



**XIENCAC**  
ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO  
NO AMBIENTE CONSTRUIDO

**VIIELACAC**  
ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO  
NO AMBIENTE CONSTRUIDO

Búzios - RJ - 2011

## **ANÁLISE TEÓRICA DO USO DE CHAMINÉS SOLARES PARA INCREMENTAR A VENTILAÇÃO NATURAL EM EDIFICAÇÕES**

**Leticia O. Neves (1); Maurício Roriz (2)**

- (1) Arquiteta, Doutoranda do Programa de Pós-Graduação na Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), [leneves@gmail.com](mailto:leneves@gmail.com)  
(2) Arquiteto, Doutor, Docente do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e do Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), [m.roriz@terra.com.br](mailto:m.roriz@terra.com.br)

### **RESUMO**

A necessidade crescente de redução no consumo de energia vem contribuindo para a disseminação do uso de estratégias passivas de climatização de edificações, em substituição aos sistemas mecânicos. Dentre as técnicas de condicionamento térmico passivo, a ventilação natural é extremamente importante para climas quentes e úmidos, característicos de grande parte do território brasileiro, podendo ocorrer por ação dos ventos, por efeito chaminé ou pela combinação de ambos. Em áreas urbanizadas, as velocidades dos ventos são sensivelmente reduzidas pelos obstáculos locais, tornando o efeito chaminé uma alternativa de projeto mais viável, pois independe dos ventos. Este artigo tem por objetivo avaliar o potencial de uso de chaminés solares para promover a ventilação natural em edificações habitacionais térreas, submetidas ao clima quente e úmido da cidade de Belém, PA. Previsões teóricas foram desenvolvidas através da análise e aplicação de um modelo matemático. Foram investigados os efeitos causados por alterações na configuração geométrica e construtiva do sistema, incluindo comprimento e inclinação da chaminé, profundidade do canal de ar, tipo de vidro e espessura do isolante térmico utilizado no coletor solar. Os resultados foram analisados quanto à vazão proporcionada no interior da chaminé e quanto ao número de trocas de ar resultante da sua instalação em um ambiente de dimensões recorrentes em habitações térreas. Estes resultados contribuem para a difusão da aplicabilidade da chaminé solar em clima quente e úmido, tendo em vista que, apesar de pouco explorado no Brasil, tal sistema tem grande potencial de aplicação como estratégia de condicionamento passivo de ambientes.

Palavras-chave: ventilação natural, efeito chaminé, chaminé solar, modelo matemático.

### **ABSTRACT**

The increasing need of reduction of energy consumption in buildings is contributing to the dissemination of passive thermal conditioning strategies. One of the most important strategies for passive cooling in Brazilian typical climates is natural ventilation, which can occur by wind forces and by pressure and temperature differences between inlet and outlet (stack effect). The second choice can be more effective in urban areas, where there are obstacles that are able to block or reduce significantly the speed of the winds. This paper analyses the potential of using solar chimneys to promote natural ventilation in low rise buildings located in a region of hot and humid weather in Brazil – city of Belem, Para State. The effects of variation in geometric and constructive configurations of a solar chimney have been investigated, including length and tilt of the chimney, depth of the air channel, glass type and thermal insulation thickness used in the solar collector. It was analyzed the air flow rate obtained inside the solar chimney and the number of air changes per hour from the installation of the system on a space of common dimensions in ground floor buildings. Results confirm the applicability of the solar chimney in hot and humid weather and confirm that, rather yet not usual in Brazil, the system has great potential of applicability as a passive conditioning strategy.

Keywords: natural ventilation, stack effect, solar chimney, mathematical model.

## 1. INTRODUÇÃO

A ventilação natural é um recurso a ser explorado para prover saúde e conforto aos ocupantes das edificações, além de contribuir para a redução do consumo de energia. Segundo a NBR 15220 (ABNT, 2005), a ventilação natural permanente é indicada como principal estratégia de resfriamento passivo para a zona bioclimática 08, que inclui o município de Belém, PA.

No caso de habitações, a ASHRAE *Fundamentals* (2005) especifica como requisitos mínimos de ventilação natural uma taxa de ar externo de 0,05L/s por metro quadrado de piso mais 3,5L/s por pessoa, baseado em valores normais de ocupação. No entanto, a taxa de ventilação necessária para prover conforto térmico aos ocupantes de uma edificação vai depender também do calor em excesso a ser removido do ambiente e da diferença de temperatura entre os ambientes interno e externo (ASHRAE, 2005). De acordo com Frota e Schiffer (2001), a carga térmica transferida pela ventilação pode ser calculada através de:

$$Q_{vent} = 0,35 \cdot N \cdot V \cdot \Delta t \quad \text{Equação 1}$$

Sendo:

$Q_{vent}$	Carga térmica do ambiente (W)
0,35	Calor específico x densidade do ar (W/m <sup>3</sup> °C)
N	Taxa de renovação do ar horária do recinto
V	Volume do recinto (m <sup>3</sup> )
$\Delta t$	Diferença de temperatura do ar interno e externo (°C)

Os ventos variam constantemente em direção e velocidade, sendo praticamente impossível prever, com níveis razoáveis de precisão, os seus efeitos sobre a ventilação de ambientes internos. Em áreas urbanizadas, as velocidades dos ventos são sensivelmente reduzidas pelos obstáculos locais, tornando o efeito chaminé uma alternativa de projeto mais viável, pois independe dos ventos.

A ventilação por efeito chaminé depende de interações entre diversos fatores, que incluem a diferença de temperatura entre o ambiente interno e externo, a área das aberturas de entrada e saída do ar, a diferença de altura e a posição relativa entre elas. Em vista disso, a eficiência desta estratégia é reduzida quando há pouca diferença de altura entre as aberturas de entrada e saída do ar ou quando as temperaturas internas e externas são próximas, situações frequentes em edificações térreas localizadas em clima quente e úmido. Em tais casos, uma forma de favorecer o movimento de ar por estratificação térmica em um ambiente é através do uso da energia solar para incrementar o diferencial de temperatura, visando intensificar o processo de exaustão do ar aquecido. Isto pode ser feito através de um tipo particular de chaminé, denominado chaminé solar.

A chaminé solar é um sistema que utiliza a energia proveniente da radiação solar para aquecer o ar e induzir o efeito chaminé, por meio do incremento das diferenças de pressão e temperatura entre a entrada e a saída do ar. Qualquer chaminé externa é, em teoria, uma chaminé solar, pois a radiação solar absorvida por sua superfície influencia no fluxo ascendente de ar. No entanto, a incorporação de alguns atributos importantes contribuem para o melhor desempenho do sistema (Figura 1):

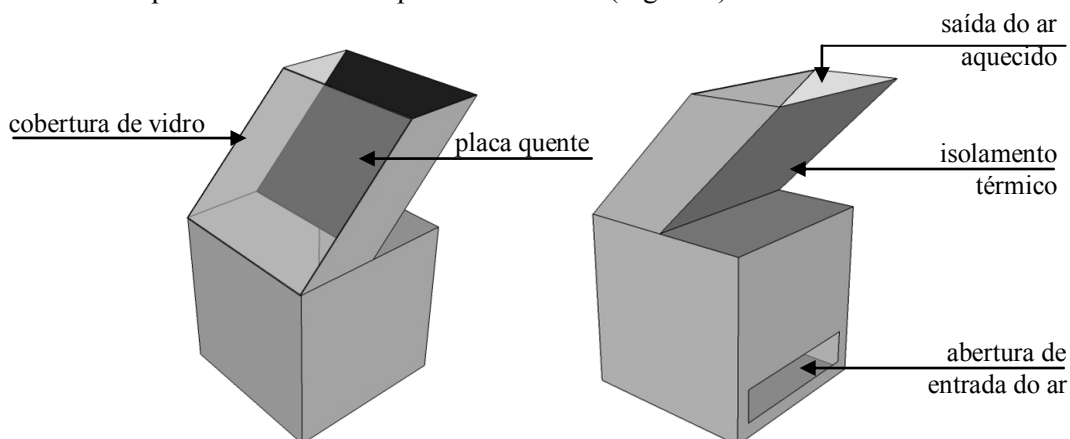


Figura 1 – Esquema de uma chaminé solar inclinada

- Uso de duas superfícies paralelas - uma cobertura de vidro na face externa e uma placa negra absorvedora na parte interna – formando um canal para circulação do ar entre elas. O aquecimento do ar neste canal é incrementado por consequência do efeito estufa, induzindo o movimento ascendente do ar.

- Uso de isolamento térmico no conjunto, especialmente nas laterais e base do coletor solar, para reduzir as perdas de calor por condução.
- Como o ângulo de incidência da radiação solar varia em função da latitude do local e da época do ano, o uso de uma inclinação ótima da superfície coletora torna-se vantajoso, na medida em que eleva a irradiância.

O funcionamento de uma chaminé solar depende de suas características geométricas e construtivas, bem como das propriedades físicas dos materiais e das superfícies. Quanto à configuração geométrica, são importantes o comprimento, a largura e a profundidade do canal da chaminé; a área da superfície coletora (cobertura de vidro) e o ângulo de inclinação do coletor. Quanto às características construtivas e aos materiais utilizados, itens importantes a analisar compreendem o tipo de vidro utilizado no coletor; a absorvância solar da placa quente; o material e a espessura do isolamento térmico utilizado no conjunto.

Grande parte dos trabalhos publicados sobre chaminés solares trata de chaminés verticais (HIRUNLABH et al, 1999; AFONSO e OLIVEIRA, 2000; ONG e CHOW, 2003; entre outros). Um dos primeiros trabalhos a considerar os efeitos da inclinação da chaminé foi o artigo de Bansal et al (1993). Os autores desenvolveram um modelo matemático em regime térmico estacionário, que considera a inclinação do coletor, diferentes tamanhos de abertura da chaminé e valores variados de coeficiente de descarga (perdas de carga devido ao atrito nas aberturas). O modelo permite estimar a temperatura da placa quente, a vazão e a temperatura do ar no canal da chaminé.

Mathur et al (2006) utilizaram métodos experimentais e teóricos para investigar o efeito da inclinação da placa quente na taxa de ventilação de uma chaminé solar, durante os meses de verão, para diferentes latitudes. O estudo teórico consistiu no desenvolvimento de equações de balanço de energia para a placa quente, o vidro e o ar, conforme sugerido por Hirunlabh et al (1999) e Ong e Chow (2003).

Bassiouny e Korah (2009) estudaram, através de modelo matemático semelhante ao proposto por Mathur et al (2006), os efeitos da inclinação do coletor no número de renovações de ar por hora e no padrão de fluxo de ar interno da chaminé solar. A validação dos estudos teóricos foi realizada através dos dados experimentais de Mathur et al (2006). Sakonidou et al (2008) aprofundaram o estudo sobre os efeitos da inclinação do coletor na velocidade do ar no canal e na absorção da radiação solar incidente, através da utilização de um modelo matemático para determinar o ângulo de inclinação do coletor que maximiza os fluxos de ar no interior da chaminé. Segundo os autores, a concordância razoável entre resultados experimentais e previsões teóricas encorajam o uso de modelos matemáticos como ferramenta para avaliação de parâmetros de projeto e estudos comparativos de chaminés solares.

## 2. OBJETIVO

Este artigo tem por objetivo apresentar uma avaliação do potencial de uso de chaminés solares para promover a ventilação natural em habitações térreas localizadas em Belém, PA.

## 3. MÉTODO

O método de trabalho foi dividido em três etapas, descritas nos itens seguintes:

### 3.1. Calibração do modelo matemático

O modelo matemático adotado para análise consiste em três equações de balanço de energia – para o vidro, o ar no canal da chaminé e a placa quente – apresentadas por diversos autores da literatura especializada, entre eles Mathur et al (2006), Bassiouny e Korah (2009), Sakonidou et al (2008) e Ong e Chow (2003), com pequenas variações entre elas. São três as variáveis desconhecidas no sistema de equações: temperaturas superficiais médias do vidro ( $T_v$ ) e da placa quente ( $T_p$ ) e temperatura média do ar no canal da chaminé ( $T_c$ ). Mathur et al (2006) apresentam as seguintes equações:

- Equação do balanço de energia no vidro:

$$[H \cdot \alpha_v \cdot A_v] + [h_{rpv} \cdot A_w(T_p - T_v)] = [h_v \cdot A_v(T_v - T_c)] + [U_t \cdot A_v(T_v - T_a)] \quad \text{Equação 2}$$

- Equação do balanço de energia no ar que circula no canal:

$$[h_p \cdot A_p(T_p - T_c)] + [h_v \cdot A_v(T_v - T_c)] = \left[ \frac{m \cdot c_{c1} \cdot (T_c - T_{amb})}{\gamma} \right] \quad \text{Equação 3}$$

- Equação do balanço de energia na placa quente:

$$[H \cdot \alpha_p \cdot \tau_v \cdot A_p] = [h_p \cdot A_p(T_p - T_c)] + [h_{rpv} \cdot A_p(T_p - T_v)] + [U_b \cdot A_p(T_p - T_{amb})] \quad \text{Equação 4}$$

Sendo:

H	Irradiância solar na superfície inclinada da chaminé (W/m <sup>2</sup> )
$\alpha_v$	Absortância do vidro
$A_v$	Área do vidro (m <sup>2</sup> )
$h_{rpv}$	Coefficiente de transferência de calor por radiação entre o vidro e a placa quente (W/(m <sup>2</sup> .K))
$A_p$	Área da placa quente (m <sup>2</sup> )
$T_p$	Temperatura média da placa quente (K)
$T_v$	Temperatura média do vidro (K)
$h_v$	Coefficiente de transferência de calor por convecção entre o vidro e o ar no canal (W/(m <sup>2</sup> .K))
$T_c$	Temperatura média do ar no canal (K)
$U_t$	Coefficiente global de perda de calor do vidro para o ambiente externo (W/(m <sup>2</sup> .K))
$T_a$	Temperatura do ar externo (K)
$h_p$	Coefficiente de transferência de calor por convecção entre a placa quente e o ar no canal (W/(m <sup>2</sup> .K))
$m$	Vazão mássica (kg/s)
$c_{ei}$	Calor específico do ar na película próxima à placa quente (J/(Kg.K))
$\gamma$	Constante de ponderação da temperatura média do ar no canal (=0,74, conforme sugerido por Ong e Chow, 2003)
$T_{amb}$	Temperatura média do ar no ambiente ventilado pela chaminé (K)
$\alpha_p$	Absortância da placa quente
$\tau_v$	Transmitância do vidro
$U_b$	Coefficiente global de transferência de calor da placa quente (W/(m <sup>2</sup> .K))

Para possibilitar a resolução do modelo matemático, os autores adotam as seguintes hipóteses: o ar é considerado incompressível, em fluxo laminar e sob regime estacionário; a temperatura do ar na entrada do canal é considerada a mesma do ambiente interno; as perdas por atrito são desprezadas, devido à baixa velocidade do ar no canal; todas as propriedades físicas do fluido que constitui a película são avaliadas a uma temperatura média entre o fluido e a superfície mais próxima.

Para calibração do modelo, as equações foram analisadas quanto à sua capacidade em quantificar corretamente os efeitos do uso da chaminé solar para induzir a ventilação natural, através de uma comparação feita com dados experimentais de Mathur et al (2006). Na análise, foram abordados diferentes modelos de cálculo das seguintes variáveis:

- Coeficiente de transferência de calor por convecção entre o vidro e o ar ( $h_v$ ) e entre a placa quente e o ar ( $h_p$ ): métodos de cálculo apresentados por Mathur et al (2006), Bassiouny e Korah (2009) e Incropera e DeWitt (1992).
- Temperatura do céu ( $T_{ceu}$ ): métodos de cálculo propostos por Swinbank (1963) para céu limpo ( $N=0$ ) e pelo EnergyPlus Engineering Reference (2010) para céu limpo e nebuloso ( $N=6$ ), ambos aplicados à equação para cálculo do coeficiente global de perda de calor do vidro para o ambiente externo ( $U_t$ ) de Mathur et al (2006).
- Vazão mássica no canal ( $m$ ): métodos de cálculo apresentados por Mathur et al (2006) e Sakonidou et al (2008).

Como dados de entrada para a calibração, foram utilizados os dados climáticos, as características geométricas e as propriedades físicas dos materiais conforme o experimento de Mathur et al (2006), apresentados na tabela abaixo:

Tabela 1– Dados de entrada do modelo matemático conforme experimento de Mathur et al (2006)

Parâmetro	Dado de entrada
Comprimento da chaminé	$C = 1$ m
Largura da chaminé	$L = 1$ m
Profundidade do canal	$e = 0,35$ m
Inclinação da chaminé em relação à horizontal	$\theta = 45^\circ$
Espessura do isolamento térmico atrás da placa quente	$\Delta_{isol} = 0,075$ m
Irradiância solar na superfície inclinada	$H = 500$ a $750$ W/m <sup>2</sup>
Coefficiente de descarga	$C_d = 0,57$
Coefficiente de transferência de calor por condução do vidro	$h_c = 5,91$ W/m <sup>2</sup> .K
Condutividade térmica do isolante térmico	$\lambda = 0,037$ W/m.K
Velocidade do vento	$V_{ext} = 0,01$ m/s
Absortância do vidro	$\alpha_v = 0,06$
Transmitância do vidro	$\tau_v = 0,84$
Emissividade da face externa do vidro	$\epsilon_v = 0,90$
Absortância da placa quente	$\alpha_p = 0,90$
Emissividade da placa quente	$\epsilon_p = 0,95$
Temperatura do ar externo (igual à temperatura do ambiente interno)	$T_a = T_{amb} = 299,2$ a $313,0$ K

A escolha do procedimento experimental de Mathur et al (2006) como parâmetro de comparação para a calibração do modelo matemático se deve ao fato dos autores apresentarem estudos referenciados pela literatura especializada e com resultados consistentes de pesquisas que vêm se desenvolvendo desde a década de 1990. Além disso, o artigo apresenta informações detalhadas das variáveis climáticas de entrada, da geometria e dos materiais utilizados no experimento, bem como especifica resultados de desempenho sob diferentes irradiâncias solares.

Para resolução do modelo matemático, foi utilizado o *software* Matlab (versão 7.9). Partindo-se de estimativas iniciais das temperaturas desconhecidas – temperatura superficial do vidro ( $T_v$ ), temperatura do ar no canal da chaminé ( $T_c$ ) e temperatura superficial da placa quente ( $T_p$ ) – por meio de sucessivas iterações obteve-se os valores finais das mesmas.

### 3.2. Análise paramétrica de características geométricas e construtivas da chaminé solar

Após aferido, o modelo matemático foi utilizado para análises de diferentes configurações geométricas e construtivas de uma chaminé solar, aplicada às condições climáticas e geográficas da cidade de Belém. Esta análise teve como objetivo identificar e quantificar características que contribuam para maximizar a vazão da chaminé solar.

Foram investigados os efeitos da variação de três características geométricas:

- Comprimento da chaminé (C): 1m, 2m, 3m.
- Profundidade do canal de ar (e): 0,10m, 0,35m, 0,60m.
- Ângulo de inclinação entre a chaminé e a horizontal ( $\theta$ ): 17° sem extensor (inclinação ideal para máxima irradiância no mês de novembro, em Belém), 45° sem extensor e 17° com extensor metálico vertical na chaminé, para garantir a manutenção de altura equivalente à chaminé de 45° (Figura 2). Em todos estes casos, o coletor solar foi considerado com orientação sul.



Figura 2 – Variação no ângulo de inclinação da chaminé

Foram também investigados os efeitos da variação de duas características construtivas:

- Espessura do isolamento térmico nas laterais e base: 0,025m e 0,075m.
- Cobertura de vidro: vidro incolor comum ( $\epsilon_v = 0,90$  e  $\tau_v = 0,84$ ) e vidro de baixa emissividade (*low-e*,  $\epsilon_v = 0,20$  e  $\tau_v = 0,84$ ).

A largura da chaminé manteve-se fixa em 1m e a área de vidro do coletor manteve-se fixa em 1m<sup>2</sup>. Não foram consideradas as influências dos ventos externos disponíveis ( $V=0,01\text{m/s}$ ), de forma a verificar o desempenho isolado do efeito chaminé com o uso da chaminé solar.

Os dados climáticos de Belém utilizados nas análises consistem na média máxima mensal de temperatura de bulbo seco e na irradiância solar máxima incidente na superfície horizontal (correspondente às 12h), referentes ao mês mais quente – novembro – de dados coletados nos anos de 2008 e 2009, obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMet - Tabela 2). A irradiância solar na superfície inclinada do coletor (H) foi calculada através de um modelo teórico consagrado na literatura especializada, publicado por Muneer (2004 apud RORIZ, 2010).

Tabela 2– Dados climáticos de Belém-PA - média para novembro de 2008 e 2009 (INMet)

Local	Mês	Hora	TBS (°C)	Torv (°C)	Irradiância solar máxima (W/m <sup>2</sup> )	
					Incidente na horizontal	Incidente no plano inclinado, orientação Sul (H)
Belém-PA Latitude 01°27'S Zona bioclimática 8	11	8h	24,8	22,3	312	305 (17°) 269 (45°)
		10h	27,9	22,5	659	655 (17°) 585 (45°)
		12h	33,1	22,0	810	810 (17°) 727 (45°)
		14h	32,9	21,5	659	655 (17°) 585 (45°)
		16h	32,4	21,6	312	305 (17°) 269 (45°)

O desenvolvimento das análises baseou-se na aplicação do modelo matemático calibrado. Os resultados obtidos são apresentados na forma de gráficos comparativos – incluindo dados de temperatura superficial do vidro ( $T_v$ ) e da placa quente ( $T_p$ ), temperatura do ar no canal ( $T_c$ ) e vazão mássica ( $m$ ) – de forma a destacar as configurações de melhor desempenho.

### 3.3. Análise do desempenho da chaminé solar em uma habitação térrea

Os resultados obtidos na análise paramétrica foram utilizados para calcular a taxa de ventilação (número de trocas de ar por hora) resultante da instalação da chaminé solar em um ambiente de dimensões típicas em habitações – 3m x 4m x 2,7m (32,4m<sup>3</sup>), localizado em Belém. Uma carga térmica hipotética foi calculada, de forma a verificar se a taxa de ventilação obtida seria suficiente para remoção do calor no ambiente analisado.

## 4. ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.1. Resultados da calibração do modelo matemático

A fim de validar os resultados obtidos com a aplicação do modelo matemático, uma comparação foi feita com os resultados experimentais de Mathur et al (2006), para uma chaminé solar de 1m de comprimento, 45° de inclinação, localizada na cidade de Jaipur, Índia. Para isso, foram avaliados os valores resultantes de  $T_v$ ,  $T_c$ ,  $T_p$  e  $V$  obtidos através do modelo, em comparação com o experimento. Para calibração, foram verificadas as equações de cálculo de algumas variáveis cujos resultados mais se aproximam aos dados medidos no experimento.

A primeira análise de calibração consistiu na comparação entre três modelos de cálculo dos coeficientes de convecção  $h_v$  e  $h_p$  com os resultados experimentais de Mathur et al (2006). Os resultados obtidos para temperatura superficial do vidro ( $T_v$ ) e da placa quente ( $T_p$ ) e para temperatura do ar no canal ( $T_c$ ) são apresentados na Figura 3. Os resultados teóricos que mais se aproximaram dos dados experimentais correspondem ao  $h_v$  proposto por Bassiouny e Korah (2009) e ao  $h_p$  proposto por Mathur et al (2006).

A segunda análise consistiu na comparação entre dois modelos de cálculo de temperatura do céu ( $T_{ceu}$ ), considerando céu limpo ( $N=0$ ) e nebuloso ( $N=6$ ), aplicados à equação do coeficiente global de perda de calor do vidro para o ambiente externo. Os resultados obtidos para  $T_v$  são apresentados na Figura 4. Nesta segunda análise foram utilizados, como dados de entrada, os coeficientes de convecção que apresentaram resultados mais próximos aos resultados experimentais, obtidos através da primeira análise.

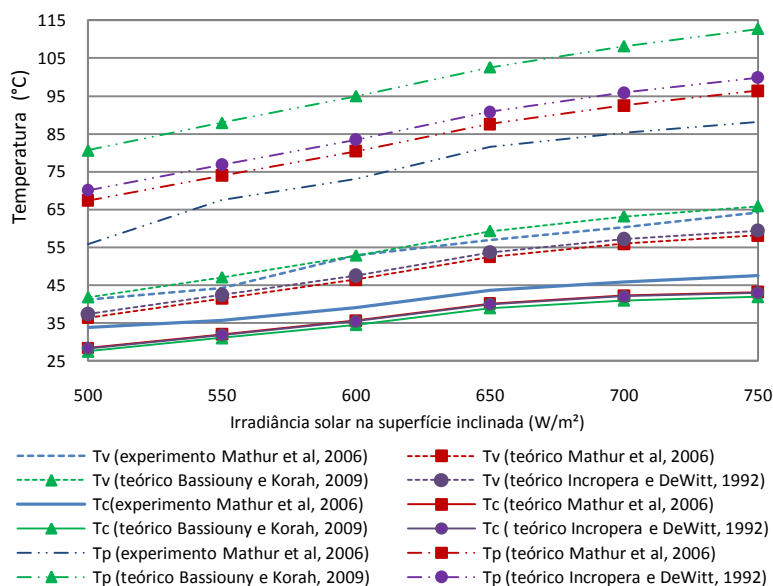


Figura 3 – Calibração de  $h_v$  e  $h_p$

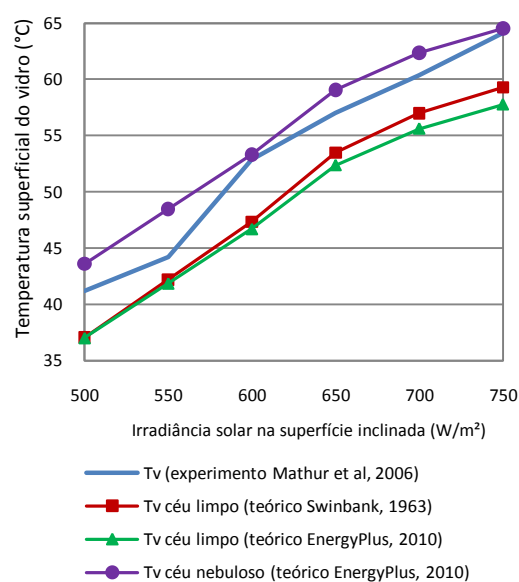


Figura 4 – Calibração de  $T_{ceu}$

Os resultados teóricos da segunda análise indicaram uma grande influência da temperatura do céu no cálculo do coeficiente global de perda de calor pelo vidro, pois o cálculo utilizando céu nebuloso indicou uma aproximação significativa de  $T_v$  com os dados experimentais.

A terceira análise consistiu na comparação entre dois modelos de cálculo de velocidade do ar ( $V$ ). Para isso, foi utilizado o cálculo de  $T_{ceu}$  disponível no EnergyPlus (2010) para céu nebuloso.

Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 5. O modelo teórico que apresentou resultados mais próximos aos dados experimentais foi o de Mathur et al (2006).

Decorridas as análises de calibração, o modelo teórico calibrado incorporou o cálculo de  $h_v$  proposto por Bassiouny e Korah (2009),  $h_p$  e  $V$  propostos por Mathur et al (2006) e Tceu para céu nebuloso adotado no EnergyPlus (2010). Se comparados aos resultados experimentais, este modelo apresentou resultados aproximadamente 4% acima para  $T_v$ , 10% acima para  $T_p$ , 10% abaixo para  $T_c$  e 25% abaixo para  $V$ .

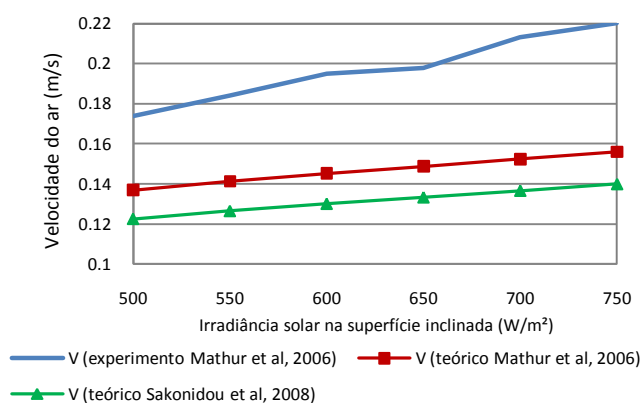


Figura 5 – Calibração de  $V$

## 4.2. Resultados da análise paramétrica

O modelo matemático calibrado foi utilizado para realização da análise paramétrica da chaminé solar, que abordou três variações geométricas (comprimento, profundidade do canal de ar e ângulo de inclinação com a horizontal) e duas variações construtivas (isolamento térmico e tipo de vidro).

Os valores definidos como base para todas as análises foram os seguintes: comprimento 1m, profundidade 0,35m, ângulo de inclinação  $45^\circ$ , espessura do isolamento térmico 0,075m e vidro comum (em cada caso, variou-se apenas um parâmetro, mantendo-se fixos os demais). A largura da chaminé manteve-se fixa em 1m e a área de vidro do coletor manteve-se fixa em  $1m^2$ .

A Figura 6 apresenta os resultados obtidos na análise de variação no comprimento da chaminé. Foi verificado um incremento médio de 60% na vazão mássica decorrente do aumento da chaminé de 1m para 2m. O aumento para 3m provocou um incremento adicional de 30%.

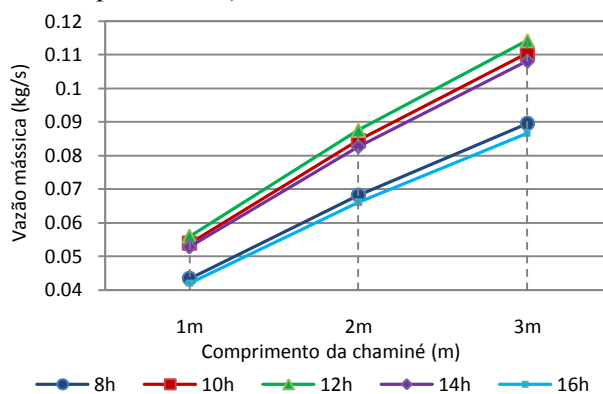


Figura 6 – Fluxo de ar - variação no comprimento da chaminé

As Figuras 7 e 8 apresentam os resultados da variação na profundidade do canal de ar da chaminé solar. Observou-se um incremento de 135% na vazão e uma queda de aproximadamente 6 a 10% na temperatura do ar no canal, resultante do aumento na profundidade do canal de 0,1m para 0,35m. Já o aumento de 0,35m para 0,6m resultou em um incremento de 44% na vazão e uma queda na temperatura de 1 a 3%. A queda na temperatura do ar interno da chaminé e a aproximação à temperatura do ar externo indica a existência de um limite para a profundidade do canal de ar, para que não ocorra fluxo reverso na chaminé.

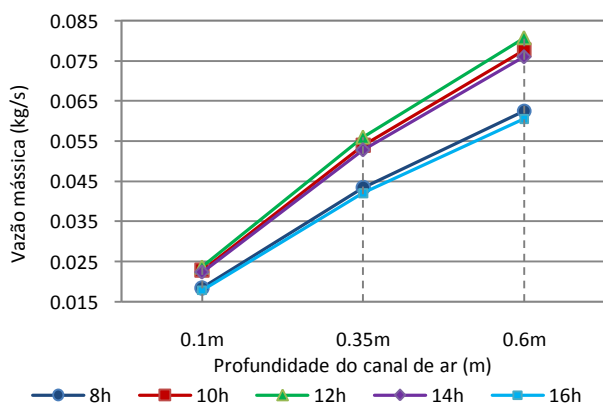


Figura 7 – Fluxo de ar - variação na profundidade do canal

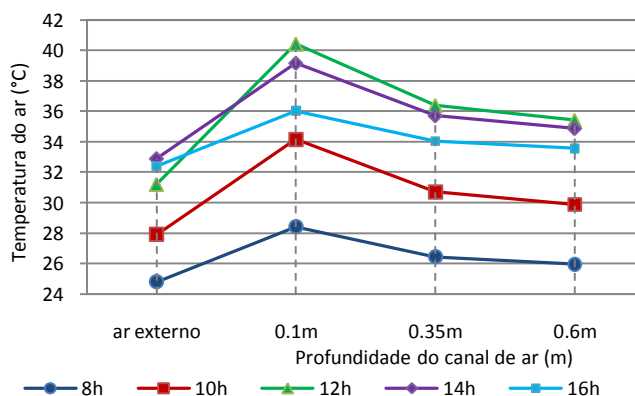


Figura 8 – Temperatura do ar no canal

Apresenta-se, na Figura 9, o fluxo de ar resultante da variação no ângulo de inclinação da chaminé solar com a horizontal. Foram testadas uma chaminé com ângulo de inclinação  $17^\circ$ , uma com inclinação  $45^\circ$



e uma com inclinação de 17°, provida de um extensor vertical para garantir manutenção de altura total equivalente à chaminé de 45° (Figura 2). Todas as chaminés possuem orientação sul.

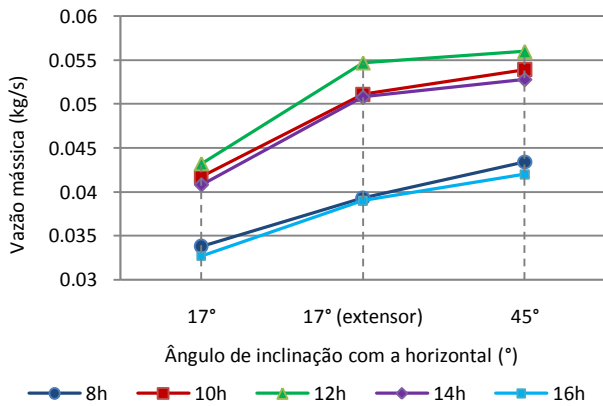


Figura 9 – Fluxo de ar - variação no ângulo de inclinação

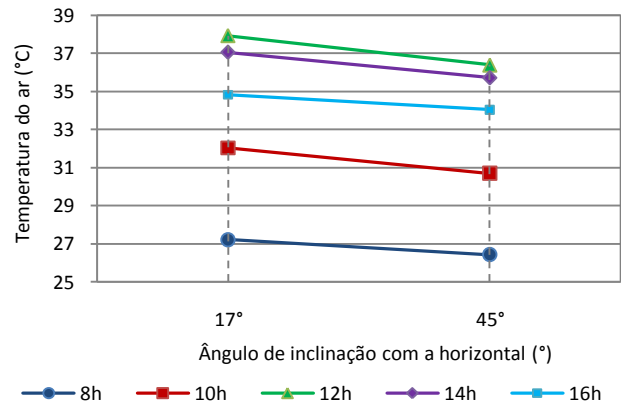


Figura 10 – Temperatura do ar no canal

A chaminé a 45° provocou um incremento de 28 a 30% no fluxo de ar, em comparação com a chaminé a 17° sem extensor. A adoção da extensão vertical na chaminé a 17° provocou um incremento de 16 a 27% na vazão, em comparação com a chaminé sem extensor. O uso do extensor na chaminé de 17° de inclinação não garantiu a obtenção de um fluxo de ar equivalente à chaminé de 45°, mas os resultados obtidos foram bastante próximos, principalmente no horário de pico da radiação solar, 12h.

Para a baixa latitude da cidade de Belém, o ângulo ótimo de inclinação para máxima irradiância no plano do coletor da chaminé solar é de 17° voltado para o sul, no mês de novembro. No entanto, o uso desta inclinação resulta em uma baixa altura, provocando pouca diferença de pressão dentro da chaminé e dificultando o fluxo de ar. Daí a importância no uso do extensor, de forma a auxiliar na ascensão do ar por diferença de pressão entre as aberturas de entrada e saída do ar.

A Figura 10 apresenta as temperaturas do ar no canal da chaminé resultantes da variação no ângulo de inclinação com a horizontal. Observa-se uma redução de 2 a 4% na temperatura do ar, decorrentes da mudança na inclinação de 17° para 45°. No caso da chaminé de 45°, a ligeira queda na temperatura é compensada pela maior diferença de altura entre as aberturas, resultando em maior fluxo de ar.

As Figuras 11 a 13 apresentam os resultados obtidos na análise paramétrica de características construtivas da chaminé solar. Foi verificada a influência da espessura do isolamento térmico no coletor e da troca do vidro comum por um vidro de baixa emissividade (*low-e*).

O aumento na espessura do isolante térmico de 0,025m para 0,075m resultou em um aumento pouco significativo na temperatura do ar no canal, de no máximo 1% (Figura 12). Já a temperatura superficial do vidro aumentou de 2 a 4% e a temperatura superficial da placa quente aumentou de 5 a 6% (Figura 11). Em vista disso, o fluxo de ar no canal sofreu um incremento de 3 a 5% (Figura 13).

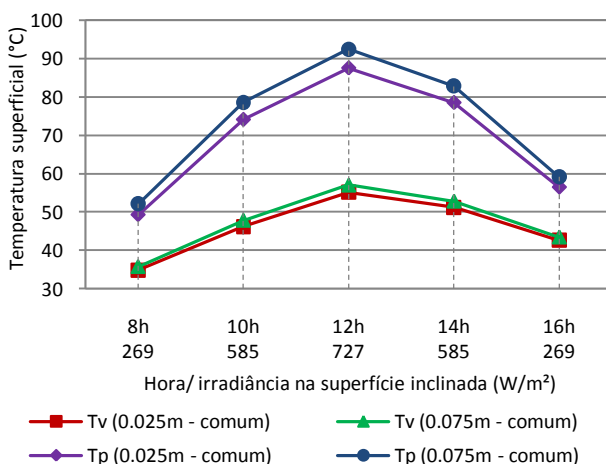


Figura 11 – Temperatura superficial do vidro e da placa quente – variação na espessura do isolante térmico

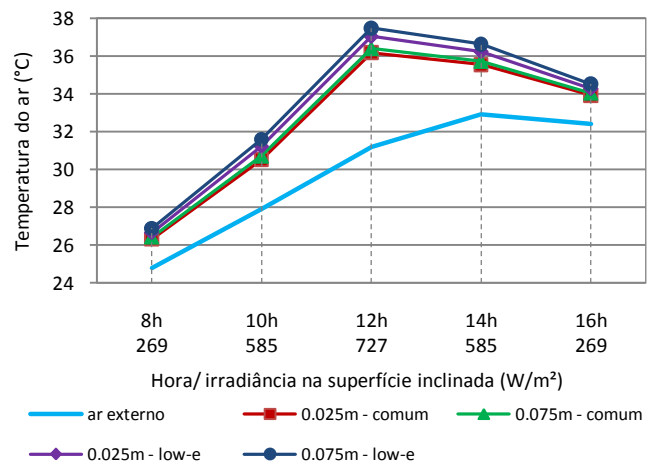


Figura 12 – Temperatura do ar – variação na espessura do isolante térmico e no tipo de vidro



A troca do vidro comum por um vidro de baixa emissividade no coletor solar da chaminé resultou em um aumento mais significativo na temperatura do ar no canal, chegando a um ganho de 3%. O fluxo de ar no canal sofreu um incremento médio de 9 a 11

A troca do vidro mostrou-se uma estratégia mais eficiente do que o aumento na espessura do isolante térmico, sob o ponto de vista do incremento no fluxo de ar no canal, como pode ser visto na Figura 13.

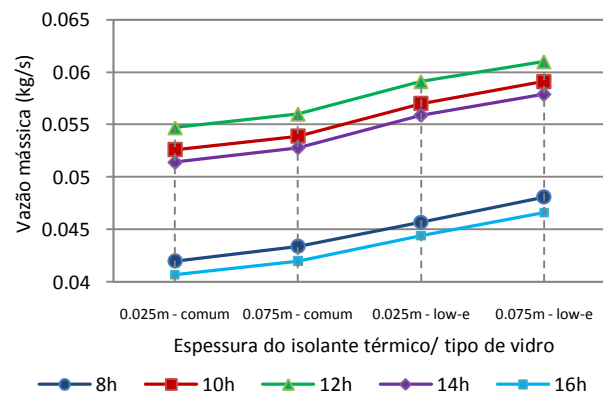


Figura 13 – Fluxo de ar na chaminé

### 4.3. Resultados do desempenho da chaminé solar em uma habitação térrea

Foi avaliado, para a cidade de Belém, o potencial teórico de ventilação da chaminé solar acoplada a um ambiente com dimensões típicas de habitações. A Tabela 3 apresenta, para o horário de 12h (horário de maior irradiância) e para todas as configurações analisadas no item 4.2, dados de vazão mássica (m) no interior da chaminé solar e taxas de ventilação (N, renovações por hora) correspondentes ao uso da chaminé em um ambiente de dimensões 3m x 4m x 2,7m. Dependendo da configuração adotada para a chaminé, os resultados indicam entre 2,4 e 11,3 renovações de ar por hora.

Tabela 3– Resultados de análise de desempenho para o horário de maior irradiância (12h) para o clima de Belém

C (m)	e (m)	$\theta$ (°)	$\Delta_{isol}$	Vidro	m (kg/s)	N (renov/h)
1	0,1	45	0,075	comum	0,0237	2,4
1	0,35	17	0,075	comum	0,0432	4,3
1	0,35	17 (c/ extensor)	0,075	comum	0,0547	5,4
1	0,35	45	0,025	comum	0,0547	5,4
1	0,35	45	0,075	comum	0,056	5,5
1	0,35	45	0,025	low-e	0,0591	5,8
1	0,35	45	0,075	low-e	0,061	6,0
1	0,6	45	0,075	comum	0,0807	7,9
2	0,35	45	0,075	comum	0,0875	8,6
3	0,35	45	0,075	comum	0,1142	11,3

Supondo que este ambiente tenha uma iluminação artificial de  $10W/m^2$ , um ocupante em atividade sedentária (115W) e que haja uma diferença de temperatura entre os ambientes interno e externo de  $4^{\circ}C$ , a taxa de renovação de ar horária mínima necessária para remoção do calor seria de 5,2renov/h (Equação 1). Esta situação hipotética possibilitaria o uso de quase todas as configurações de chaminé solar acima apresentadas (com exceção das duas primeiras). Tendo em vista que a chaminé solar aqui analisada possui apenas  $1m^2$  de área de coletor, o uso de configurações com maiores dimensões poderia ampliar o potencial de ventilação da chaminé solar, para outras situações.

## 5. CONCLUSÕES

A primeira etapa do trabalho consistiu na calibração do modelo matemático utilizado nas análises. Os desvios apresentados entre os resultados experimentais de Mathur et al (2006) e os resultados teóricos obtidos através da aplicação do modelo matemático foram de 4 a 10% para as temperaturas superficiais e do ar e de 25% para a velocidade do ar no canal, após todas as etapas de calibração.

Observou-se um maior desvio nos resultados de velocidade do ar. Alguns motivos que podem ser levantados para justificar esta diferença são a provável imprecisão de instrumentos de medição do experimento, já que se trata de velocidades do vento extremamente baixas e oscilantes; a provável influência do vento, pois, apesar do experimento incluir uma barreira para evitar a incidência de vento, ainda assim pode haver alguma movimentação de ar ao redor da célula teste; além das imprecisões do modelo teórico decorrentes das hipóteses adotadas para possibilitar a sua resolução.

A segunda etapa da pesquisa consistiu na análise paramétrica de uma chaminé solar localizada em Belém. O estudo da configuração geométrica da chaminé revelou uma grande influência da profundidade do

canal de ar, cuja variação apresentou melhoras significativas na vazão da chaminé solar, decorrente do aumento na espessura do canal. Alterações nesta variável mostraram-se mais impactantes do que as alterações no comprimento da chaminé. No entanto, deve-se observar a temperatura do ar interno na chaminé, para que não ocorra reversão no fluxo de ar.

Com relação ao ângulo de inclinação do coletor, verificou-se que, se for utilizada a inclinação de máxima irradiância para o município de Belém, é desejável o uso de um extensor vertical acoplado ao coletor, de modo a aumentar a diferença de altura entre as aberturas de entrada e saída do ar. As chaminés com 45° de inclinação e com 17° e extensor apresentaram resultados de desempenho bastante próximos.

A análise de características construtivas da chaminé solar indicou que o aumento na espessura do isolante térmico de 0,025m para 0,075m resultou uma pequena diferença na vazão resultante, o que indica que o valor de 0,025m é razoável para o clima de Belém. Já a alteração no vidro do coletor de um vidro comum para um vidro de baixa emissividade mostrou uma melhoria mais significativa na vazão da chaminé.

A terceira etapa da pesquisa apresentou o número de renovações de ar horárias decorrentes da aplicação de diferentes configurações de chaminés solares em um ambiente com dimensões típicas de habitações. Os resultados indicam a aplicabilidade do sistema para promover a ventilação natural em Belém, cidade cuja principal estratégia para condicionamento térmico é a ventilação (ABNT, 2005). Deve-se levar em consideração, ainda, que a análise aqui empreendida não considerou a ação dos ventos e que, se corretamente aproveitados, podem contribuir positivamente para a ventilação natural do ambiente interno.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.
- AFONSO, C.; OLIVEIRA, A. Solar chimneys: simulation and experiment. **Energy and Buildings**, v. 32, n. 1, p. 71-79, Jun. 2000.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE handbook: fundamentals**. Atlanta: ASHRAE, 2005.
- BANSAL, N.; MATHUR, R.; BHANDARI M. Solar chimney for enhanced stack ventilation. **Building and Environment**, v. 28, n. 3, p. 373-377, Jul. 1993.
- BASSIOUNY, R.; KORAH, N. Effect of solar chimney inclination angle on space flow pattern and ventilation rate. **Energy and Buildings**, v. 39, n.2, p. 190-196, Fev. 2009.
- ENERGYPLUS. **EnergyPlus engineering reference**: the reference to EnergyPlus calculations. US Department of Energy, 2010.
- FROTA, A.; SCHIFFER, S. **Manual de conforto térmico**. 5 ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.
- HIRUNLABH, J.; KONGDUANG, W.; NAMPRAKAI, P.; KHEDARI, J. Study of natural ventilation of houses by a metallic solar wall under tropical climate. **Renewable Energy**, v. 18, n. 1, p. 109-119, Set. 1999.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. (Trad. Horácio Macedo) 3. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1992.
- MATHUR, J.; MATHUR, S.; ANUPMA. Summer performance of inclined roof solar chimney for natural ventilation. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 10, p. 1156-1163, Out. 2006.
- ONG, K. S.; CHOW, C. C. Performance of a solar chimney. **Solar Energy**, v. 74, n. 1, p. 1-17, Jan. 2003.
- RORIZ, M. **Desempenho de chaminés solares para indução da ventilação natural em edificações submetidas a climas típicos do Brasil**. Relatório científico final, FAPESP. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, 2010
- SAKONIDOU, E. P. et al. Modeling of the optimum tilt of a solar chimney for maximum air flow. **Solar Energy**, v. 82, n. 1, p. 80-94, Jan. 2008.
- SWINBANK, W.C. Long-wave radiation from clear skies. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 89, n. 381, p. 339-348, 1963.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP pelo apoio financeiro à pesquisa.