

ANÁLISE NUMÉRICA DA CONVECÇÃO NATURAL TURBULENTA EM UMA CHAMINÉ SOLAR

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

Ramón M. Valle – ramon@demec.ufmg.br

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

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

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica
Avenida Antônio Carlos, 6627 – 31270-901 – Belo Horizonte, MG, Brasil

***Resumo.** Apresenta-se uma análise teórica da convecção natural turbulenta em uma chaminé solar operando em regime permanente, com condição de temperatura prescrita. O ar sob a cobertura é aquecido pela radiação solar e escoar em direção à torre sem necessidade de bombeamento artificial. O ar quente produzido pode ser utilizado para a secagem de diversos produtos agrícolas. A análise numérica da convecção natural neste tipo de secador é de fundamental importância no projeto e construção deste dispositivo. O modelo matemático envolve as equações de conservação da quantidade de movimento e da energia, além de equações de transporte para as grandezas do modelo de turbulência (k e ϵ). Foi utilizado o modelo k - ϵ padrão de turbulência com funções de parede. Um código computacional utilizando a técnica de Volumes Finitos em Coordenadas Generalizadas foi desenvolvido para a solução das equações que descrevem térmica e hidrodinamicamente o escoamento. São obtidos os campos de velocidade e temperatura para o escoamento no interior da chaminé solar. A partir de alterações geométricas no dispositivo, obtém-se uma descrição detalhada do escoamento, o que possibilita a definição de geometrias mais adequadas.*

***Palavras-chave:** Chaminé solar, Turbulência, Convecção natural*

1. INTRODUÇÃO

As chaminés solares constituem uma alternativa simples para aproveitamento da energia solar. Elas são uma nova combinação de técnicas há muito conhecidas: a estufa e a chaminé (Fig. 1). A chaminé solar consiste de um teto solar coletor elevado em relação ao solo (estufa), aberto nas extremidades, por onde o ar entra. No centro do teto solar coletor, encontra-se um canal ou duto vertical de seção cilíndrica (torre), para onde o ar se dirige. Ar a temperatura ambiente é admitido, radialmente, pela extremidade da cobertura, sendo aquecido pelo solo que se encontra a uma temperatura mais alta. A diferença de temperatura (e de densidade) provoca forças de empuxo, que induzem o escoamento de ar em direção à chaminé.

O teto solar coletor é formado por uma cobertura e por um armazenador de calor, tendo duas funções principais (Brasil, 2000): produzir o efeito estufa e conduzir o ar quente para a

chaminé. A cobertura é um filme de material translúcido, em plástico ou vidro. O material deve permitir a passagem de radiação solar com pequenos comprimentos de onda e reter a passagem de radiação vinda do chão aquecido, com grandes comprimentos de onda (Schlaich, 1995). O armazenador de calor é o solo, cujas características determinam a fração da energia incidente que será convertida em energia térmica, a transferência de calor e o efeito de armazenamento.

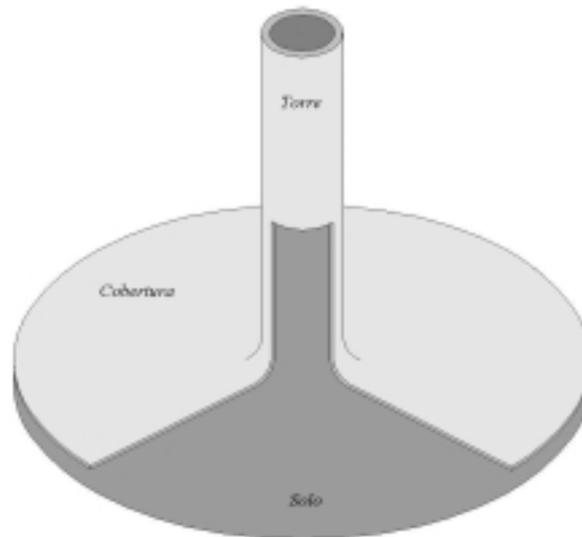


Figura 1 – Esquema de uma Chaminé Solar

As chaminés solares para geração de energia elétrica apresentam baixa eficiência, deficiência esta compensada por uma série de vantagens: dentre outras, construção simples e de baixo custo, utilização de materiais e tecnologias disponíveis e operação satisfatória à noite, pela liberação do calor armazenado no solo durante o dia (Schlaich, 1995).

O objetivo do presente trabalho foi a elaboração de uma metodologia numérica para a análise térmica de chaminés solares operando em regime permanente, com condição de temperatura prescrita para o solo e para a cobertura transparente. Buscou-se a influência de parâmetros geométricos e da temperatura do solo no comportamento do escoamento no interior do dispositivo. O modelo matemático envolve as equações de conservação da quantidade de movimento e da energia, além das equações de transporte das grandezas turbulentas, a energia cinética turbulenta k e a dissipação da energia cinética turbulenta ϵ . O modelo de turbulência utilizado foi o modelo k - ϵ padrão de Launder e Spalding (1974), com funções de parede.

Para resolver o sistema de equações governantes, foi desenvolvido um código computacional utilizando o método dos Volumes Finitos em Coordenadas Generalizadas. Esta metodologia permite o estudo do comportamento termo-hidrodinâmico do escoamento, cujas informações são essenciais para a definição de características geométricas adequadas para o dispositivo.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

2.1 Modelo matemático

Foram adotadas algumas hipóteses simplificativas, tais como escoamento incompressível, fluido Newtoniano, propriedades do fluido constantes e sem dissipação viscosa. O fluido de

trabalho, o ar, foi considerado um gás perfeito. Para esta análise, de caráter preliminar, as condições de insolação foram substituídas por uma temperatura prescrita para o solo.

As equações de conservação da massa, da quantidade de movimento nas direções x e r e da energia, escritas no sistema de coordenadas cilíndricas para escoamento bidimensional, considerando as hipóteses supracitadas, são dadas, respectivamente, por

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

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

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

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

As componentes de velocidade (u e v) encontram-se representadas na Fig. 2.

Deve-se ressaltar que os termos transientes foram mantidos como parâmetros de marcha do transiente distorcido. Além disso, as propriedades permaneceram no interior das derivadas apenas para manter as equações na forma conservativa.

Para o modelo k- ϵ , assume-se a viscosidade turbulenta μ_t dada por

$$\mu_t = \rho C_\mu C_D \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

As equações de transporte para k e ϵ são dadas, respectivamente, por

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u k) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v k) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial r} \right) + P_k + G_k - \rho C_d \epsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \epsilon) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_e}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial r} \right) + \frac{C_1 \epsilon}{k} (P_k + G_k) (1 + 0,8 R_f) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (7)$$

Nas equações anteriores, P_k representa a produção de energia cinética turbulenta

$$P_k = \mu_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{v}{r} \right)^2 \right] \quad (8)$$

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

$$G_k = - \frac{\beta g \mu_t}{\rho \text{Pr}_t} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (9)$$

$$R_f = \begin{cases} 0 & p / \text{canais verticais} \\ - \frac{G_k}{P_k + G_k} & p / \text{canais horizontais} \end{cases} \quad (10)$$

As constantes do modelo de turbulência são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Constantes do modelo k-ε padrão

C_μ	C_D	C_1	C_2	σ_k	σ_ϵ
0,09	1,0	1,44	1,92	1,0	1,3

Deve-se salientar que este modelo é válido para altos números locais de Reynolds. O movimento turbulento é caracterizado por variações dos valores das propriedades dentro do próprio escoamento. Perto da parede, o número de Reynolds local é baixo, sendo o movimento controlado principalmente pela viscosidade do fluido. Ao se afastar da parede, os números de Reynolds locais vão aumentando, e os efeitos turbulentos vão se tornando mais importantes. No presente trabalho, esta região foi tratada através da utilização do modelo de função de parede de Launder e Spalding (1974).

2.2 Condições de contorno

O domínio de solução e as condições de contorno são mostrados na Figura 2.

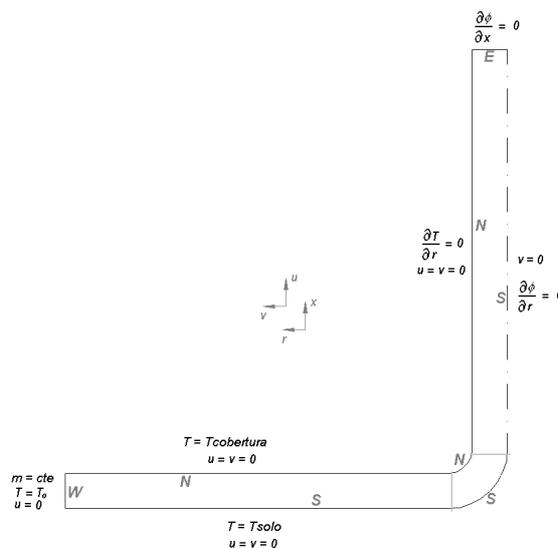


Figura 2 – Domínio de solução e condições de contorno do problema

A fronteira leste é uma região de saída de massa. Nela, assume-se o escoamento como completamente desenvolvido, ou seja, $\partial\phi/\partial x = 0$, sendo ϕ qualquer uma das variáveis.

A fronteira norte é formada pela cobertura e pela parede da chaminé. O valor da temperatura na cobertura é dado por T_{cob} . Na chaminé, a condição é de isolamento térmico. As velocidades u e v obedecem à condição de não deslizamento, ou seja, são nulas. O modelo k- ϵ de Launder e Spalding (1974) assume que, na parede, a variação das grandezas turbulentas na direção transversal ao escoamento principal é nula.

A fronteira sul é constituída pelo solo e pelo centro da chaminé. No solo, o valor da temperatura é dado por T_{sl} e as velocidades u e v são mantidas iguais a zero. Para o centro da chaminé, é imposta a condição de simetria. Assim, a condição é de $\partial\phi/\partial r = 0$, sendo ϕ qualquer variável, exceto a velocidade v . Para o centro da chaminé, impõe-se $v = 0$.

A fronteira leste, correspondente ao final da chaminé, é uma região de saída de massa. Nesta região, considera-se o escoamento completamente desenvolvido, ou seja, $\partial\phi/\partial x = 0$.

A fronteira oeste é a extremidade da cobertura por onde há entrada de massa. Nesta fronteira, a temperatura é mantida igual à temperatura ambiente (T_{amb}). A velocidade u é assumida nula e as grandezas turbulentas são calculadas em função da velocidade v de entrada, através das seguintes expressões (Gosman e Ideriah, 1976)

$$k = 0,005v^2 \quad (11)$$

$$\epsilon = \frac{k^{3/2}}{R_t} = \frac{(0,005)^{3/2} v^3}{R_t} \quad (12)$$

A velocidade v não pode ser prescrita na fronteira oeste, já que ela é resultante das forças de empuxo, cujo valor não é conhecido. Ela é calculada durante a simulação numérica, baseada na velocidade do volume vizinho ao volume de fronteira. A velocidade vizinha é calculada através da sua equação de conservação da quantidade de movimento. Assume-se que, como a vazão mássica é constante, as duas velocidades diferem apenas por uma correção de área do escoamento, implementada nos coeficientes dos volumes fictícios. Este não é um processo iterativo, uma vez que as equações para os volumes fictícios são resolvidas ao mesmo tempo que as equações para os volumes internos.

3. METODOLOGIA NUMÉRICA

Para a solução do sistema de equações governantes do escoamento, foi desenvolvido um código computacional utilizando a técnica dos Volumes Finitos em Coordenadas Generalizadas.

As equações descritas anteriormente podem ser escritas em uma forma geral, em coordenadas cilíndricas, para escoamento bidimensional, para uma variável genérica ϕ , como

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho v\phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + S^\phi + P^\phi \quad (13)$$

As equações de conservação do sistema físico (x,r) são transformadas para um sistema generalizado (ξ,η), no qual o domínio de solução é representado por um retângulo. As equações de conservação são escritas neste novo plano computacional (equações transformadas) e são integradas, no espaço e no tempo, resultando em um sistema algébrico de equações. Uma descrição detalhada do método pode ser vista em Maliska (1995). A equação geral transformada é dada por

$$\begin{aligned} \frac{1}{J} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \xi} (r\rho\phi U) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \eta} (r\rho\phi V) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[r\Gamma^\phi \left(\alpha \frac{\partial \phi}{\partial \xi} - \beta \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right) \right] + \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[r\Gamma^\phi \left(\gamma \frac{\partial \phi}{\partial \eta} - \beta \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \right) \right] + \frac{S^\phi}{J} + \frac{P^\phi}{J} \end{aligned} \quad (14)$$

Nesta equação, ξ_x , ξ_r , η_x e η_r representam as métricas da transformação da equação geral do plano físico para o plano transformado, J é o jacobiano da transformação, α , γ e β são as componentes do tensor métrico e U e V , as componentes contravariantes da velocidade.

A integração desta equação diferencial, no espaço e no tempo, sobre um volume de controle elementar, utilizando uma formulação totalmente implícita, leva a uma equação geral discretizada.

O processo de geração da malha é feito com a utilização de equações diferenciais elípticas. O método de interpolação utilizado é o WUDS – Weighted Upstream Differencing Scheme. O acoplamento pressão velocidade foi tratado pelo algoritmo SIMPLEC. O sistema de equações é resolvido pelo método MSI – *Modified Strongly Implicit*. Para aplicação das condições de contorno, foram criados volumes fictícios nas fronteiras do domínio.

4. RESULTADOS

Não foram encontrados na literatura dados ou informações para o problema da convecção natural turbulenta em uma chaminé solar. Desta forma, para a validação da metodologia numérica, adotaram-se os resultados experimentais para a convecção mista turbulenta em tubos verticais aquecidos de Carr et. al. (1973).

Na simulação computacional, foram utilizados 302 volumes de controle na direção do escoamento principal e 28 volumes na direção transversal ao escoamento principal.

A influência da geometria do dispositivo no comportamento do escoamento foi estudada através da alteração dos parâmetros geométricos mostrados na Fig. 1. Definiu-se uma geometria padrão, em que o raio da cobertura (R_c) tem 12m, a altura da torre (H_t) tem 20m, a cobertura tem altura constante ($H_{c1} = H_{c2}$) e igual a 0,5m, a torre tem raio constante ($R_{t1} = R_{t2}$) e igual a 0,5m e o raio interno da junção tem 0,5m. É apresentado o comportamento do escoamento para esta geometria padrão, simulado para uma temperatura do solo de 330K, através do desenvolvimento das velocidades u e v ao longo da torre e da cobertura. Também são apresentados os campos adimensionais das velocidades u e v em três seções diferentes da torre e da cobertura (Figs. 3 e 4). Os parâmetros geométricos mencionados foram alterados mantendo-se a temperatura do solo constante e igual a 330K. Os resultados apresentados na Tabela 2 mostram os números de Reynolds e Rayleigh e os valores médios de velocidade e temperatura ao final da torre. Em seguida, o escoamento foi simulado para a geometria padrão, varrendo-se uma faixa de temperaturas do solo variando entre 305 K e 350 K, com intervalos de 5 K entre si. Os resultados mostrados na Fig. 5 apresentam os adimensionais de Rayleigh e Reynolds ao final da torre, em função de uma temperatura adimensional. A temperatura ambiente foi mantida constante em todos os casos, igual a 300 K.

A Figura 3(a) mostra o desenvolvimento da velocidade u no eixo de simetria ao longo de toda a extensão da torre. O menor valor da abscissa corresponde ao início da torre (final do joelho), ou seja, a um ponto de parede, no qual a velocidade é nula. A velocidade do ar no interior da torre aumenta em direção ao final da torre, atingindo cerca de 9 m/s. Observa-se que, para a altura da torre considerada, o escoamento não se desenvolveu completamente, notando-se um pequeno crescimento de u ao final dela. A Figura 3(b) apresenta o desenvolvimento da velocidade v ao longo da cobertura, para uma altura correspondente ao

centro da cobertura. Os valores de v são negativos, porque a geometria da chaminé solar foi rotacionada, para facilitar os cálculos computacionais. O valor da abscissa igual a 1 corresponde, portanto, à entrada da cobertura. Neste ponto, o ar entra a temperatura ambiente, com velocidades mais baixas. À medida em que o escoamento vai se aproximando da torre, há uma redução da área de escoamento, contribuindo também para o aumento da velocidade, que alcança o valor máximo ao final da cobertura e início da junção, de cerca de 2,5 m/s.

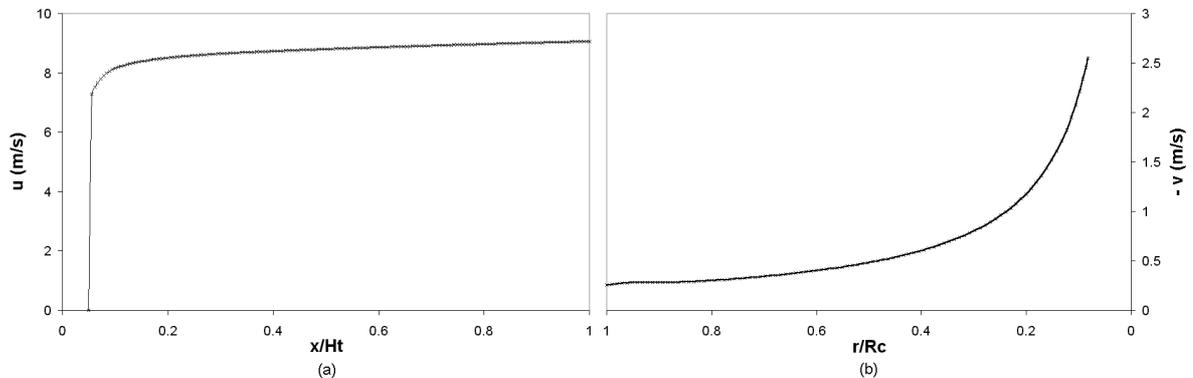


Figura 3 - Desenvolvimento das Velocidades u na Torre e v na Cobertura

A Figura 4 ilustra os perfis das velocidades u e v em três seções transversais da torre e da cobertura, respectivamente, adimensionalizadas em função de uma velocidade de referência V_{ref} , tomada como sendo a velocidade média do ar à saída da torre. A Figura 4 (a) mostra o perfil adimensional da velocidade u em três seções transversais da torre, correspondendo ao início ($x/Ht = 1/12$), meio ($x/Ht = 0.5$) e fim ($x/Ht = 1$) da chaminé. Para o início da chaminé, a abscissa igual a zero corresponde ao fim do "joelho", portanto, velocidade nula. Para as duas outras seções, este valor da abscissa corresponde ao eixo de simetria. A região da parede, com abscissa 1, é uma região de não deslizamento, ou seja, de velocidade nula. Percebe-se ser o perfil bem achatado, comportamento característico dos escoamentos turbulentos. Nota-se, também, que os perfis para o meio e fim da chaminé são praticamente iguais, indicando que, para esta geometria, as maiores modificações no perfil ocorrem na primeira metade da chaminé. A Figura 4 (b) apresenta o perfil adimensional de v em três seções da cobertura ($r/Rc = 1/12, 0.5$ e 1). O valor da abscissa igual a 0 corresponde ao solo e da abscissa igual a 1, à parede da cobertura; ambas, portanto, fronteiras impermeáveis, com velocidades nulas. No início da cobertura ($r/Rc = 1$), a velocidade máxima é deslocada para uma região mais próxima do solo, devido aos efeitos de entrada. No final da cobertura ($r/Rc = 1/12$), o valor máximo de v está mais perto da parede, evidenciando o deslocamento ascendente do ar provocado pela ação da convecção natural.

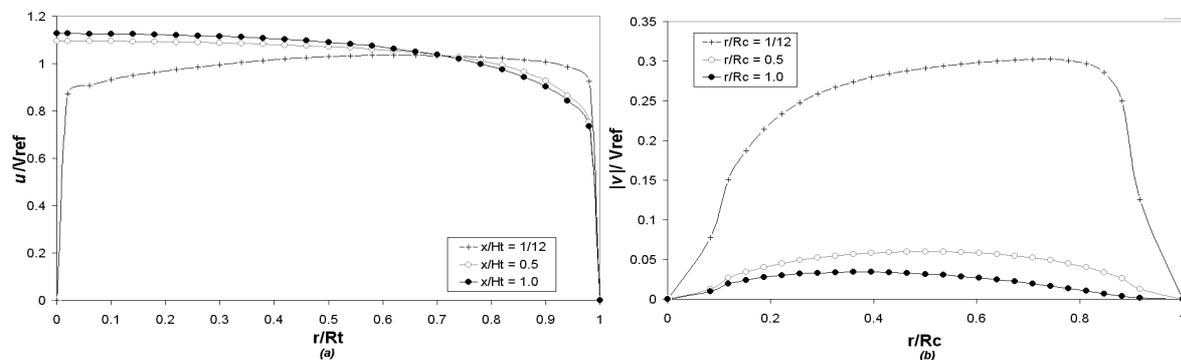


Figura 4 - Perfis de Velocidade Adimensionais

A Figura 5 apresenta o comportamento dos números de Reynolds e Rayleigh em função de uma temperatura adimensional, definida como a razão entre a temperatura do solo e a temperatura média do escoamento à saída da torre, T_{med} . À medida em que a temperatura do solo aumenta, aumenta a força motriz do escoamento, fazendo com que as velocidades aumentem (maiores números de Reynolds). O aumento da temperatura do solo provoca o aumento da transferência de calor para o ar, que entra na cobertura a temperatura ambiente. Desta forma, a temperatura do ar na saída da torre é maior (maior número de Rayleigh associado ao escoamento).

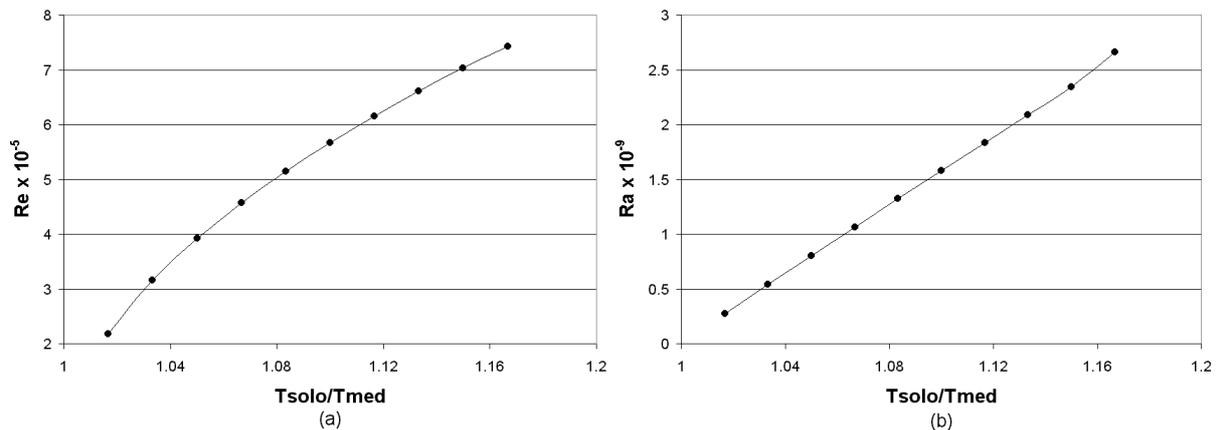


Figura 5 – Variação dos números de Reynolds (a) e Rayleigh (b) com T_{solo}/T_{med}

A influência da geometria no comportamento do escoamento pode ser avaliada através da alteração dos parâmetros mostrados na Fig. 1. Estes resultados são listados, na Tabela 2, através dos números de Reynolds e Rayleigh e dos valores médios de velocidade e temperatura ao final da torre para cada caso simulado. O caso 1 representa a geometria padrão. Os casos 2 a 4 mostram a influência da altura da torre, valores de 22m, 28m e 34m, respectivamente. O aumento da altura da torre provoca um aumento da intensidade das forças de empuxo presentes no escoamento, aumentando a velocidade média de saída do ar. Desta maneira, a temperatura média sofre uma ligeira queda. Os casos 5 a 7 mostram a influência do raio da cobertura, com R_c assumindo valores de 16m, 20m e 24m. Um aumento do raio da cobertura provocaria uma maior transferência de calor do solo para o ar, através do aumento da área de contato do ar no interior da chaminé solar com o solo aquecido. Ao mesmo tempo, a massa de ar admitido a temperatura ambiente também aumenta. A combinação destes dois efeitos provoca um aumento moderado no valor de u e da temperatura média de saída do ar. Os casos 8 e 9 foram simulados para diferentes alturas da cobertura, mantida constante em 0,75m e 1,0m, respectivamente. O aumento da altura da cobertura provoca uma queda na velocidade do escoamento, aumentando o valor da temperatura do ar na cobertura e, conseqüentemente, na saída da torre. Os casos 10 e 11 representam a influência do raio da torre, que assume valores constantes de 0,75m e 1,0m. À medida em que o raio da torre aumenta, o volume de ar na torre e as forças de empuxo aumentam, fazendo com que a velocidade do escoamento também aumente. Desta forma, a temperatura média de saída é reduzida. Os casos 12 e 13 ilustram variações do raio interno da junção, com R_j igual a 0,1m e 2,5m, respectivamente. Percebe-se que, apesar da grande variação geométrica, os valores médios de saída não sofreram grandes alterações. Os casos 14 e 15 mostram a influência da inclinação da cobertura, que variou, no caso 14, de 0,475m na entrada da cobertura a 0,525m no final dela e, no caso 15, de 0,4m a 0,6m. Observa-se que, com o aumento da inclinação da cobertura, a temperatura e a velocidade médias ao final da torre diminuem. Os casos 16 e 17

mostram a influência da conicidade da torre, com o seu raio variando, no caso 16, de 0,525m no início da torre a 0,475m na saída da mesma e, no caso 17, de 0,6m a 0,4m. Percebe-se que pequenas alterações no raio da torre provocam grandes alterações nos valores médios de saída, sendo que um aumento da conicidade da torre leva à redução da velocidade e ao aumento da temperatura.

A análise dos parâmetros geométricos mostrou que o raio da junção entre a cobertura e a torre tem pouca influência no comportamento do escoamento (gerando as menores alterações nos valores de saída dos adimensionais de Rayleigh e Reynolds). As variáveis de maior sensibilidade no comportamento do escoamento foram o diâmetro e a conicidade da torre. Para uma pequena variação nos valores de altura da cobertura e no raio da torre, foram obtidos os menores valores de velocidade ao final da torre e valores de temperatura média bem próximos aos máximos valores obtidos. Notou-se também que há um valor limite para o aumento do raio da cobertura, para uma dada altura da torre, a partir do qual não ocorre um aumento significativo da temperatura média de saída do ar. Da mesma forma, há um limite superior para a altura da torre, dado um mesmo diâmetro da cobertura, acima do qual não ocorre um aumento significativo da velocidade média de saída do ar.

Tabela 2: Parâmetros importantes na saída da chaminé

Caso	Reynolds	umed (m/s)	Rayleigh	Tmed (K)
1	5,670E5	8,042	1,581E9	313,7
2	5,742E5	8,1448	1,574E9	313,6
3	5,887E5	8,349	1,562E9	313,5
4	5,896E5	8,362	1,554E9	313,5
5	5,924E5	8,402	1,712E9	314,8
6	5,974E5	8,473	1,739E9	315,1
7	5,977E5	8,477	1,742E9	315,1
8	5,497E5	7,796	1,608E9	313,9
9	5,394E5	7,650	1,624E9	314,0
10	8,924E5	8,438	4,241E9	310,9
11	1,223E6	8,673	8,786E9	309,5
12	5,531E5	7,844	1,574E9	313,6
13	5,672E5	8,044	1,595E9	313,8
14	5,615E5	7,964	1,556E9	313,5
15	5,514E5	7,820	1,553E9	313,5
16	2,873E5	4,297	1,721E9	314,9
17	1,321E5	2,342	1,749E9	315,2

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma análise em regime permanente da convecção natural turbulenta do ar no interior de uma chaminé solar, com condições de temperatura prescritas para a cobertura e o solo.

A análise do escoamento foi feita através do tratamento numérico – através de um código computacional utilizando a técnica de Volumes Finitos em Coordenadas Generalizadas – das equações de conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia e das equações de transporte das grandezas turbulentas. O fenômeno da turbulência foi tratado pelo modelo k-ε padrão de turbulência de Launder e Spalding (1974).

Foram apresentados perfis das velocidades u na torre e v na cobertura para a geometria padrão. A influência de parâmetros geométricos no comportamento termo-hidrodinâmico do escoamento foi observada através dos números de Reynolds e Rayleigh e dos valores médios de velocidade e temperatura ao final da torre. A influência da temperatura do solo foi avaliada através de curvas de Reynolds e Rayleigh em função de uma temperatura adimensional, definida como a razão entre a temperatura do solo e a temperatura ambiente.

A análise feita demonstrou que o diâmetro e a conicidade da torre são determinantes na configuração de um sistema real. O raio da junção, por outro lado, mostrou-se de pouca influência no escoamento. As velocidades e temperaturas ao final da torre dependem fortemente do valor da temperatura do solo.

REFERÊNCIAS

- Brasil, C. S., 2000, Elaboração de uma metodologia numérica para a análise térmica de chaminés solares: influência de parâmetros geométricos, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.
- Carr, A. D., Connor, M. A. e Buhr, H. O., 1973, Velocity, temperature and turbulence measurements in air pipe flow with combined free and forced convection, *Journal of Heat Transfer*, ASME, Vol. 95, pp 445-452.
- Gosman, A. P. e Ideriah, 1976, F. J. K., Manual TEACH-2E: A general computer program for two-dimensional, turbulent, recirculating flows, Imperial College, Londres.
- Launder, 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 computacional, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro.
- 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 TURBULENT NATURAL CONVECTION IN A SOLAR CHIMNEY

Abstract. *This paper presents a theoretical analysis of the turbulent natural convection in a solar chimney operating in steady flow, with prescribed conditions of temperature in the ground. The solar radiation heats the air under the cover, which flows to the tower without artificial pumping. The hot air produced may be used to dry several agricultural products. The numerical analysis of the natural convection in this kind of dryer has fundamental importance on the design and building of this device. The mathematical model includes the conservation laws for mass, momentum and thermal energy and the transport equations for the turbulence model variables (k and ϵ). The k - ϵ model of turbulence with wall functions was used. A computational code using the Finite Volume Method in Generalized Coordinates was developed to solve the system of equations that describes thermal and hydrodynamically the flow. The velocity and temperature fields are shown to the flow in the solar chimney. With geometrical alterations on the device, one can obtain a detailed description of the flow, which allow the guideline for a suitable configuration to build an experimental prototype.*

Keywords: *Solar chimney, Turbulence, Natural convection*