

ANÁLISE NUMÉRICA DO ESCOAMENTO REAL DE AR EM UMA CHAMINÉ SOLAR

André G. Ferreira - ferreira@demec.ufmg.br

Márcio F.B. Cortez - fonteboa@demec.ufmg.br

Ramón M. Valle - ramon@demec.ufmg.br

Cristiana S. Brasil - tite@demec.ufmg.br

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Antônio Carlos, n° 6627- cep: 31270-901 - Belo Horizonte, MG, Brasil.

Resumo. *Este trabalho apresenta uma análise numérica da convecção natural turbulenta de ar sob condições reais de insolação no interior de uma chaminé solar. As chaminés solares são dispositivos constituídos por uma cobertura radial transparente e por uma torre tubular localizada em seu centro. Parte da radiação solar incidente sobre a cobertura é absorvida pelo solo, aquecendo o ar dentro da estufa e induzindo um escoamento ascendente na torre. Na tentativa de se aproximar mais das condições reais de insolação, foi desenvolvido um modelo que permite avaliar a temperatura do solo em função de um balanço energético envolvendo a radiação solar incidente. O escoamento é descrito pelas equações de conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia, além das equações de transporte das grandezas do modelo de turbulência (k e ϵ). Um código computacional utilizando a técnica de Volumes Finitos em Coordenadas Generalizadas foi desenvolvido para a solução destas equações. São apresentados parâmetros adimensionais de saída do escoamento em função do horário e das condições de insolação, além do comportamento transiente da temperatura da superfície do solo.*

Palavras-chave: *Chaminé solar, Turbulência, Energia solar*

1. INTRODUÇÃO

A chaminé solar é constituída de uma torre central tubular, fixada, em sua base, a uma estufa circular aberta nas extremidades (Fig. 1). Durante o dia, parte da radiação solar incidente sobre a cobertura é absorvida pelo solo e transformada em energia térmica. O ar dentro da estufa é aquecido pelo chão, gerando-se um escoamento ascendente na torre devido a forças de empuxo, criadas por gradientes de densidade do fluido. O ar quente que deixa a chaminé é continuamente substituído por ar a temperatura ambiente que esco radialmente da periferia para o centro do sistema. À noite, parte da energia térmica armazenada pelo solo durante o período de insolação é transferida ao escoamento de ar, permitindo o funcionamento ininterrupto da chaminé solar.

A chaminé solar tem sido, tradicionalmente, usada para geração elétrica. A geração elétrica é obtida através de uma turbina eólica instalada na base da chaminé, acoplada a um

gerador elétrico (Schlaich, 1995). Segundo Bernardes (1999), uma possibilidade que se descortina seria a utilização do ar quente para secagem (desidratação de frutas e de grãos na agricultura ou em qualquer outra atividade industrial que demande ar quente para remoção de umidade).

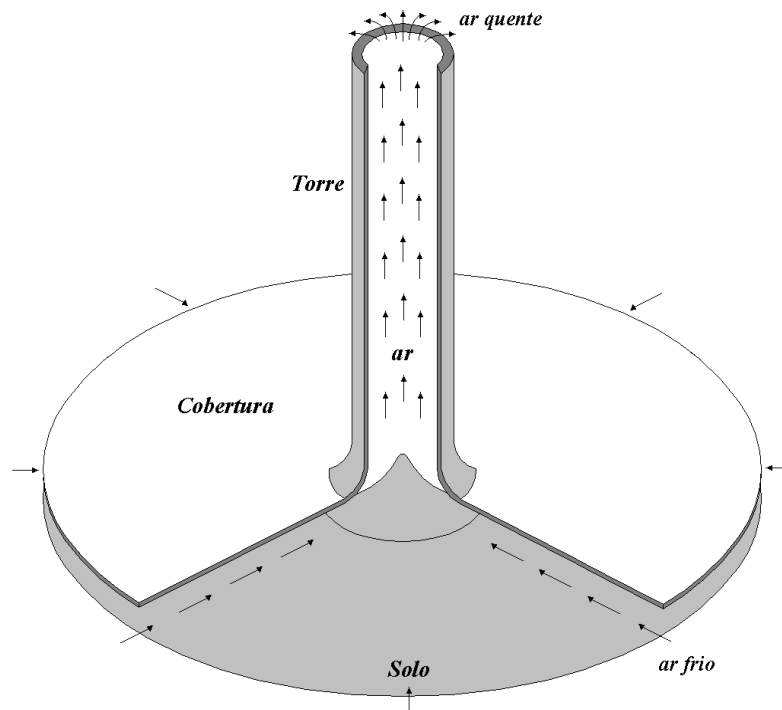


Figura 1. Esquema da Chaminé Solar

O objetivo deste trabalho é analisar o escoamento turbulento transiente de ar em convecção livre turbulenta no interior de uma chaminé solar, sob condições reais de insolação. O modelo matemático envolve as equações de conservação da quantidade de movimento e da energia, além das equações de transporte para as grandezas turbulentas (k e ϵ). A temperatura do solo foi estimada a partir de um modelo transiente (Ferreira, 2000) para simulação de condições reais de insolação. Para resolver o sistema de equações de conservação foi desenvolvido um código computacional utilizando o Método dos Volumes Finitos em Coordenadas Generalizadas.

Apresenta-se o comportamento do escoamento em função do horário e das condições de insolação locais, possibilitando a avaliação do comportamento transiente da temperatura do solo e dos números de Reynolds e de Rayleigh.

2. MODELO MATEMÁTICO

O modelo adotado considera o escoamento turbulento em regime transiente, com condições reais de insolação. As hipóteses admitidas para a solução do problema baseiam-se em escoamento incompressível do ar (densidade constante), fluido Newtoniano, propriedades constantes, ausência de dissipação viscosa e de geração de calor. É utilizada a hipótese de gás perfeito no desenvolvimento da aproximação de Boussinesq para os termos de empuxo das equações da quantidade de movimento na direção axial, da energia cinética turbulenta e da dissipação da energia cinética turbulenta.

As equações de conservação da massa, da quantidade de movimento nas direções x e r e da energia, escritas para as grandezas médias, num sistema axissimétrico de coordenadas, obedecendo às hipóteses admitidas, são dadas, respectivamente, por

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho u v) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_e \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_e \frac{\partial v}{\partial r} \right) + g \rho_0 \beta (T - T_0) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v v) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_e \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_e \frac{\partial v}{\partial r} \right) - 2 \mu_e \frac{v}{r^2} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u T) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v T) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \\ \frac{\beta T}{c_p} \left[\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v) - \rho \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\rho}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r v) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

Para consideração das propriedades turbilhonares, foi utilizado o modelo k - ϵ padrão de turbulência com funções de parede (Launder & Spalding, 1974), representado por 2 novas equações diferenciais para a energia cinética turbulenta (k) e para dissipação da energia cinética turbulenta (ϵ)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u k) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v k) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial r} \right) + P_k + G_k - \rho C_d \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \epsilon) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_e}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial r} \right) + \frac{C_1 \epsilon}{k} (P_k + G_k) (1 + 0,8 R_f) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

onde P_k (termo de produção de energia cinética turbulenta) é dado por

$$P_k = \mu_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{v}{r} \right)^2 \right] \quad (7)$$

Os termos G_k e $(1+0,8R_f)$ dados por Rodi (1993), traduzem a influência do empuxo no escoamento,

$$G_k = -\frac{\beta g}{\rho} \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (8)$$

$$R_f = \begin{cases} 0 & \text{p/ canais verticais} \\ -\frac{G_k}{P_k + G_k} & \text{p/ canais horizontais} \end{cases} \quad (9)$$

Neste modelo, μ_t não é uma propriedade do fluido, e sim uma indicação do nível de turbulência local.

$$\mu_t = \rho C_\mu C_D \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (10)$$

Supõe-se que, na subcamada turbulenta, os fluxos da quantidade de movimento e calor obedeçam às relações

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) \quad (11)$$

$$T^+ = \frac{Pr_t}{\kappa} \ln(Ey^+) + Pr_t \frac{\pi/4}{\sin(\pi/4)} \left(\frac{A_1}{\kappa} \right)^{1/2} \left(\frac{Pr}{Pr_t} - 1 \right) \left(\frac{Pr}{Pr_t} \right)^{1/4} \quad (12)$$

As constantes do modelo de turbulência são dadas na Tabela 1

Tabela 1. Constantes do modelo k-ε

c_μ	C_D	c_1	c_2	σ_k	σ_ε	κ	E	A
0,09	1,0	1,44	1,92	1,0	1,3	0,4187	9,793	26,0

A partir de balanços energéticos podem-se estabelecer as condições de contorno térmicas para o chão e para a cobertura. Para a radiação absorvida pelo chão, utiliza-se um modelo similar ao proposto em Duffie e Beckman (1991) para coletor solar plano. Neste modelo, a radiação absorvida por uma superfície horizontal, segundo o modelo isotrópico de céu, leva em conta uma parcela de radiação direta e uma parcela de radiação difusa.

$$q_{\text{rad}}'' = I_b (\tau\alpha)_b + I_d (\tau\alpha)_d \quad (13)$$

onde I_b e I_d são as componentes direta e difusa da radiação incidente sobre o coletor e os produtos $\tau\alpha$ representam a frações destas radiações incidentes que serão absorvidas pelo chão.

O solo pode ser tratado como um meio semi-infinito, sendo a transferência de calor que nele ocorre descrita pela equação diferencial parcial

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha'} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{onde} \quad \alpha' = \frac{K_{\text{solo}}}{\rho_{\text{solo}} C_{p_{\text{solo}}}} \quad (14)$$

Condição de contorno e condição matemática

$$-K_{\text{solo}} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_{\text{liq}}''(t) \quad \text{e} \quad \lim_{x \rightarrow \infty} T(x, t) = T_i \quad (15)$$

Condição inicial

$$T(x,0) = T_i \quad (16)$$

Utilizando a solução exata de Özisik (1993) para a equação diferencial parcial de condução térmica no solo, obtém-se, para a superfície do solo, a seguinte expressão

$$T_{\text{solo}}(t) = T_i + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\alpha'}{K_{\text{solo}}} \int_{t'=0}^t \frac{q''_{\text{liq}}(t')}{\sqrt{4\alpha'(t-t')}} dt' \quad (17)$$

onde α' e K_{solo} representam a difusividade e condutividade térmicas do solo, respectivamente, T_i a temperatura inicial do solo, t o tempo e q''_{liq} a diferença entre o fluxo de calor de radiação absorvido pelo solo e o fluxo de calor perdido para o escoamento.

O domínio de solução é mostrado na Fig. 2. Dada a hipótese de simetria, resolve-se o problema apenas para metade da geometria. A fronteira leste é uma região de saída de massa, na qual se impõe o regime completamente desenvolvido para temperatura, velocidade, k e ε . A fronteira oeste corresponde à entrada de massa, a temperatura ambiente T_o e com a velocidade atualizada a cada iteração do procedimento numérico pela equação da conservação da massa aplicada entre os volumes de controle vizinhos. Os valores de k e ε são calculados a partir da velocidade v de entrada.

Na fronteira sul, o eixo da chaminé apresenta condições de simetria, a região externa da junção envolve condições de não deslizamento e de isolamento térmico e o solo, além da condição de velocidade nula, mostra condições de temperatura prescrita, de acordo com o modelo de insolação. Na região de parede e de simetria, k e ε apresentam fluxo nulo. Na fronteira norte, para a parede da torre e a face da junção consideram-se condições de não deslizamento e de isolamento térmico. Na cobertura são impostas condições de velocidade nula e de perdas convectivas e radiativas para o vento a temperatura ambiente T_o . Toda a fronteira é região de parede, apresentando fluxo nulo de k e de ε .

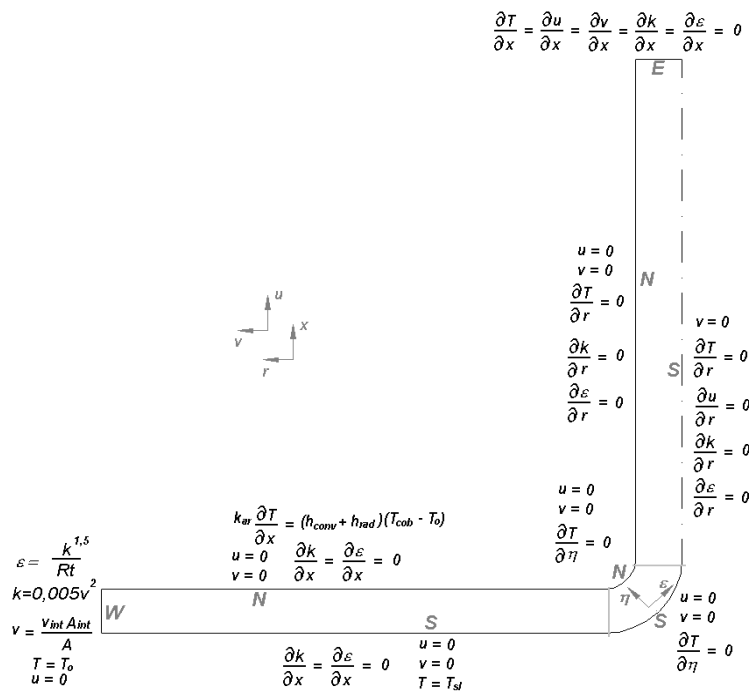


Figura 2. Domínio de solução do problema

3. METODOLOGIA COMPUTACIONAL

A geração da malha fez-se mediante um sistema de equações diferenciais elípticas. A solução numérica do sistema de equações foi efetuada pelo método de Volumes Finitos em Coordenadas Generalizadas. Nesta metodologia, para um sistema bidimensional, as equações de conservação são transformadas do sistema cilíndrico de coordenadas (x,r) para o sistema de coordenadas curvilíneas (ξ,η). Desta forma, a equação geral transformada é dada por Maliska (1995)

$$\begin{aligned} & \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \eta} (\rho r U \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \epsilon} (\rho r V \phi) \\ & = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[r J \Gamma^\phi \gamma \frac{\partial \phi}{\partial \eta} - r J \Gamma^\phi \beta \frac{\partial \phi}{\partial \epsilon} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \epsilon} \left[r J \Gamma^\phi \alpha \frac{\partial \phi}{\partial \epsilon} - r J \Gamma^\phi \beta \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right] + \frac{S^\phi}{J} \end{aligned} \quad (18)$$

onde U e V são as componentes contravariantes da velocidade, J é o jacobiano da transformação e α, β e γ são os componentes do tensor métrico (Maliska, 1995).

O método SIMPLEC (*Semi Implicit Linked Equations Consistent*) foi utilizado para o acoplamento pressão-velocidade. O método de interpolação WUDS (*Weighted Upstream Differencing Scheme*) e o arranjo desencontrado para armazenamento das variáveis foram adotados. Desta forma, a equação discretizada para cada volume elementar P é dada por:

$$A_P \phi_P = A_e \phi_E + A_n \phi_N + A_w \phi_W + A_s \phi_S + A_{ne} \phi_{NE} + A_{nw} \phi_{NW} + A_{se} \phi_{SE} + A_{sw} \phi_{SW} + B \quad (19)$$

A aplicação das condições de contorno realizou-se com a técnica dos volumes fictícios. A equação anterior vale para todos os volumes internos do domínio. Devem ser criadas, portanto, equações para os volumes fictícios em função das condições de contorno existentes. É natural escrever tais equações na mesma forma das equações para os volumes internos (Maliska, 1995).

4. RESULTADOS

A chaminé solar analisada neste trabalho apresenta uma torre com 1m de diâmetro e 20m de comprimento e uma cobertura com um diâmetro de 24m, mantida a 0,5m acima do chão. A junção possui raios interno e externo de, respectivamente, 0,5m e 1m. Na análise numérica, foi adotada uma malha no espaço de 22 x 22 volumes, após a realização de um teste onde os valores dos campos de velocidade, temperatura, pressão e grandezas turbulentas não apresentaram alterações significativas com o aumento do número de volumes de controle. A malha no tempo sofreu teste similar, sendo adotado o incremento de 60s para o processo de marcha da solução transiente.

Para o modelo simulado no presente trabalho não foi encontrada nenhuma solução analítica, numérica ou experimental que representasse de forma eficaz o fenômeno da convecção natural turbulenta em qualquer geometria com entrada e saída de massa. Por este motivo, foi realizada apenas a validação numérica do modelo utilizado para um fenômeno parcialmente semelhante, através da reprodução de dados experimentais de Carr et al. (1973) para a convecção mista turbulenta em tubos verticais.

Como condição inicial, adotaram-se os campos de velocidade, temperatura e grandezas turbulentas (k e ε) obtidos da solução do escoamento turbulento em regime permanente, com o solo e a cobertura a temperaturas constantes de 300,9K e 300K, respectivamente.

Foram utilizados dados de insolação para Belo Horizonte, vidro na cobertura e areia no solo. O horário adotado para a inicialização do escoamento no dia de simulação foi coincidente com o início do período de brilho solar, isto é, 6:37h para 15 de junho e 5:47h para 15 de outubro. Devido ao grande esforço computacional necessário para a simulação de um ciclo diário completo (24 horas), os resultados se restringem às 6 horas iniciais de simulação. Os valores para a radiação média mensal para os meses de junho e outubro são, respectivamente, $H_j=14,52\text{MJ/m}^2$ e $H_o=19,32\text{MJ/m}^2$ e para o índice de transparência, $K_{tj}=0,6$ e $K_{to}=0,5$. A temperatura ambiente (T_o) foi mantida constante em 300K, durante toda a simulação.

A Figura 3 apresenta o comportamento do modelo de insolação, elaborado por Ferreira (2000), para determinar a temperatura da superfície do solo para os dias 15 de junho (Fig. 3a) e 15 de outubro (Fig. 3b). Observa-se, na Fig. 3, o comportamento dinâmico do fluxo de calor por radiação solar absorvido pela superfície do solo e do fluxo líquido de calor armazenado pelo solo. Percebe-se que, no período noturno, o solo libera, para o escoamento no interior da chaminé solar, a energia armazenada durante o dia.

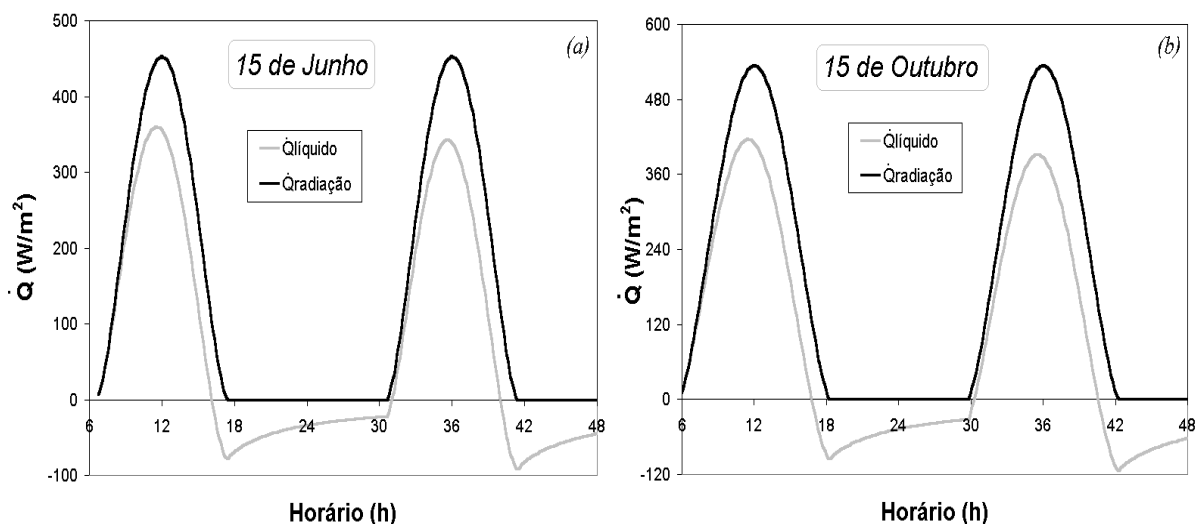


Figura 3. Comportamento do Modelo Real de Insolação

O fluxo líquido de calor armazenado pelo solo depende do fluxo de calor transferido do solo para o escoamento, obtido apenas através da simulação numérica do escoamento. Portanto, foi necessária a criação de uma condição hipotética para o cálculo do calor transferido do solo ao escoamento durante as 42 horas de simulação (Figura 3). Esta condição, baseada na observação das 6 horas de simulação numérica do escoamento no interior da chaminé solar, considerava uma troca difusiva de calor entre o solo e o ar a uma temperatura ($T=0,8.T_o+0,2.T_{\text{solo}}$).

A Figura 4 apresenta o comportamento da temperatura para várias profundidades do solo arenoso, para os dias 15 de junho (Fig. 4a) e 15 de outubro (Fig. 4b). Percebe-se que as camadas mais profundas do solo demoram mais a sofrer o efeito da variação da temperatura da superfície do solo do que as camadas superficiais. Este comportamento pode ser explicado pela inércia térmica provocada pelas características termofísicas do solo, onde o fenômeno de condução de calor que nele ocorre.

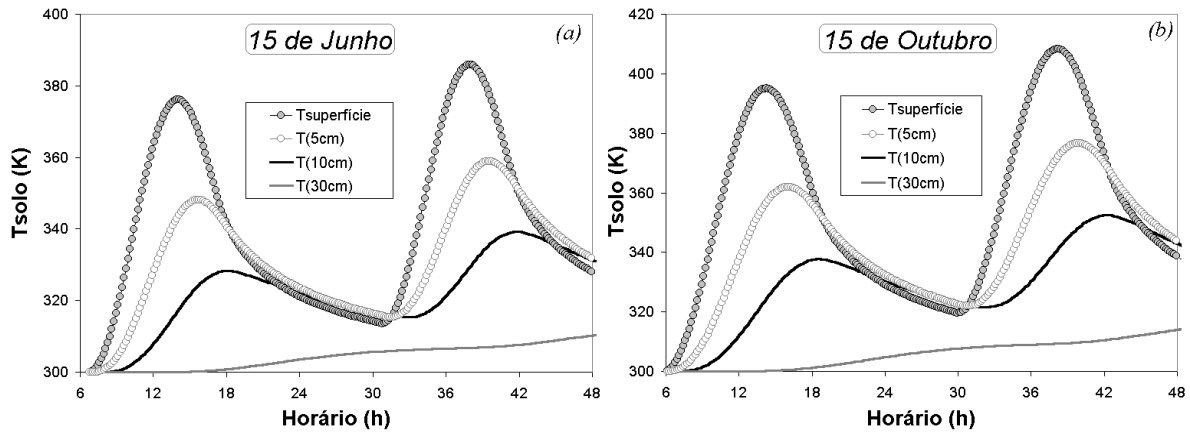


Figura 4. Temperatura do Solo em Junho (a) e Outubro (b)

A implementação das condições de contorno de insolação implica na determinação local e instantânea da temperatura da superfície do solo. A Figura 5a apresenta o comportamento da temperatura adimensional do solo com a posição radial na cobertura para o dia 15 de outubro. A temperatura do solo aumenta da periferia da cobertura para o centro do dispositivo, pois a perda de calor para o escoamento na periferia é maior. Além disso, observa-se um gradiente de temperatura no solo muito maior próximo à periferia do dispositivo, pois, nesta região de entrada, o gradiente de temperatura do escoamento também é maior. Este fenômeno é acentuado para maiores temperaturas do solo, pois, como o ar é admitido na chaminé solar à temperatura ambiente ($T_o=300K$), quanto maior a temperatura média do solo, maior a transferência de calor do solo para o ar na região de entrada. A Figura 5b apresenta a variação de temperatura do solo na entrada e saída da cobertura em função do horário. A temperatura do solo, para um determinado horário e posição na cobertura, é sempre maior no dia 15 de outubro do que no dia 15 de junho, em virtude de as condições de insolação para o mês de outubro mais favoráveis do que as para o mês de junho.

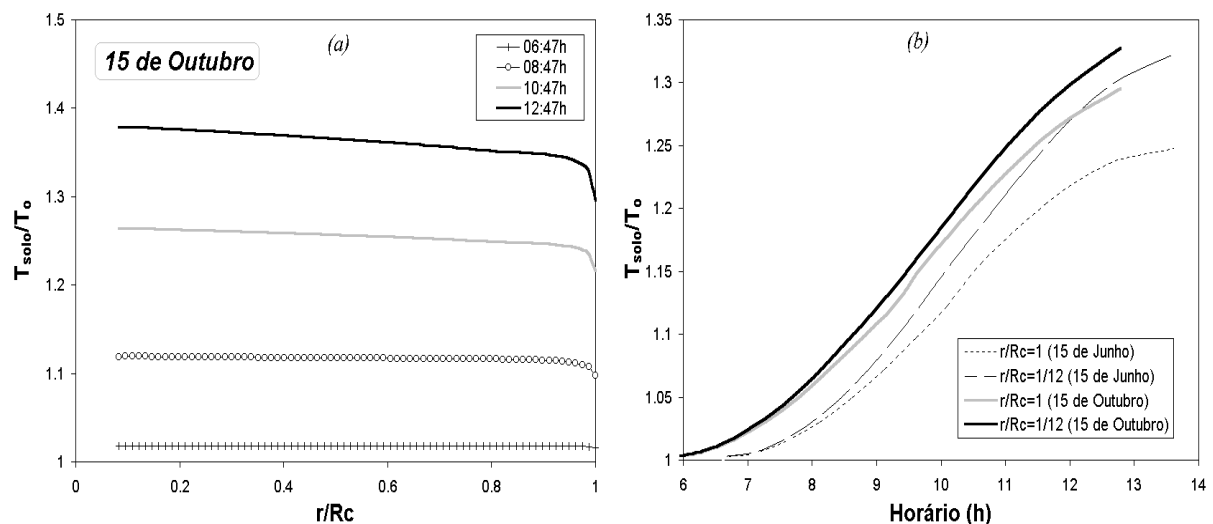


Figura 5. Variação da Temperatura do Solo na Cobertura para Junho (a) e Outubro (b)

O número de Reynolds, em função do horário para os dias simulados (Figura 6a), apresenta um crescimento ao longo da manhã, já que a temperatura do solo aumenta,

induzindo maiores forças de empuxo no escoamento e, conseqüentemente, maiores velocidades de saída. Para um mesmo horário, o número de Reynolds é maior no dia 15 de outubro, dada a maior temperatura do solo em qualquer horário. O número de Rayleigh, em função do horário para os dias simulados (Figura 6b), aumenta durante o período simulado, em razão da temperatura do solo e, conseqüentemente, da maior temperatura média de saída do escoamento.

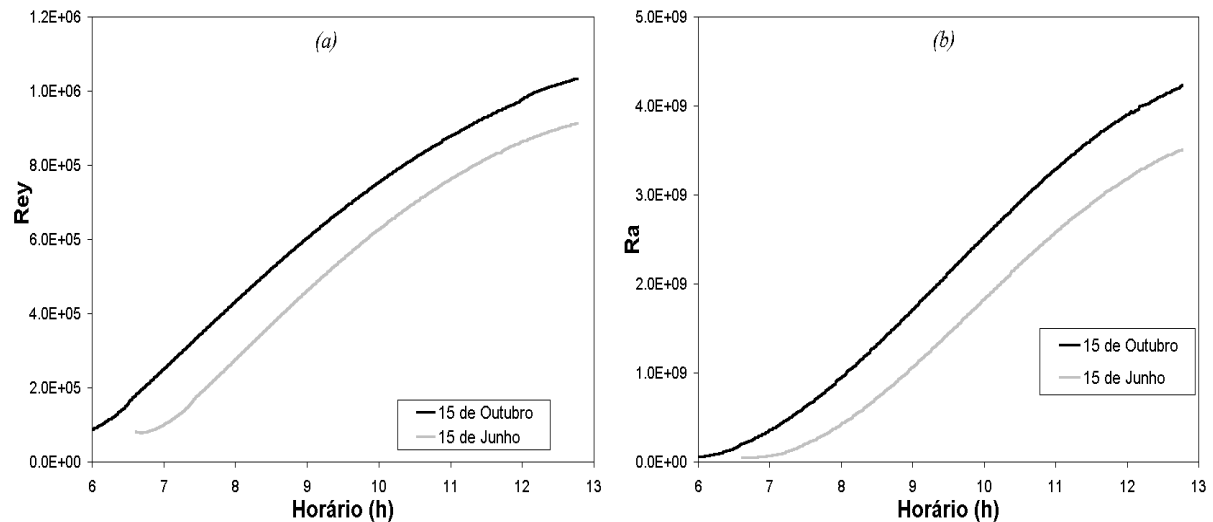


Figura 6. Variação dos números de Reynolds (a) e Rayleigh (b) com o horário

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo do comportamento dinâmico do escoamento turbulento de ar em convecção livre no interior de uma chaminé solar, sob condições reais de insolação, utilizando-se dados de radiação média mensal para a cidade de Belo Horizonte.

Foi desenvolvida uma metodologia numérica para a investigação do comportamento termo-hidrodinâmico do ar no interior do sistema. O escoamento foi descrito pelas equações de conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia, além das equações de transporte das grandezas do modelo de turbulência. Foi utilizado o modelo k- ϵ padrão com funções de parede para representação do fenômeno turbulento na análise do escoamento. A temperatura do solo foi estimada a partir de dados experimentais, em média mensal, da radiação incidente para a localidade escolhida.

Foi desenvolvido um programa computacional utilizando a técnica de Volumes Finitos em Coordenadas Generalizadas para a solução do sistema de equações representativas do modelo matemático.

Foram apresentados a variação da temperatura do solo com a posição e com o horário. Foi analisado também o comportamento dos números de Reynolds e de Rayleigh ao longo das 6 horas de simulação.

Para a simulação no dia 15 de junho (condição menos favorável de insolação para BH), do período inicial da manhã até às 13:37h, o escoamento atingiu uma velocidade média de saída de, aproximadamente, 13m/s e uma temperatura média de saída de, cerca de, 336K. É bom ressaltar que estes valores tendem a aumentar até que a temperatura do solo atinja seu valor máximo, logo após as 14 horas. Apesar de o período de simulação ter sido pequeno e o modelo de insolação utilizado ainda necessitar de algumas melhorias para uma representação mais precisa das condições reais, a magnitude dos valores de velocidade e de temperatura do escoamento apresentam uma perspectiva otimista quanto a utilização da chaminé solar para secagem e geração elétrica.

REFERÊNCIAS

- Bernardes, M.A. dos S.; Valle, R.M.; Cortez, M.F.B., 1999, Numerical Analysis of Natural Laminar Convection in a Radial Solar Heater, International Journal of Therm. Sci., Vol. 38, pp 42-50.
- Carr, A. D., Connor, M. A. and Buhr, H. O., 1973, Velocity, Temperature, and Turbulence Measurements in Air Pipe Flow with Combined Free and Forced Convection, J. Heat Transfer, ASME, vol.95, pp.445-452.
- Duffie, J. A. and Beckman, W. A., 1991, Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons, Inc. 2nd ed..
- Ferreira, A. G., 2000, Elaboração de uma Metodologia Numérica para a Análise Térmica de Chaminés Solares: Implementação de Condições Meteorológicas, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG.
- Lauder, B. E. e Spalding, D. B., 1974, The Numerical Computation of Turbulent Flows, Computer Methods in Applied Mechanics, vol 3, pp 269-289.
- Maliska, C.R. , 1995, Transferência de calor e Mecânica dos Fluidos Computacionais, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro.
- Özisik, M. N., 1993, Heat Conduction, Second Edition, John Wiley & Sons.
- Rodi, W., 1993, Turbulence Models and their Application in Hydraulics – A State of Art Review, IAHR, 3rd Edition, Rotterdam, A.A. Balkema.
- Schlaich, J., 1995, The Solar Chimney – Electricity from the Sun, Edition Axel Menges, Stuttgart.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE ACTUAL AIRFLOW IN A SOLAR CHIMNEY

Abstract. *This paper presents a numerical analysis of the turbulent natural convection of the airflow in a solar chimney, under actual solar radiation conditions. The solar chimneys are devices that consist of a transparent radial cover and of a tubular tower positioned in its center. The ground absorbs part of the incident solar radiation on the cover, heating the air in the greenhouse and inducing an upward airflow on the tower. It was developed a model that allows the evaluation of the ground temperature as a function of an energetic balance involving the incident solar radiation. The flow is described by the conservation laws for mass, momentum and thermal energy and the transport equations for the turbulence model (k and ϵ). A computational code using the Finite Volume Method in Generalized Coordinates was developed to solve these equations. Outlet dimensionless parameters are presented as functions of the radiation time and conditions, besides the unsteady behavior of the ground surface temperature.*

Keywords: *Solar chimney, Turbulence, Solar energy*