foram obtidos para um protótipo instalado na cidade de Belo Horizonte/Brasil.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

As equações governantes do problema são as equações de conservação de massa, de conservação de momentum e de conservação de energia, respectivamente, conforme descrito nas Equações (1), (2) e (3) [13]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla (\rho \cdot \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{\text{eff}} \nabla T - h \vec{j} + \left(\mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \mathbf{I} \right] \cdot \vec{v} \right) \right) \quad (3)$$

Devido à complexidade dos escoamentos turbulentos não é possível uma abordagem estritamente analítica do problema proposto, sendo necessária sua modelagem. Neste trabalho optou-se por modelar a turbulência através do modelo k-ε que utiliza o conceito de viscosidade turbulenta, que pode ser calculado através da Equação (4). A escolha do modelo k-ε no presente trabalho parte do princípio do mesmo apresentar os melhores resultados para análises CFD em chaminés solares [9; 11; 14] e ser, conseqüentemente, o modelo mais utilizado na literatura de chaminés solares.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

Onde os termos C_μ , k e ε , representam uma constante empírica, a energia cinética turbulenta e dissipação da energia cinética turbulenta, respectivamente.

Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), o modelo k-ε permite que os efeitos de transporte das propriedades turbulentas sejam avaliados através da solução de equações de transporte para a energia cinética turbulenta, k , e para a dissipação da energia cinética turbulenta, ε . As equações de transporte que permitem a caracterização de k e ε são respectivamente as Equações (5) e (6) [13]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (6)$$

Onde o termo G_k representa a produção de energia cinética turbulenta resultante da média dos gradientes, G_b a produção de energia cinética turbulenta devido às flutuações, Y_M a contribuição da dilatação flutuante na turbulência compressível para a taxa de dissipação. $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ e $C_{3\varepsilon}$ são constantes. S_k e S_ε são termos definidos pelo usuário.

As constantes assumem os seguintes valores:

$$C_\mu = 0,09 \quad \sigma_k = 1,00 \quad \sigma_\varepsilon = 1,30 \quad C_{1\varepsilon} = 1,44 \quad C_{2\varepsilon} = 1,92$$

A utilização do solo nas simulações numéricas como camada de armazenamento de energia tem-se mostrado fundamental na descrição do comportamento termofluidodinâmico de chaminés solares. Em geral, utiliza-se a idealização de sólido semi-infinito para determinar a transferência de calor transiente nas camadas superficiais do solo. De acordo com Çengel e Ghajar (2011) o sólido semi-infinito é um corpo ideal que tenha uma superfície em um único plano e estende-se até ao infinito em todas as direções. O solo pode ser considerado como um meio semi-infinito para determinar a variação de temperatura próxima a sua superfície. Por curtos períodos de tempo, a maioria dos corpos pode ser modelado como um sólido semi-infinito, uma vez que o calor não tem tempo suficiente para penetrar profundamente no corpo

[15]. A solução analítica para o caso da temperatura constante em uma superfície, pode ser calculado a partir da Equação (7).

$$\frac{T(x)-T_s}{T_i-T_s} = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta e^{-u^2} du \quad (7)$$

Onde os termos $T(x)$, T_s e T_i referencem-se as temperaturas nas profundidades, na superfície e inicial, respectivamente. O termo η pode ser calculado a partir da Equação (8). x representa a profundidade do solo, α a absorvidade do solo e t o tempo.

$$\eta = \frac{x}{\sqrt{4\alpha t}} \quad (8)$$

3. METODOLOGIA

Os dados experimentais utilizados para validação foram obtidos a partir de estudos realizados por Ferreira (2004) e Maia (2005) em um protótipo construído na cidade de Belo Horizonte / Brasil, no dia 26 de outubro, correspondendo ao meio da primavera. O protótipo possui uma chaminé solar com torre de 12,3 m de altura e 1 m de diâmetro e um coletor com um diâmetro de 25 metros e altura em relação ao solo variável de 0,05 m na entrada a 0,5 m de altura no restante da cobertura. Além disso, foram utilizados como referência os estudos publicados por Ferreira (2004), Maia (2005) e Castro Silva (2014) [16; 17; 18].

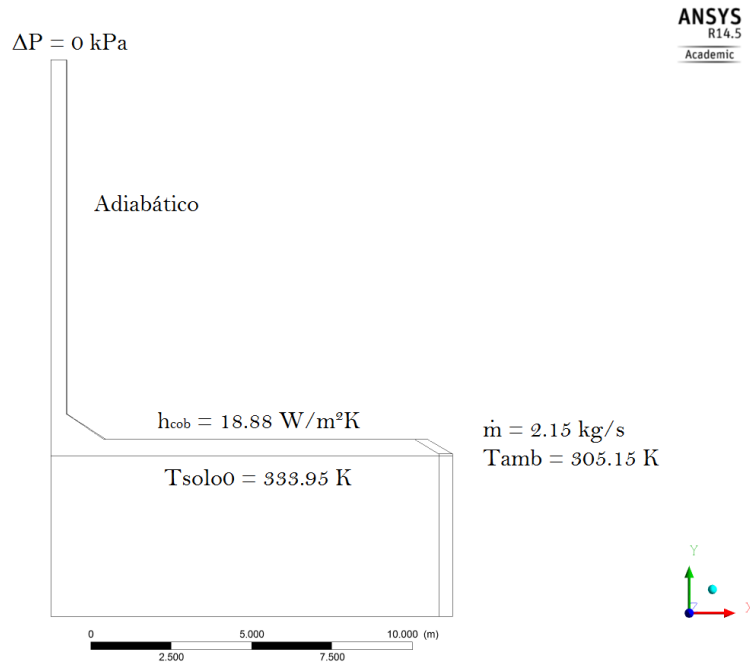


Figura 1. Representação das condições de contorno utilizadas.

Conforme observado experimentalmente, a superfície do solo apresenta comportamento isotérmico. Com isso foi definida uma condição de contorno de temperatura prescrita para o solo, em substituição às reais condições de insolação na chaminé solar. De acordo com Maia

(2005) considerando-se o solo como um meio semi-infinito, a temperatura em uma posição bastante afastada da superfície é igual à média anual da temperatura ambiente para a cidade analisada. Assumiu-se que no instante inicial ($t = 0$) todo o solo se encontrava a esta mesma temperatura. A partir dos dados experimentais, foram determinadas a temperatura de entrada do ar na chaminé solar, a temperatura do solo e a vazão mássica. Segundo Maia (2005), o fluxo de ar no interior da torre pode ser considerado adiabático, uma vez que a mesma foi isolada termicamente [17]. A transferência de calor por convecção sobre a cobertura foi estimada a partir de coeficiente de transferência de calor determinado por Castro Silva (2014) [18].

A Figura 1 mostra as condições de contorno utilizadas no problema. Para reduzir o esforço computacional optou-se por simular uma fatia de 15° de revolução, utilizando para tal a condição de simetria nas faces laterais. O software ANSYS - CFX 14.5 foi utilizado em um computador Intel Xeon com 32 Gb de memória. Foi feito um teste de malhas, sendo a convergência do problema avaliada por meio de seis variáveis, a temperatura no interior da cobertura (T_{cob}), a temperatura no interior da torre (T_{chi}), a temperatura superficial do solo no interior do dispositivo (T_{solo0}), a temperatura no interior do solo equivalente a 0,02, 0,05 e 0,30 m de profundidade, sendo estes: $T_{solo0.02}$, $T_{solo0.05}$ e $T_{solo0.30}$, respectivamente. O tempo de simulação variou entre 2 horas e 7 minutos e 45 horas e 8 minutos para as malhas avaliadas.

4. RESULTADOS

O principal objetivo do presente trabalho é a avaliação da influência da espessura utilizada para o solo na simulação numérica. Esta análise é importante devido ao funcionamento da chaminé solar durante um período de 24 horas. Durante o dia, a radiação solar incidente no dispositivo aquece a superfície do solo, que transfere calor por convecção para o ar no interior da cobertura, sendo uma parcela transferida para as camadas mais profundas do solo. Durante a noite, o sentido do fluxo de calor é invertido. Parte da energia armazenada no solo durante o dia é liberada para o ar no interior da cobertura durante a noite.

O solo sob a cobertura pode ser avaliado como um sólido semi-infinito, caracterizado como um sólido que se estende ao infinito em todas as direções, exceto uma. Se uma mudança repentina nas condições for imposta a essa superfície, ocorrerá a condução unidimensional transiente de calor no interior do sólido. De maneira geral, essa idealização é utilizada para determinar a transferência de calor transiente perto da superfície da Terra [19]. Em simulações numéricas, quanto maior a espessura do solo utilizada, mais precisa a solução. No entanto, maiores dimensões requerem maiores tempos computacionais. A definição de uma espessura adequada é de fundamental importância para um equilíbrio entre acurácia e custo computacional.

No presente trabalho, foram efetuadas simulações para diferentes valores de profundidade do solo, variando entre 0,3 m e 10 m. Verificou-se que os resultados que mais se aproximaram dos dados experimentais foram obtidos para uma profundidade do solo de 5 m.

A Figura 2 apresenta uma comparação entre os resultados teóricos (obtidos a partir da Equação 7), experimentais e numéricos (para uma profundidade do solo de 5 m), para análises em regime permanente e em regime transiente, da temperatura ao longo da profundidade do solo. Observa-se que a análise em regime permanente não é capaz de reproduzir com fidelidade os resultados experimentais e teóricos, apresentando uma variação bem pequena da temperatura ao longo da profundidade do solo. Os valores numéricos e teóricos se aproximaram mais dos resultados experimentais. Como foi imposta uma condição de temperatura constante na superfície do solo, o que não acontece de fato no protótipo experimental, algumas diferenças foram observadas. As discrepâncias podem também ser atribuídas a valores incorretos para as propriedades do solo usados tanto na análise numérica como na análise teórica.

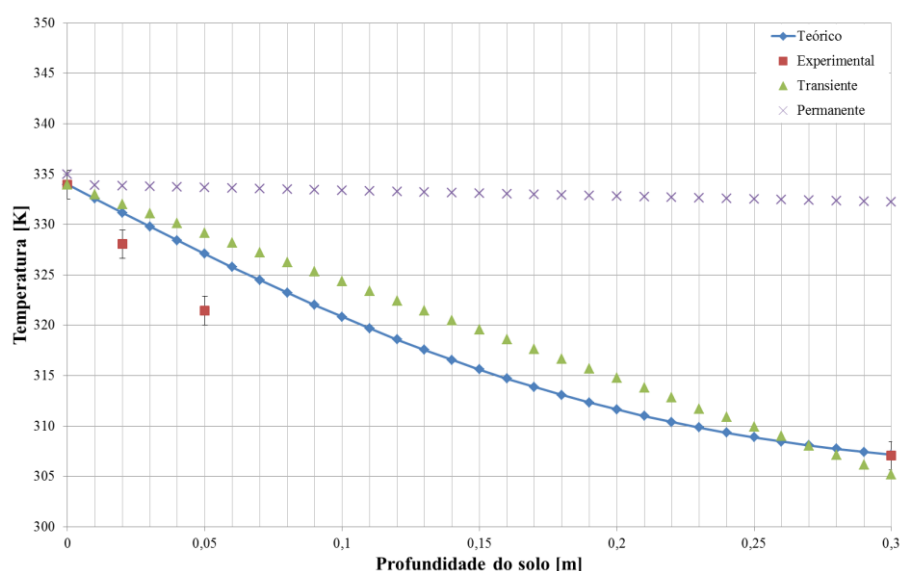


Figura 2. Representação gráfica da variação da temperatura ao longo da profundidade do solo.

A massa de ar que entra no dispositivo é acelerada devido à redução de área que ocorre na seção radial da cobertura. Este comportamento pode ser observado na Figura 3, que mostra o perfil de velocidades em um raio correspondente à metade do raio da cobertura. Observa-se que a velocidade é nula em contato com as paredes e apresenta seu valor máximo mais próximo ao solo. Os valores tão baixos são justificados pela natureza do escoamento, gerado por convecção natural.

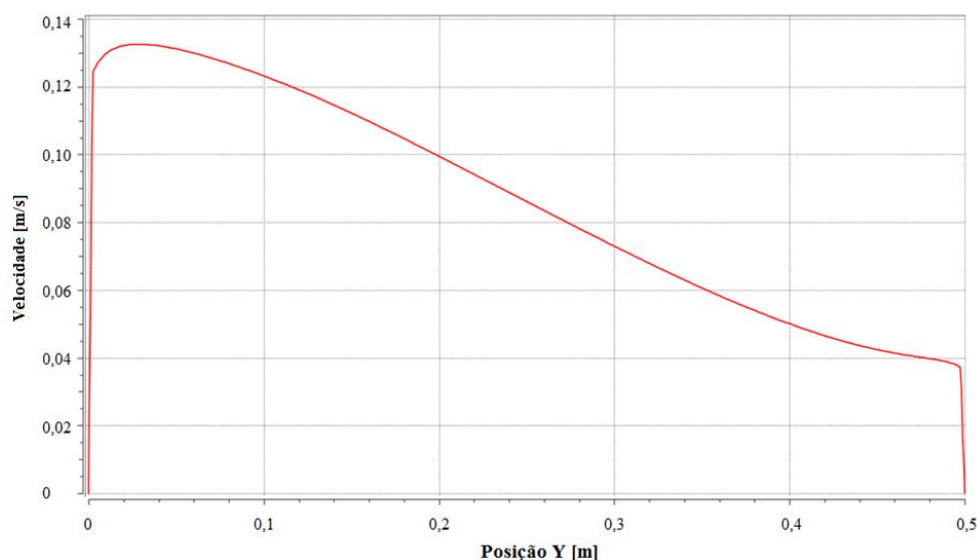


Figura 3. Representação gráfica do perfil de velocidade na cobertura

Após deixar a cobertura o ar se desloca para a junção, que é a ligação entre o coletor e a torre. Nesta região, ocorre uma mudança de direção do escoamento, que deixa de ser radial para se tornar axial. Além disso, como a área de escoamento se torna menor, há um aumento da velocidade na junção. Na região da chaminé, como a área de escoamento é constante, observa-se uma velocidade média constante, embora sejam observadas pequenas variações no perfil, uma vez que o escoamento ainda não se desenvolveu completamente. A Figura 4 apresenta o perfil de velocidades na altura média da chaminé, representada em função do raio ($0 \leq r \leq R$). Observa-se que a velocidade média é da ordem de 2.5 m/s, com números de Reynolds da ordem de 1×10^5 . Estes valores são característicos de escoamentos turbulentos, para os quais se observam perfis achatados como o observado na figura.

A Figura 5 mostra as linhas de corrente no interior da chaminé solar, para a análise em regime permanente e em regime transiente. Tal como indicado na literatura (Fasel et al, 2013), para as duas condições foi observada a presença de separação local na entrada da chaminé. Para a análise transiente observa-se no interior da cobertura a presença de rolos longitudinais de Rayleigh-Bénard-Poiseuille (RBP) de acordo com Fasel et al., 2013 somente em simulações detalhadas no tempo para chaminés solares são capazes de demonstrar a instabilidade de RBP para o escoamento no interior do coletor. Já que a instabilidade de RBP não é caracterizada apenas devido a presença do gradiente de temperatura mas também devido a presença de um gradiente de pressão que induz o deslocamento do fluido na direção horizontal. Na análise permanente as recirculações observadas são ocasionadas principalmente devido a mudança de direção do fluxo.

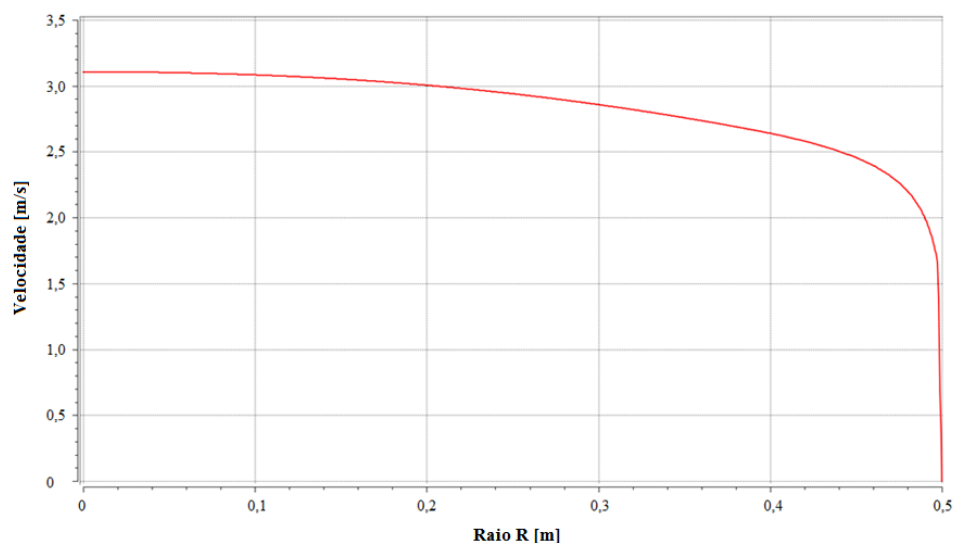


Figura 4. Representação gráfica do perfil de velocidades na chaminé.

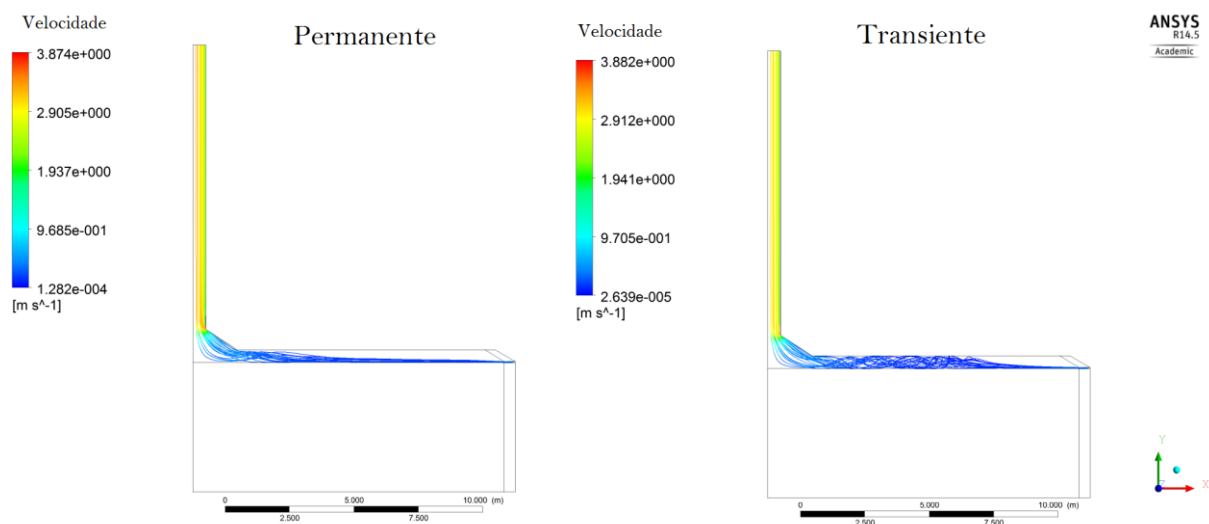


Figura 5. Representação das condições de contorno utilizadas.

A distribuição de temperaturas ao longo da chaminé solar é muito importante e deve ser analisada cuidadosamente, principalmente quando se avalia a influência das condições de contorno e de regime de escoamento. A Figura 6 apresenta o perfil de temperaturas na cobertura, em uma posição correspondente à metade do raio. A temperatura é máxima na região próxima ao solo ($y = 0$), reduzindo em direção à cobertura. Excetuando-se as temperaturas na superfície do solo e na cobertura, as diferenças de temperatura do ar dentro da cobertura apresentaram uma amplitude de aproximadamente 5 K, responsável pela

variação de densidade do ar no interior do dispositivo gerando as forças de empuxo responsáveis pelo movimento ascendente do fluido.

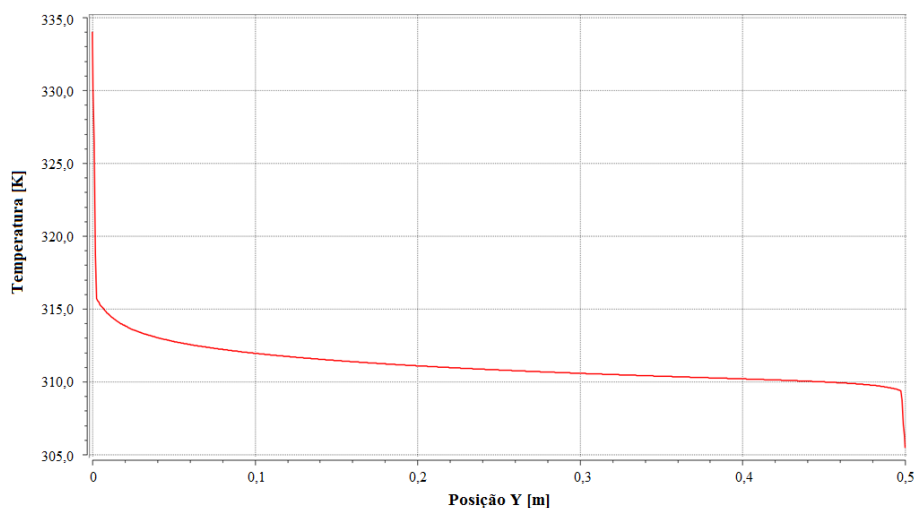


Figura 6. Representação gráfica do perfil de temperatura na cobertura

A Figura 7 apresenta o perfil de temperaturas na chaminé, em uma altura correspondente à metade da altura da torre. Como o ar chega à torre aquecido pelo solo, as maiores temperaturas são encontradas na linha de centro. A condição de contorno utilizada para as paredes da torre foi de isolamento térmico, o que justifica as pequenas diferenças de temperatura obtidas em uma dada seção transversal, da ordem de 0,6 K.

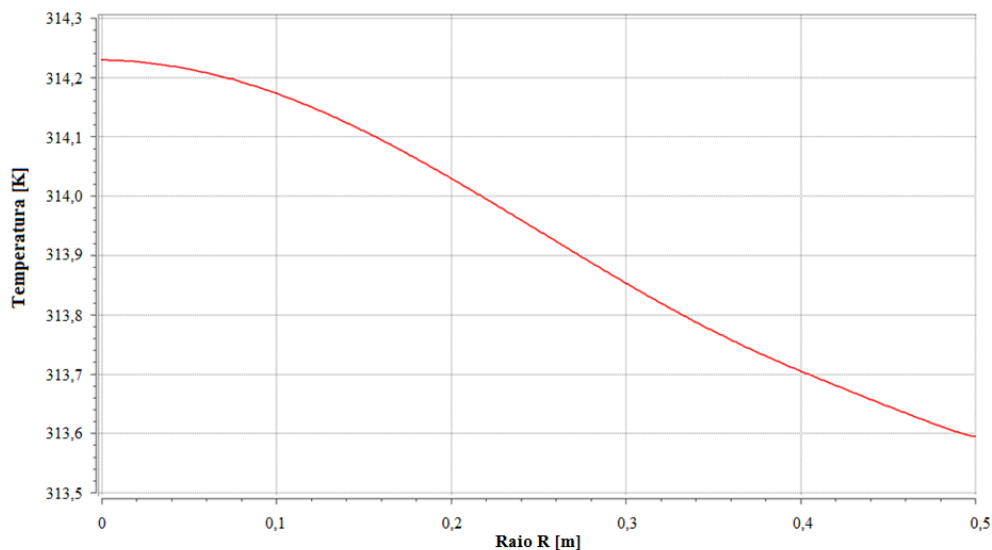


Figura 7. Representação gráfica do perfil de temperatura na chaminé.

A Figura 8 apresenta o plano de temperaturas em todo o domínio de solução, incluindo o ar no interior da chaminé solar e o solo, para as condições de regime permanente e transiente. Observa-se que a análise permanente prevê temperaturas mais elevadas na junção e na chaminé em relação à análise transiente. Na análise permanente a diferença máxima de temperaturas obtidas foi de 29 K, enquanto na análise transiente foi de aproximadamente 17 K. Em ambas as situações, pode-se perceber o aquecimento do ar sob a cobertura em direção à chaminé e as pequenas variações de temperatura na direção axial na torre, causadas pela condição de contorno de isolamento térmico. Observa-se ainda que a análise permanente prevê um maior gradiente de temperaturas na direção radial na torre.

Para o solo, a análise em regime transiente obteve um maior gradiente de temperaturas na região mais próxima do solo, tendendo a atingir a temperatura ambiente em uma pequena profundidade. A análise em regime permanente obteve uma distribuição linear de temperaturas, condizente com a solução teórica da equação de conservação da energia para regime permanente.

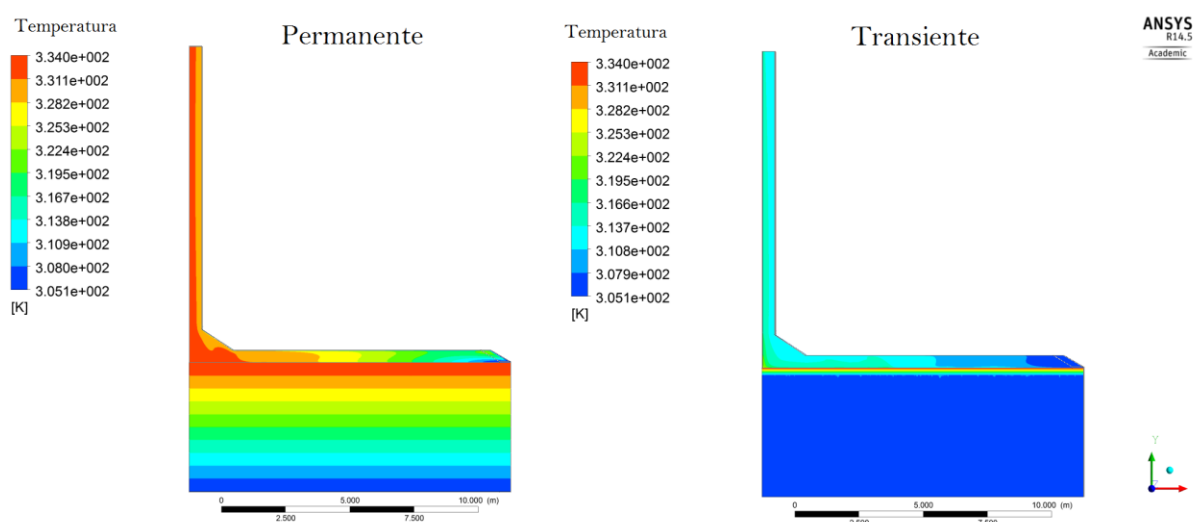


Figura 8. Variação da temperatura ao longo da profundidade do solo.

Quando os resultados são confrontados com os resultados experimentais (Fig. 9), obtêm-se erros máximos de 3.80% e 3.45% para a temperatura a cobertura e a chaminé, respectivamente, para a análise permanente e de 1.93% e 0.26% para a temperatura a cobertura e a chaminé, respectivamente, para a análise transiente. Pode-se concluir, portanto, que a análise transiente é mais confiável e deve ser preferida à análise em regime permanente.

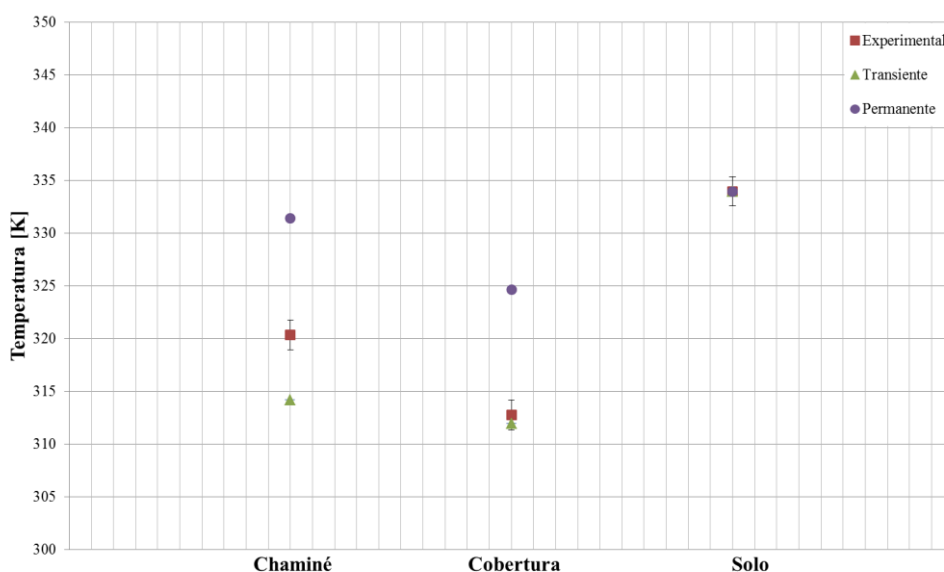


Figura 9. Variação da temperatura ao longo do dispositivo.

CONCLUSÕES

Foi realizada a simulação numérica do escoamento turbulento no interior de uma chaminé solar de pequenas dimensões, sendo comparadas as análises em regime permanente e transiente. Os resultados foram comparados com dados experimentais de temperatura em diferentes profundidades do solo provenientes de um protótipo com as mesmas dimensões construído na cidade de Belo Horizonte/Brasil. Observou-se que os resultados em regime transiente se aproximaram mais dos resultados teóricos esperados e de dados experimentais. As principais conclusões do trabalho foram:

- (1) A adoção de hipótese de sólido semi-infinito para o solo deve ser considerada na simulação numérica. Caso contrário, perdas de calor significativas deixariam de ser consideradas;
- (2) A profundidade do solo utilizada é um fator importante na simulação numérica. Para o problema estudado, uma profundidade de 5 m foi considerada ideal, por fornecer os valores mais próximos dos obtidos experimentalmente;
- (3) A análise em regime permanente forneceu menores valores de velocidade e maiores valores de temperatura do escoamento, quando comparados aos valores obtidos na análise em regime transiente. Além disso, os gradientes de temperatura obtidos na chaminé também foram maiores;

- (4) A análise em regime permanente não foi capaz de prever com fidelidade a distribuição de temperatura no solo, fornecendo uma distribuição linear de temperaturas ao longo da profundidade do solo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, à FAPEMIG, ao CNPq e à PUC Minas.

REFERÊNCIAS

- [1] Editorial. State of the art on renewable and sustainable energy. *Energy*, Vol.61, pp. 2-5, 2013.
- [2] Schlaich, J. *The Solar Chimney: Electricity from the Sun*, 1 ed. Stuttgart: Axel Menges, 1995.
- [3] Koonsrisuk, A.; Chitsomboon, T. Effects of flow area changes on the potential of solar chimney power plants. *Energy*, Vol. 51, pp. 400-406, 2013.
- [4] Chergui, T.; Larbi S, Bouhdjar A. Thermo-hydrodynamic aspect analysis of flows in solar chimney power plants - A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, p. 1410–1418, 2010.
- [5] Vahl, D. G. Natural convection of air in a square cavity: A Benchmark numerical solution. *International Journal Numeric Methods Fluids*, v.3, p. 249–64, 1983.
- [6] Tingzhen, M.; Wei, L.; Guoling, X.; Yanbina, X.; Xuhua, G.; Yuan, P. Numerical simulation of the solar chimney power plant systems coupled with turbine. *Renewable Energy*; v. 33, p. 897–905, 2008.
- [7] Tingzhen, M., Liu,T., Pan,W. Y.; Xu, G. Numerical analysis of flow and heat transfer characteristics in solar chimney power plants with energy storage layer. *Energy Conversion Management*, v. 49, p. 2872-2879, 2008.
- [8] Koonsrisuk, A.; Chitsomboon, T. A single dimensionless variable for solar chimney power plant modeling. *Solar Energy* v. 83, p. 2136-2143, 2009.
- [9] Maia, C.B.; Ferreira, A.G.; Valle, R.M. and Cortez, M.F.B. Theoretical evaluation of the influence of geometric parameters and materials on the behavior of the airflow in a solar chimney, *Computers & Fluids*, Vol. 38, pp. 625-636, 2009.
- [10] Xu, G.; Ming, T.; Pan, Y.; Meng, F. and Zhou, C. Numerical analysis on the performance of solar chimney power plant system. *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, pp. 876–883, 2011.
- [11] Sangi, R.; AMIDPOUR, M.; HOSSEINIZADEH, B. Modeling and numerical simulation of solar chimney power plants. *Solar Energy*, v. 85, n. 5, p. 829-838, 2011.
- [12] Ansys, CFX Solver Theory manual - Version 14.5, 2012.
- [13] Versteeg, H.K.; Malalasekera, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method*, 2.ed. Essex: Pearson Education Limited, 503p, 2007.
- [14] Fasel, H.F.; Meng, F.; Shams, E.; Gross, A. CFD analysis for solar chimney power plants. *Solar Energy*, vol. 98, pp. 12–22, 2013.

- [15] Cengel, Y.A.; Ghajar, A.J. Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications, 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [16] Ferreira, A.G. Estudo de Viabilidade Técnica da Utilização de uma Chaminé solar como Secador de Alimentos. Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte- Brasil, 2004.
- [17] Maia, C. B. Análise Teórica e Experimental de uma Chaminé solar: Avaliação Termofluidodinâmica. Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte – Brasil, 2005.
- [18] Castro Silva, J.O. Modelagem do Escoamento de Ar e Otimização de uma Chaminé Solar. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte – Brasil, 2014.
- [19] Incropera, F. P.; DeWitt, D. P.; Bergman, T. L.; Lavine, A. S. Fundamentos de transferência de calor e de massa. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.