

# ESTUDO TEÓRICO DO ESCOAMENTO DE AR EM UMA CHAMINÉ SOLAR COM CONDIÇÕES REAIS DE INSOLAÇÃO

**André Guimarães Ferreira**

**Márcio Fonte-Boa Cortez**

**Ramón Molina Valle**

**Cristiana Santiago Brasil**

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica,  
Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: [ferreira@demec.ufmg.br](mailto:ferreira@demec.ufmg.br)

## Resumo

Este trabalho apresenta uma análise teórica do escoamento turbulento de ar com condições reais de insolação no interior de uma chaminé solar. As chaminés solares são dispositivos utilizados, atualmente, para geração de energia elétrica. São constituídas por uma cobertura radial transparente e por uma torre 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 chaminé. O escoamento é descrito pelas equações de conservação da massa, do momentum e da energia, além das equações de transporte das grandezas do modelo de turbulência ( $k$  e  $\epsilon$ ). São apresentados parâmetros adimensionais, à saída do dispositivo, em função do horário e das condições de insolação, representadas pelo aquecimento do solo sob a cobertura.

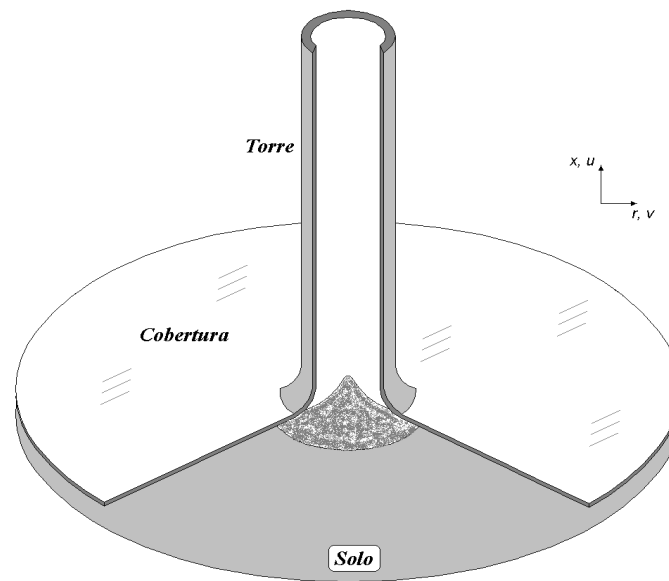
**Palavras-chave:** Chaminé solar, Turbulência, Condições de insolação

## 1. INTRODUÇÃO

As chaminés solares são constituídas 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 então aquecido pelo chão, gerando-se um escoamento ascendente na chaminé devido a forças de empuxo, criadas por gradientes de densidade do fluido. O ar quente é continuamente substituído por ar a temperatura ambiente que escoar 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.

O escoamento de ar quente gerado no interior do dispositivo pode ser utilizado para geração elétrica ou para secagem (Bernardes et al., 1999). A geração elétrica é obtida através de uma turbina eólica instalada na base da chaminé, acoplada a um gerador elétrico (Schlaich, 1995). O processo de secagem se efetua através do aproveitamento do ar quente, o qual pode

ser utilizado para 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  $\epsilon$ ). Para estimar a variação da temperatura do solo, foi utilizado um modelo transiente para as condições reais de insolação. Foi desenvolvido um código computacional utilizando o Método dos Volumes Finitos em Coordenadas Generalizadas para resolver o sistema de equações de conservação.

É analisado o comportamento do escoamento em função do horário e das condições de insolação locais, possibilitando a avaliação do comportamento transiente da temperatura do solo, da temperatura de saída do escoamento 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. O fluido utilizado é o ar, considerado como um gás perfeito. As hipóteses admitidas para a solução do problema baseiam-se em escoamento incompressível, fluido Newtoniano, propriedades do fluido constantes e sem dissipação viscosa.

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 de coordenadas bidimensionais, obedecendo às hipóteses admitidas, são dadas, respectivamente, por

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho u v) = -\frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_e \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu_e \frac{\partial u}{\partial r} \right) +$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu_e \frac{\partial v}{\partial x} \right) + g \rho_0 \beta (T - T_0)$$

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

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

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)

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

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

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,

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

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

Neste modelo,  $\mu_t$  não é uma propriedade do fluido, e sim uma medida local do nível de turbulência.

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

Supõe-se também que, na subcamada turbulenta, os fluxos de momentum e calor obedecem 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

$c_\mu$	$c_D$	$c_1$	$c_2$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$	$\kappa$	$E$	$A$
0,09	1,0	1,44	1,92	1,0	1,3	0,4187	9,793	26,0

A partir de balanços energéticos pode-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 & 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.

Tratando-se o solo como um meio semi-infinito, pode-se utilizar a solução exata para a equação diferencial parcial que descreve a condução no solo (Özisik, 1993).

$$T_{\text{solo}}(t) = T_i + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\alpha'}{K_{\text{solo}}} \int_{t'=0}^t \frac{q''_{\text{liq}}(t')}{\sqrt{4\alpha'(t-t')}} dt' \quad (14)$$

onde  $\alpha'$  e  $K_{\text{solo}}$  representam a difusividade e condutividade térmicas do solo, respectivamente,  $T_i$  a temperatura inicial do solo,  $t$  o tempo e  $q''_{\text{liq}}$  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 Figura 2. Devido à 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  $\varepsilon$ . 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  $\varepsilon$  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  $\varepsilon$  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  $\varepsilon$ .

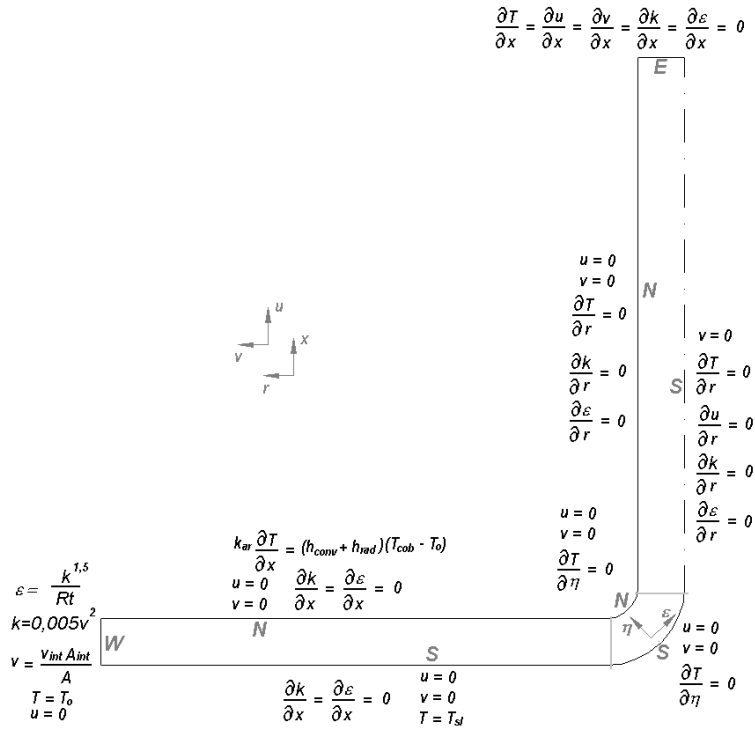


Figura 2. Domínio de solução do problema

### 3. METODOLOGIA COMPUTACIONAL

Para geração da malha foi utilizado um sistema de equações diferenciais elípticas. Para a solução numérica do sistema de equações foi usado o 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  $(\xi,\eta)$ . Desta forma, a equação geral transformada é dada por Maliska (1995)

$$\begin{aligned} & \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \eta} (\rho r U \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \epsilon} (\rho r V \phi) \\ & = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[ r J \Gamma^\phi \gamma \frac{\partial \phi}{\partial \eta} - r J \Gamma^\phi \beta \frac{\partial \phi}{\partial \epsilon} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \epsilon} \left[ r J \Gamma^\phi \alpha \frac{\partial \phi}{\partial \epsilon} - r J \Gamma^\phi \beta \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right] + \frac{S^\phi}{J} \end{aligned} \quad (15)$$

onde  $U$  e  $V$  são as componentes contravariantes da velocidade,  $J$  é o jacobiano da transformação e  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  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 utilizados. Desta forma, a equação discretizada para cada volume elementar  $P$  é dada por:

$$A_P \phi_P = A_e \phi_E + A_n \phi_N + A_w \phi_W + A_s \phi_S + A_{ne} \phi_{NE} + A_{nw} \phi_{NW} + A_{se} \phi_{SE} + A_{sw} \phi_{SW} + B \quad (16)$$

A aplicação das condições de contorno foi feita utilizando-se 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).

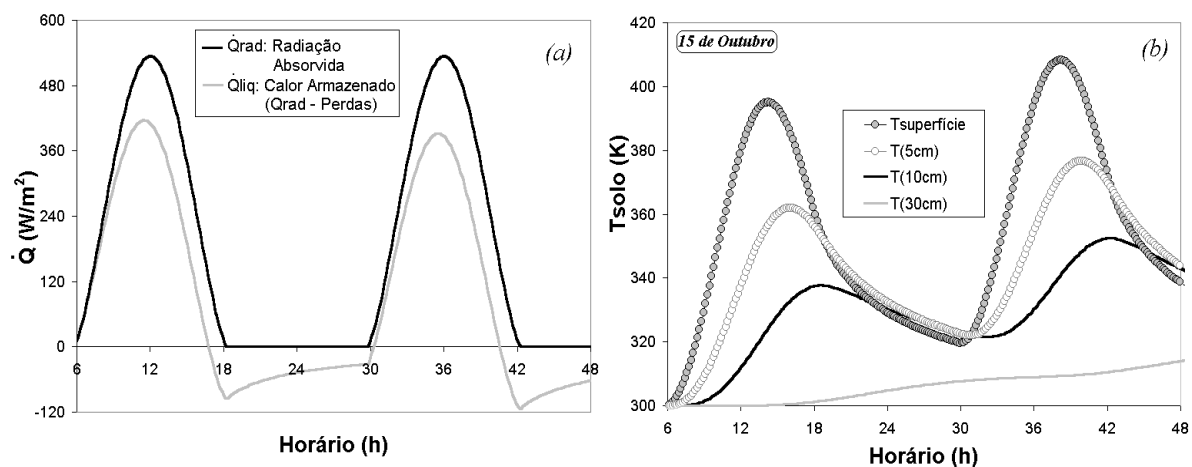
#### 4. RESULTADOS

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 222 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.

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

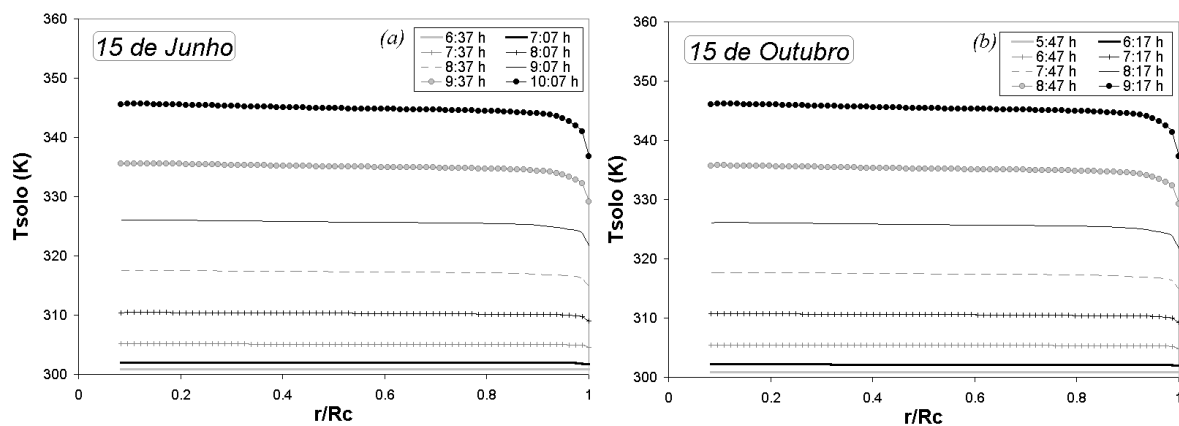
Foram utilizados dados de insolação para Belo Horizonte, ar como fluido no interior do dispositivo, propriedades do vidro para a cobertura e da areia para o solo. O horário adotado para a inicialização do escoamento no dia de simulação foi coincidente com o início do período de brilho solar, isto é, 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 3,5 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,  $Kt_j=0,6$  e  $Kt_o=0,5$ . A temperatura ambiente foi mantida constante em 300K, durante toda a simulação.

A Figura (3a) mostra o comportamento dinâmico do fluxo de radiação solar absorvido pela superfície do solo ( $Q_{rad}$ ) e do fluxo líquido de calor armazenado pelo solo ( $Q_{liq}$ ), determinado a partir do perfil de insolação proposto, para o dia 15 de outubro, para a cidade de Belo Horizonte. Observa-se que, durante a noite, o solo libera, para o escoamento no interior da chaminé solar, parte da energia armazenada durante o dia. A Figura (3b) apresenta, para o fluxo líquido de calor armazenado, o comportamento da temperatura para várias profundidades do solo, onde percebe-se uma tendência de homogeneização da temperatura, até a temperatura ambiente, para maiores profundidades.

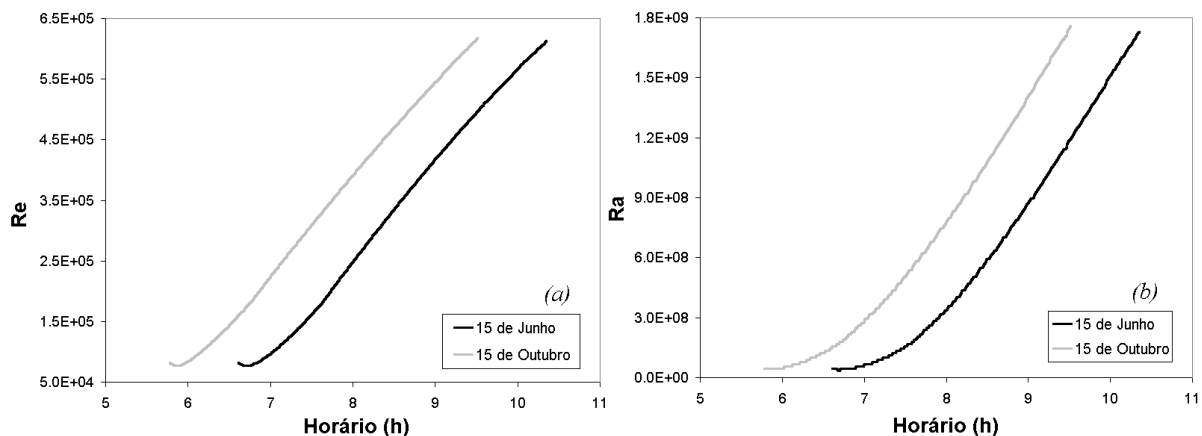


**Figura 3.** Comportamento Térmico do Solo para o Perfil de Insolação Proposto

As condições de contorno de insolação se fizeram representar pela determinação local e instantânea da temperatura da superfície do solo. A Figura (4) apresenta o comportamento da temperatura do solo com a posição radial na cobertura. 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 escoamento sempre é admitido na chaminé solar à temperatura ambiente (300K), quanto maior a temperatura média do solo, maior a transferência de calor do solo para o escoamento na região de entrada. 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 condições de insolação para o mês de outubro mais favoráveis do que as para o mês de junho.



**Figura 4.** Variação da Temperatura do Solo na Cobertura para Junho (a) e Outubro (b)



**Figura 5.** Variação dos números de Reynolds (a) e Rayleigh (b) com o horário

O número de Reynolds, em função do horário para os dias simulados (Figura 5a), 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 que a de 15 de junho. O número de Rayleigh, em função do horário para os dias simulados (Figura 5b), aumenta

durante o período simulado, em razão da temperatura do solo e, conseqüentemente, da maior temperatura média de saída do escoamento.

## 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, do momentum e da energia, além das equações de transporte das grandezas do modelo de turbulência. Foi utilizado o modelo k- $\epsilon$  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 e o comportamento dos números de Reynolds e de Rayleigh ao longo das 3,5 horas de simulação. Para uma avaliação mais precisa do comportamento dinâmico do escoamento no interior de uma chaminé solar, seria interessante a utilização do fluxo instantâneo da radiação local incidente, considerando a presença de nuvens no céu.

Para a simulação no dia 15 de outubro, no período inicial da manhã até às 9:30h, o escoamento atingiu uma velocidade média de saída ligeiramente inferior a 9m/s e uma temperatura média de saída de, aproximadamente, 316K. É bom ressaltar que estes valores tendem a aumentar até que a temperatura do solo atinja seu valor máximo, logo após o meio dia. 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.

## 6. 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.
- Duffie, J. A. and Beckman, W. A., 1991, “Solar Engineering of Thermal Processes”, John Wiley & Sons, Inc. 2<sup>nd</sup> ed..
- Launder, B. E. and 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, 3<sup>rd</sup> Edition, Rotterdam, A.A. Balkema.
- Schlaich, J., 1995, “The Solar Chimney – Electricity from the Sun”, Edition Axel Menges, Stuttgart.