

BALANÇO ENERGÉTICO DE UMA CHAMINÉ SOLAR

ENERGY BALANCE IN A SOLAR CHIMNEY

André Guimarães Ferreira¹, Cristiana Brasil Maia^{2,3}, Ramón Molina Valle² e Márcio Fonte Boa Cortez²

¹Curso de Engenharia de Alimentos, Departamento de Ciências Exatas e Tecnologia, Centro Universitário de Belo Horizonte Uni-BH
Av. Professor Mário Werneck, 1685. Buritis, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. Cep 30455-610.
e-mail: agferreira@acad.unibh.br; a_g_ferreira@yahoo.com.br

²Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos, 6627 Campus Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. Cep 31270-901.

³Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Av. Dom José Gaspar, 500. Coração Eucarístico, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. Cep 30535-901.
e-mail: cristiana@pucminas.br

RESUMO

As chaminés solares são dispositivos desenvolvidos para geração eólica de energia elétrica, que, com pequenas adaptações, podem ser utilizadas para a secagem de alimentos. Foi construído um protótipo de uma chaminé solar no Laboratório de Alternativas Energéticas do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG. Na confecção da cobertura do dispositivo foram utilizados filmes plásticos termodifusor e tipo estufa. Foi realizado um balanço da radiação solar incidente sobre e no interior do protótipo. São apresentados os balanços de radiação solar e de energia, desenvolvidos através de medição das distribuições de radiação solar, temperatura, velocidade e umidade relativa. O filme termodifusor, apesar de ter apresentado menores valores de transmissividade à radiação solar do que o filme tipo estufa, apresentou uma maior durabilidade e resistência mecânica e uma menor transmissividade à radiação infravermelha (reduzindo as perdas térmicas do coletor solar). Foi verificado que as perdas energéticas mais significativas no dispositivo ocorreram por condução através do solo e por radiação emitida pelo solo aquecido e transmitida pelo filme plástico (por apresentar elevada transmissividade à radiação infravermelha).

Palavras-chave: Balanço energético; Análise experimental; Chaminé Solar.

ABSTRACT

Solar chimneys are devices developed to generate electric power. With a few adaptations, they can be used to dry agricultural products. It was built a prototype of a solar chimney in the Energetic Alternative Laboratory of the Mechanical Department of UFMG. To built the cover, a thermodiffuser plastic film and a greenhouse film were used. It was performed a balance of the solar radiation incident on the device and inside the device. The balances of solar radiation and energy developed through measurements of solar radiation, temperature, velocity and humidity are presented. The thermodiffuser plastic film showed greater durability and greater mechanical resistance compared with the greenhouse film, despite of its lower longwave transmittance (which reduced the thermal losses from the solar collector). Results indicate that the most significant thermal losses occurred by conduction through the ground and by the thermal radiation emitted from the ground and transmitted trough the film.

Keywords: Energy balance; Experimental Analysis; Solar Chimney.

1 - INTRODUÇÃO

A chaminé solar representa um dispositivo solar, proposto pelos professores J. Schlaich e A.A.R. El Agib (Mullet, 1987), para geração de energia elétrica. A primeira instalação piloto de uma chaminé solar, experimental, entrou em funcionamento no deserto de Manzanares, na Espanha, em junho de 1982 (Haaf, 1984). O dispositivo construído possuía uma torre de 195 metros de altura e 10 metros de diâmetro. A cobertura tinha o diâmetro de 240 metros e uma altura em relação ao solo que variava de 2 metros na extremidade do coletor até 6 metros no centro (Schlaich, 1992). A instalação solar de Manzanares foi

projetada para produção de uma potência elétrica de pico de 50 kW, promovida pela passagem do escoamento de ar por uma turbina axial instalada na base da torre e acoplada a um gerador elétrico.

Na cobertura da chaminé solar de Manzanares foram testados filmes plásticos e placas de vidro. Segundo Richards (1982), cada módulo da cobertura de 6 m² de área possuía uma válvula que era aberta para drenar água nos períodos de chuva. Estas válvulas eram mantidas constantemente fechadas para evitar vazamentos de ar.

O clima e a localização de instalação influenciam no desempenho da chaminé solar. As regiões mais favoráveis para a instalação são zonas semi-áridas, com latitudes entre

30°S e 30°N. Os locais ideais para instalar as chaminés solares são os desertos rochosos. Segundo Richards (1982), os desertos arenosos possuem a desvantagem do acúmulo de areia sobre os coletores. No entanto, a experiência em Manzanares mostrou que a cobertura é muito insensível à poeira e as raras tempestades no deserto são suficientes para a limpeza do coletor (Schlaich, 1995).

Diversos estudos numéricos têm sido desenvolvidos para prever o comportamento do escoamento no interior de uma chaminé solar. Ferreira et al. (2000) apresentaram um estudo numérico do escoamento turbulento de ar no interior de uma chaminé solar, com condições reais de insolação. Maia et al. (2005) complementaram este estudo numérico, aprimorando o modelo e validando os resultados numéricos com dados experimentais obtidos para o protótipo analisado neste trabalho. Bernardes et al. (2003) desenvolveram um modelo para determinar a potência de saída de chaminés solares, examinando os efeitos das condições ambientais e dimensões (validando os resultados numéricos com resultados experimentais obtidos em Manzanares).

A chaminé solar é composta por uma torre central tubular fixada, em sua base, a uma cobertura circular translúcida aberta nas extremidades (ver Figura 1). Durante o período de insolação, parte da radiação solar incidente sobre a cobertura é absorvida pelo solo, sendo convertida em energia térmica. O solo se aquece transferindo calor por convecção ao ar sob o coletor. O ar aquecido escoar ascendentemente na torre devido a forças de empuxo, criadas por gradientes de densidade do fluido. O ar a temperatura ambiente escoar radialmente da periferia para o centro coletor, sendo aquecido pelo solo absorvedor. À noite, parte da energia térmica armazenada pelo solo durante o período de insolação é transferida ao escoamento de ar, permitindo o funcionamento ininterrupto do dispositivo.

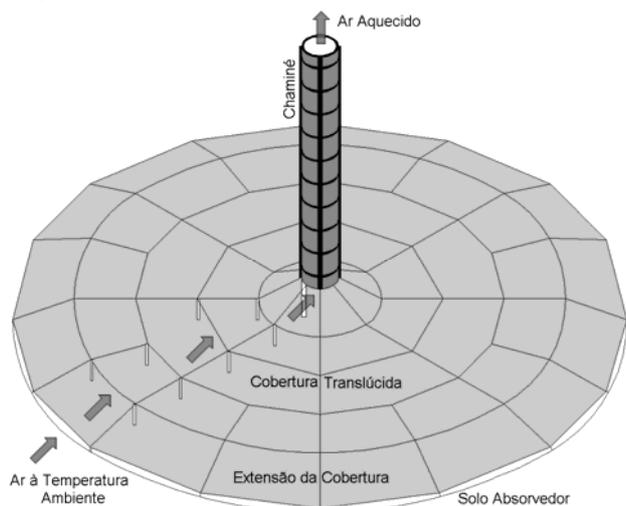


Figura 1. Esquema do protótipo da chaminé solar.

Para avaliação da viabilidade técnica da chaminé solar como um secador solar radial foi construído um protótipo do dispositivo (ver Figura 2) no Laboratório de Alternativas Energéticas (LAE) do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) da Universidade Federal

de Minas Gerais (UFMG). A torre tubular foi construída em madeira e revestida em fibra de vidro, com a altura de 12,3 m e o diâmetro de 1,0 m. Foi utilizado um filme plástico termodifusor fixado em quadros de madeira para a confecção da cobertura circular translúcida. A cobertura, com um diâmetro de 25,0 m, foi mantida a 0,5 m acima do solo por uma estrutura metálica de fixação dos quadros. O solo absorvedor foi construído em concreto e pintado na cor preto fosco.

Para minimizar a passagem de vento sob a cobertura e o conseqüente resfriamento do solo absorvedor, a altura de entrada de ar na cobertura foi rebaixada para 0,05 m e foi colocado um anteparo (em filme plástico preto) em volta de todo secador (a 2,5 m de distância da periferia).



Figura 2. Fotografia do protótipo da chaminé solar.

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo experimental do balanço térmico de energia sob a cobertura do dispositivo e do comportamento térmico de filmes plásticos da Nortène (termodifusor e tipo estufa) usados na confecção da cobertura de um protótipo da chaminé solar.

2 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para monitorar a radiação solar, dentro e fora do dispositivo, foram utilizados seis (6) solarímetros Eppley Black and White, Modelo 8-48 (instrumentos para a medição da radiação solar global e difusa). Os solarímetros Eppley 8-48 foram calibrados utilizando-se um padrão secundário Eppley Precision Spectral Pyranometer – PSP, que apresenta um erro máximo de medição de 1%, quando comparado com um padrão primário (Duffie e Beckman, 1991). A incerteza dos solarímetros é de 5%, para uma probabilidade de enquadramento de 95%.

Para realização de um balanço global de energia foram avaliadas as condições térmicas ambientais e as propriedades do escoamento no interior do dispositivo. Foram utilizados dois psicrômetros do tipo capacitivo para a medição da umidade relativa ambiente e do escoamento, oito termopares do tipo K para a medição das temperaturas ambiente, do solo e do escoamento e oito anemômetros de palheta com hélice para a medição da velocidade do escoamento e do vento.

A incerteza relativa de cada psicrômetro foi determinada em função da incerteza do padrão, dos erros de linearidade das funções de transferência e da repetitividade das medições na calibração, sendo obtido o

valor de 5,8%, para uma probabilidade de enquadramento de 95%. A calibração dos termopares permitiu uma análise para se determinar a sua incerteza de medição, minimizando-se as demais fontes de incerteza, em 1,2°C, para uma probabilidade de enquadramento de 95%. Finalmente, a incerteza de medição dos anemômetros englobou a calibração (erros de repetitividade, a incerteza do padrão utilizado e os erros de linearidade) e a incerteza da correção da densidade do ar (em função da temperatura e da umidade relativa). A incerteza global dos anemômetros foi de 6,6%, para uma probabilidade de enquadramento de 95%. Todos os sensores (umidade, temperatura, velocidade e radiação solar) geram sinais analógicos de 4 mA a 20 mA ou de 0 V a 2,5 V, que foram convertidos em sinais digitais em Módulos ADAM 4018.

O monitoramento das componentes da radiação solar sobre e sob a cobertura permitiu a realização de um balanço energético de radiação solar e a avaliação das propriedades radiantes dos materiais do solo e da cobertura. Por este motivo, em todos os ensaios realizados, foi necessário utilizar seis solarímetros, dispostos conforme o esquema apresentado na Figura 3.

O solarímetro 1 mede a radiação solar global incidente sobre a cobertura e o solarímetro 5, a radiação solar global incidente sobre o solo. O solarímetro 2 mede a radiação solar difusa disponível para a cobertura e o solarímetro 4, a radiação solar difusa disponível para o solo, utilizando anéis de sombreamento. A diferença entre os valores de radiação medidos pelos solarímetros 1 e 2 permite determinar a componente direta da radiação sobre a cobertura e a diferença entre os valores medidos pelos solarímetros 5 e 4 define a componente direta da radiação solar incidente sobre o solo. O solarímetro 6 mede a parcela da radiação solar refletida pelo solo, incidente sobre a face inferior da cobertura. O solarímetro 3 mede a parcela da radiação solar global incidente sobre a cobertura que é transmitida por ela. Com esta disposição solarimétrica, a transmissividade à radiação solar da cobertura (τ) e a absorvidade do solo (α) podem ser determinadas em função das radiações solares medidas (G)

$$\tau = \frac{G_3}{G_1} \tag{1}$$

$$\alpha = 1 - \frac{G_6}{G_5} \tag{2}$$

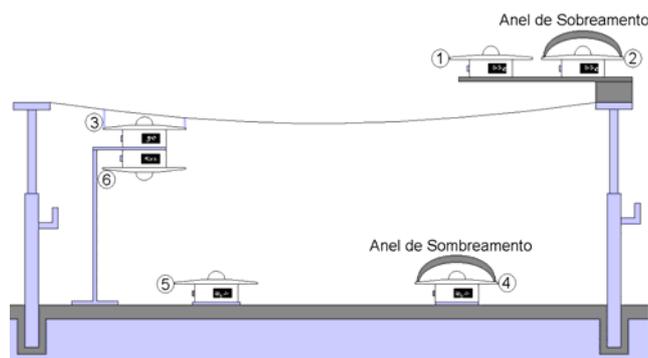


Figura 3. Disposição dos solarímetros.

Para realização do balanço global de energia, a energia solar global (E_s) incidente sobre o protótipo foi determinada por

$$E_s = \int_{0h}^{24h} (G_1 \cdot A) dt \tag{3}$$

onde A representa a área total de coleta do dispositivo.

A energia absorvida pelo escoamento (E_E) pode ser determinada por

$$E_E = \int_{0h}^{24h} \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{esc} - T_{amb}) dt \tag{4}$$

onde a vazão mássica do escoamento (\dot{m}) foi determinada experimentalmente através da medição da velocidade do escoamento, assim como a temperatura ambiente (T_{amb}) e a temperatura média de saída do escoamento (T_{esc}).

A energia solar absorvida pela superfície (E_A) do solo foi determinada por

$$E_A = \int_{0h}^{24h} (\overline{\tau\alpha}) G_1 \cdot A dt \tag{5}$$

onde $(\overline{\tau\alpha})$ representa o efeito da transmissão da radiação solar pela cobertura e absorção da radiação solar pelo solo, incluindo efeito de múltiplas reflexões (Duffie e Beckman; 1991).

A energia perdida (E_P) para as camadas mais profundas do solo foi determinada através de

$$E_P = \int_{0h}^{24h} \frac{kA}{\Delta x} (T_{sup} - T_{inf}) dt + \rho c_p A \Delta x (\overline{T}_{0h} - \overline{T}_{24h}) \tag{6}$$

Na equação anterior, k representa a condutividade térmica e ρ representa a densidade da camada de concreto (avaliadas experimentalmente), c_p representa o calor específico do concreto, Δx representa a espessura da camada de concreto (igual a 5 cm), T_{sup} e T_{inf} representam, respectivamente, as temperaturas da superfície superior e inferior da camada de concreto (determinadas experimentalmente) e \overline{T} representa a temperatura média camada de concreto no início (0h) e no final (24h) do ciclo do ensaio.

A energia trocada por radiação entre a cobertura e o céu (E_{cs}) foi determinada por

$$E_{cs} = \int_{0h}^{24h} \epsilon_c \sigma A (T_c^4 - T_s^4) dt \tag{7}$$

em que ϵ_c representa a emissividade do material da cobertura, σ é a constante de Stefan-Boltzmann, T_c representa a temperatura da cobertura (determinada experimentalmente) e T_s , a temperatura do céu (determinada em função da temperatura ambiente, conforme sugerido por Duffie e Beckman, 1991).

A energia trocada por radiação entre o solo e o céu (E_{gs}) foi determinada por

$$E_{gs} = \int_{0h}^{24h} \tau_{lwc} \epsilon_g \sigma A (T_{sup}^4 - T_s^4) dt \tag{8}$$

em que ϵ_g representa a emissividade da superfície do solo e τ_{lwc} representa a transmissividade do filme à radiação infravermelha. A transmissividade dos filmes plásticos à radiação infravermelha foi determinada no Departamento de Física da UFMG, utilizando-se um espectrômetro com faixa de operação de comprimentos de onda de 1µm a 20

um, para um ângulo de incidência normal à superfície do filme plástico. A partir da transmissividade espectral do filme (medida experimentalmente), foi determinada a emitância espectral do solo através da distribuição de Planck (faixa de temperatura verificada experimentalmente) e finalmente determinada a transmissividade global do filme à radiação infravermelha.

Finalmente, a energia perdida por convecção pela cobertura foi obtida através de

$$E_{conv} = \int_{0h}^{24h} hA(T_c - T_{amb})dt \quad (9)$$

onde h representa o coeficiente convectivo, modelado por Duffie e Beckman (1991).

A eficiência térmica do coletor solar da chaminé solar (η) pode ser definida como a razão entre a energia térmica absorvida pelo escoamento (E_E) e a energia solar incidente sobre a cobertura (E_S), conforme sugerido por Leon (2002) para secadores solares.

$$\eta = \frac{E_E}{E_S} \quad (10)$$

3 - RESULTADOS

A cobertura de um dispositivo solar deve apresentar, como características principais, uma alta transmissividade à radiação solar (maximizando a incidência de radiação solar sobre o absorvedor) e uma baixa transmissividade à radiação infravermelha (minimizando as perdas de radiação térmica emitida pelo absorvedor para o ambiente). Durante os ensaios realizados de fevereiro a outubro de 2003, foi utilizado o filme plástico termodifusor da Nortène e durante os ensaios realizados em novembro de 2003, foi utilizado o filme plástico tipo estufa da Nortène.

A Figura 4 apresenta a transmissividade média diária, à radiação solar, das coberturas plásticas utilizadas, em função do dia do ano. Além disso, também é apresentado o ângulo de incidência da radiação solar direta sobre uma superfície horizontal ao meio-dia (zênite de meio-dia) em função do dia do ano.

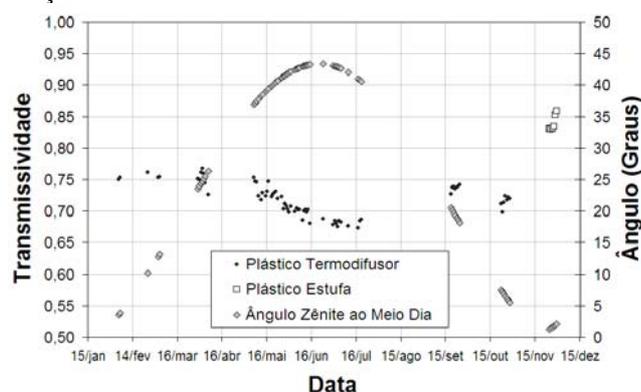


Figura 4. Transmissividade média diária dos filmes plásticos utilizados na cobertura à radiação solar.

Pode ser observado na Figura 4 que, durante os ensaios, a transmissividade do plástico termodifusor à radiação solar apresentou variação entre $67\pm5\%$ e $77\pm6\%$ e

que o plástico tipo estufa apresentou variação entre $83\pm6\%$ e $86\pm6\%$. A média da transmissividade do filme plástico termodifusor foi de $72\pm5\%$ e do filme plástico tipo estufa foi de $84\pm6\%$. Nota-se que há uma tendência de redução da transmissividade à radiação solar, do filme termodifusor, em função do aumento do ângulo zênite de meio-dia. Além disso, também é perceptível uma redução gradativa da transmissividade do filme plástico termodifusor ao longo dos ensaios, devido ao seu envelhecimento.

Para cada instante de amostragem, foi determinada a transmissividade dos filmes à radiação solar, para valores conhecidos do ângulo zênite (modelados de acordo com Duffie e Beckman, 1991). A média de todos os ensaios da transmissividade à radiação solar dos filmes plásticos utilizados, em função do ângulo zênite, pode ser observada na Figura 5. Como já mostrado na Figura 4, a transmissividade média à radiação solar do filme para estufa é superior à do filme termodifusor. Além disso, pode ser observado que maiores ângulos zênite proporcionaram menores transmissividades em ambos os filmes utilizados.

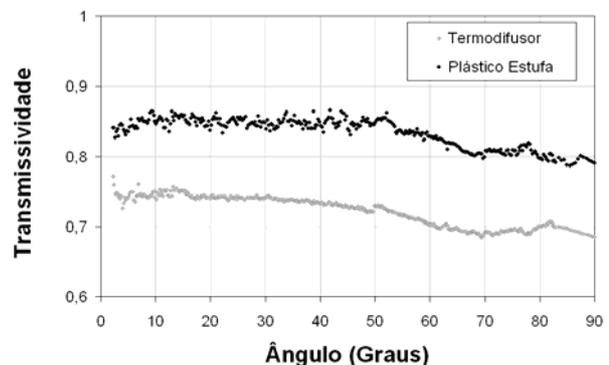


Figura 5. Média da transmissividade dos materiais da cobertura em função do ângulo zênite.

Uma análise das componentes diretas e difusas da radiação solar, em relação à radiação solar global incidente sobre o dispositivo, permitiu a caracterização do filme termodifusor utilizado. A Figura 6 apresenta a média anual da razão das componentes diretas e difusas da radiação solar (incidente sobre a cobertura e sobre o solo) pela radiação global externa, em função do horário do dia, para o filme plástico termodifusor.

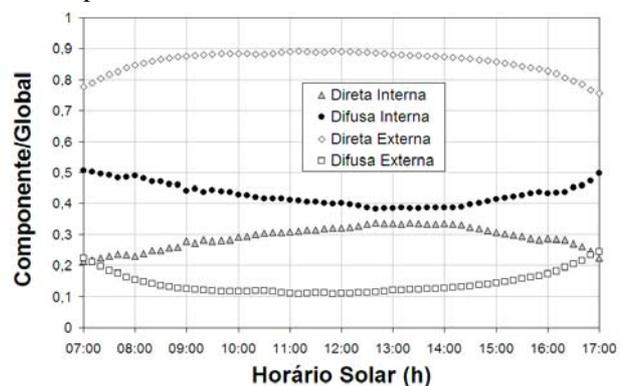


Figura 6. Componentes direta e difusa (interna e externa) da radiação solar para o filme termodifusor.

Pode ser observado que, durante os ensaios realizados, a componente direta da radiação solar incidente sobre a cobertura (direta externa) apresentou valores mais significativos do que a radiação solar difusa incidente sobre a cobertura (difusa externa). No entanto, ao se analisar a radiação solar incidente sobre o solo, pode ser observado que a componente difusa (difusa interna) supera a componente direta (direta interna). Este comportamento pode ser explicado pela natureza termodifusora do filme plástico utilizado, que promove uma dispersão parcial dos raios de radiação solar direta que o atravessam, convertendo, parcialmente, a radiação solar direta em difusa. Este fenômeno pode explicar como o plástico, de cor leitosa esbranquiçada, pode apresentar valores relativamente altos de transmissividade à radiação solar (aproximadamente 72%).

A Figura 7 apresenta a média da razão das componentes diretas e difusas da radiação solar (incidentes sobre a cobertura e sobre o solo) pela radiação global externa, em função do horário do dia, para o filme plástico para estufa. A componente direta da radiação solar incidente sobre a cobertura (direta externa) apresentou valores médios mais significativos do que os da componente difusa (difusa externa), apresentando o mesmo comportamento observado para o ensaio com o filme plástico termodifusor. Pode-se notar que, ao contrário do filme termodifusor, no filme plástico para estufa a componente direta da radiação solar incidente sobre a superfície do solo (direta interna) apresenta valores superiores ao da componente difusa (difusa interna). No entanto, o plástico para estufa também apresenta difusão parcial dos raios da radiação solar direta, de forma menos significativa do que o filme termodifusor. Este fato é comprovado pelos maiores valores da componente difusa da radiação solar incidente sobre o solo do que da componente difusa incidente sobre a cobertura (Figura 7). Mas, como este espalhamento é menos significativo do que no filme termodifusor, a componente direta interna incidente sobre o solo é maior do que a difusa interna (Figura 7).

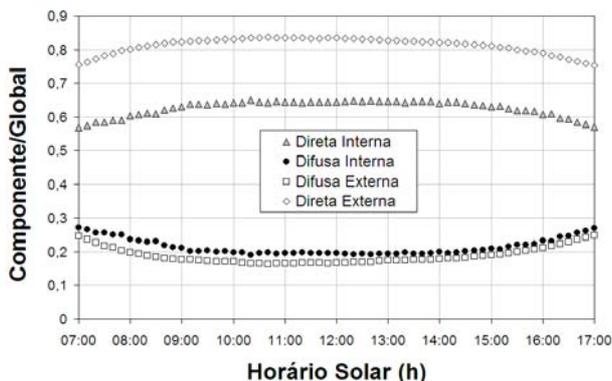


Figura 7. Componentes direta e difusa (interna e externa) da radiação solar para o filme para estufa.

A transmissividade do filme plástico termodifusor à radiação infravermelha (determinada experimentalmente através de um espectrômetro) apresenta um valor de $40,0 \pm 1,5\%$ e, a transmissividade do filme para estufas

apresenta um valor de $67, \pm 0,7\%$. Isso significa dizer que, apesar de o filme termodifusor apresentar uma desvantagem em relação ao plástico para estufa, por possuir uma menor transmissividade solar, apresenta a vantagem de ter uma menor transmissividade à radiação infravermelha, o que resulta em menores perdas de energia para o ambiente por radiação emitida pelo solo. Além disso, o filme termodifusor apresenta vantagens de envelhecimento lento e de alta resistência mecânica. O filme plástico termodifusor permaneceu no dispositivo por um período de 18 meses, durante o qual apresentou uma grande capacidade de resistência à ação do peso de água das chuvas. O mesmo comportamento não foi observado pelo filme para estufas que, com apenas dois meses de instalação, apresentou rompimentos em diversos pontos, devido à ação do peso da água das chuvas. Além disso, a difusividade da radiação solar, promovida pelo filme plástico termodifusor, ajuda a explicar a simetria angular de temperaturas do escoamento na região central do dispositivo, ilustrada na Figura 8. A Figura 8 apresenta a temperatura do escoamento ao longo do dia 23 de fevereiro (verão), para quatro posições angulares diferentes. Os termopares foram posicionados em uma altura correspondente à metade da altura da cobertura, em uma posição radial correspondente à metade do raio do coletor solar.

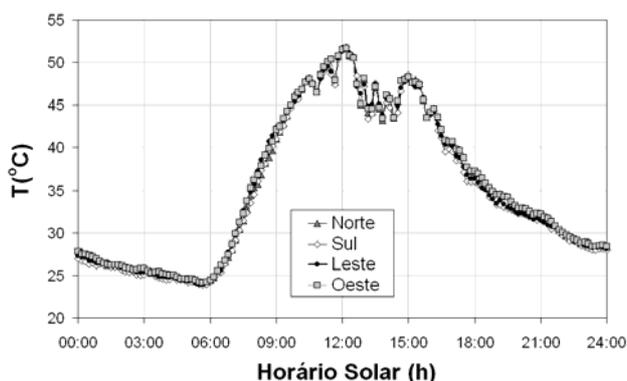


Figura 8 – Temperatura do escoamento na cobertura, em função do horário.

Os altos valores de transmissividade dos filmes plásticos à radiação infravermelha e menores valores de transmissividade à radiação solar (do que os apresentados pela maioria dos vidros) podem ser responsáveis por um baixo rendimento do coletor solar do dispositivo. O protótipo da chaminé solar apresentou uma eficiência térmica de aproximadamente 8%, que é baixa quando comparada a uma eficiência de 25% obtida para um secador tipo estufa com túnel testado por Condori et al. (2001). A substituição do material da cobertura por vidro, permitiria um aumento significativo em sua eficiência, mas com um conseqüente aumento do peso e dos custos do coletor solar. No entanto, ensaios experimentais do escoamento e de secagem mostraram que o dispositivo com cobertura plástica é mais interessante tecnicamente para secagem do que a secagem natural (utilizada para a grande parte dos alimentos no Brasil). A escolha do material ideal da cobertura dependerá da aplicação

desejada para o dispositivo e da disponibilidade do investimento para construção do secador (Ferreira, 2005). Um balanço global de energia na chaminé solar foi realizado no período de 19/09/2003 a 26/09/2003. A Figura 9 apresenta, de forma esquemática, as parcelas da energia, no balanço realizado na chaminé solar. Durante os ensaios, pode ser observado que, da radiação solar absorvida pela chaminé solar (cerca de 78%), apenas $8\pm 1\%$ da energia foi transferida para o escoamento de ar.

É importante observar que as perdas de energia solar para o ambiente (aproximadamente 22% da energia total disponível) e de energia térmica emitida pelo solo para o ambiente (aproximadamente 15% da energia total disponível) dependem, principalmente, do material da cobertura translúcida. A substituição do filme plástico termodifusor por vidro reduziria sensivelmente a energia solar perdida para o ambiente (por apresentar maiores transmissividades) e a parcela emitida pelo solo para o ambiente (uma vez que o vidro é praticamente opaco à radiação infravermelha). Outra perda de energia representativa e, até certo ponto, inesperada, ocorreu por condução para as camadas mais profundas do solo (cerca de 22% da energia total). Esperava-se, a princípio, que o solo funcionasse como um bom armazenador de calor, retendo parte do calor absorvido no período de brilho solar e devolvendo esta energia no período noturno. No entanto, cerca de um terço da energia armazenada não retorna para o escoamento. Uma alternativa interessante para aumentar a eficiência térmica do dispositivo seria a construção de uma camada de isolante térmico, sob o piso de concreto, minimizando, parcialmente, as perdas de energia por condução para o subsolo. Estas modificações aumentariam significativamente a eficiência do coletor solar da chaminé solar.

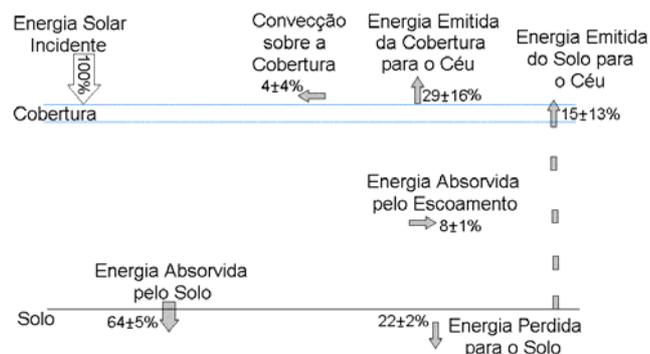


Figura 9. Representação esquemática do balanço de energia na chaminé solar.

4 - CONCLUSÕES

Ensaio solarimétricos realizados na cobertura do dispositivo com o plástico termodifusor da Nortène mostraram que a transmissividade média deste filme plástico à radiação solar foi de $72\pm 5\%$. Já os ensaios realizados com o plástico tipo estufa da Nortène demonstraram uma transmissividade média de $84\pm 6\%$ deste filme à radiação solar. Os valores de transmissividade à radiação solar, apresentados por ambos

os filmes, não inviabilizam sua utilização na cobertura de uma chaminé solar.

No entanto, o balanço energético realizado no dispositivo com o filme termodifusor indica que uma parcela significativa de energia é perdida através da transmissão, pela cobertura, de radiação infravermelha emitida pelo solo. Ensaio realizados mostraram que a transmissividade do filme termodifusor, na faixa do infravermelho, atinge $40,0\pm 1,5\%$, bastante elevada quando comparada à transmissividade do vidro (praticamente opaco ao infravermelho).

Para o filme plástico tipo estufa da Nortène, as perdas por radiação emitida do solo para o ambiente são maiores, uma vez que sua transmissividade ao infravermelho alcançou $67,0\pm 0,7\%$. Esta perda de energia, detectada no modelo físico, reduz significativamente a eficiência do dispositivo e pode ser contornada pela utilização de vidro como material da cobertura.

Do ponto de vista econômico (baixos pesos e custos), os filmes plásticos termodifusor e tipo estufa da Nortène se mostraram mais adequados para a cobertura da chaminé solar do que o vidro. No entanto, dificuldades encontradas no escoamento de águas de chuvas e de reparos dos danos físicos ocorridos devido ao acúmulo destas águas demonstraram a necessidade da confecção da cobertura em menores módulos e do investimento em um sistema de drenagem (ou a substituição da cobertura por vidro).

Do ponto de vista da radiação solar, o filme tipo estufa apresentou transmissividade próxima à de alguns vidros (cerca de 84%) e o filme termodifusor uma transmissividade um pouco menor (cerca de 72%), adequadas para a aplicação proposta. No entanto, a transmissividade dos filmes plásticos da Nortène à radiação emitida pelo solo é elevada e é um dos principais fatores da baixa eficiência do modelo físico.

O protótipo construído apresentou uma baixa eficiência térmica ($8\pm 1\%$), devido principalmente à difusão de calor através do solo e à transmissão de radiação infravermelha pela cobertura. Estas perdas podem ser minimizadas por isolamento térmico do solo e por substituição do material plástico da cobertura por vidro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bernardes, M.A. S.; Vofß, A., Weinrebe, G. Thermal and technical analyses of solar chimneys, *Solar Energy*, 75, 511-524, 2003.
- Condorí, M.; Echazú, R.; Saravia, L. Solar Drying of Sweet Pepper and Garlic using the Tunnel Greenhouse Drier. *Renewable Energy*. v. 22, p. 447-460. 2001.
- Duffie, J. A.; Beckman, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2nd ed. New York: Jonh Wiley & Sons, 1991, 919 p.
- Ferreira, A.G., *Estudo de Viabilidade Técnica da Utilização de uma Chaminé Solar como Secador de Alimentos*. 2004. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- Ferreira, A. G., Cortez, M. F. B., Valle, R. M., Brasil, C. S., *Estudo Teórico do Escoamento de Ar em uma Chaminé Solar com Condições Reais de Insolação*. CONEM, 2000.

- Haaf, W., Solar Chimneys: Preliminary Test Results from the Manzanares Pilot Plant, **Int. J. Solar Energy**, v.2, p.141-161, 1984.
- Leon, M. A.; Kumar, S.; Bhattacharya, S. C. A Comprehensive Procedure for Performance Evaluation of Solar Food Dryers, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 6, p 367-393, 2002.
- Maia, C. B., Ferreira, A. G., Valle, R. M., Cortez, M. F. B., **Experimental and Theoretical Evaluation of a Solar Chimney Test Plant Part I: Theoretical Treatment**. International Congress of Mechanical Engineering - COBEM, 2005.
- Mullett, L. B., The Solar Chimney – Overall Efficiency, Design and Performance, **Int. J. of Ambient Energy**, v. 8, n. 1, p.35-40, 1987.
- Richards, R., Hot Air Starts to Rise Through Spain's Solar Chimney, **Electrical Review**, v. 210, n. 15, p. 26-27, 1982.
- Schlaich, J., **The Solar Chimney: Electricity from the Sun**, Stuttgart: Axel Menges, 1995.
- Schlaich, J., Up-wind Power Station: Principle – Prototype in Spain – Future prospects, **VGB Kraftwerkstechnik**, v. 62, n. 11, 1982.

