

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS DA UNICAMP  
REPOSITÓRIO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA E INTELLECTUAL DA UNICAMP

**Versão do arquivo anexado / Version of attached file:**

Versão do Editor / Published Version

**Mais informações no site da editora / Further information on publisher's website:**

<https://www.scielo.br/j/ac/a/GJ3sVX74yH4fjK47zNk5Njg>

**DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000100130>**

**Direitos autorais / Publisher's copyright statement:**

©2017 by Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ANTAC). All rights reserved.

DIRETORIA DE TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO

Cidade Universitária Zeferino Vaz Barão Geraldo

CEP 13083-970 – Campinas SP

Fone: (19) 3521-6493

<http://www.repositorio.unicamp.br>

# Análise paramétrica de chaminés solares visando à otimização de desempenho em climas típicos do território brasileiro

*Parametric analysis of solar chimneys aiming at performance optimization in typical climates of the Brazilian territory*

Leticia de Oliveira Neves  
Fernando Marques da Silva

## Resumo

Uma das principais estratégias de resfriamento passivo de edificações é a ventilação natural, que pode ocorrer tanto por ação dos ventos como por efeito chaminé. A segunda opção é mais eficaz em situações em que a velocidade do vento é sensivelmente reduzida pelos obstáculos locais, como ocorre no interior da malha urbana, por exemplo. Este artigo tem por objetivo investigar o potencial de chaminés solares para promover a ventilação natural em edificações de baixa altura, localizadas em climas típicos do território brasileiro. Para isso, realizou-se uma análise dos efeitos da variação de diferentes parâmetros geométricos e construtivos do sistema para uma cidade representativa de cada zona bioclimática brasileira. Os parâmetros incluíram espessura do canal de ar, comprimento da chaminé e inclinação e tipo de vidro utilizado no coletor solar. Incluiu-se também uma análise comparativa entre chaminés com e sem coletor solar, ambas com a mesma configuração geométrica. Os resultados obtidos indicam a aplicabilidade da chaminé solar para promover a ventilação natural nas cidades analisadas e permitem identificar os parâmetros e valores que otimizam o desempenho do conjunto para cada caso.

**Palavras-chaves:** Ventilação natural. Efeito chaminé. Chaminé solar. Análise paramétrica.

## Abstract

*Natural ventilation is one of the main strategies used for the passive cooling of buildings, powered by wind forces or by stack effect. The second choice is more effective in locations where obstacles induce low wind speed, as it is the case in urban environments, for example. This paper analyses the potential of solar chimneys to promote natural ventilation in low-rise buildings in typical climates of the Brazilian territory. For this purpose, this study analysed variations in geometric and constructive parameters in cities representing each of the Brazilian climate zones. Those parameters included air channel depth, chimney length, solar collector tilt and type of glass used in the solar collector. The study also included a comparative analysis of solar chimneys with and without a solar collector, both with the same geometric configuration. The results obtained show the potential of solar chimneys to promote natural ventilation in the cities analysed, and enabled the identification of the parameters and values that optimize the performance of the set in each case.*

**Keywords:** Natural ventilation. Stack effect. Solar chimney. Parametric analysis.

Leticia de Oliveira Neves  
Universidade Estadual de Campinas  
Campinas - SP - Brasil

Fernando Marques da Silva  
Laboratório Nacional de Engenharia  
Civil  
Lisboa - Portugal

Recebido em 24/03/16  
Aceito em 19/07/16

## Introdução

A chaminé solar utiliza a energia proveniente da radiação solar para aquecer o ar e induzir o efeito chaminé por meio do incremento das diferenças de temperatura e pressão 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 sofisticação do sistema pode potencializar seu funcionamento, o que inclui a incorporação de um coletor solar com uma face externa em vidro, um canal de ar, uma placa negra absorvedora e uma camada de isolante térmico em suas laterais e base.

Como o potencial de ventilação por ação dos ventos é geralmente maior do que o potencial de ventilação por efeito chaminé, torna-se de maior interesse a aplicação do recurso da chaminé solar em sítios sem vento, ou com vento a velocidades insignificantes.

O projeto de uma chaminé solar depende da latitude do local de implantação e de suas características climáticas. Aliado a isso, o detalhamento de parâmetros construtivos, incluindo configuração geométrica e propriedades físicas de materiais e superfícies, garante um funcionamento adequado do sistema. Em vista disso, o presente artigo tem por objetivo analisar o desempenho em ventilação de diferentes configurações geométricas e construtivas de chaminés solares aplicadas às condições climáticas e geográficas de uma cidade representativa de cada zona bioclimática brasileira (ABNT, 2005), apresentando um meio expedito de estimar as vazões.

## Configurações geométricas e construtivas de chaminés solares

Diversas pesquisas encontradas na literatura especializada já demonstraram a possibilidade de ventilar naturalmente edificações usando chaminés solares. No entanto, a grande maioria desses trabalhos refere-se a países do hemisfério Norte, o que evidencia a demanda por estudos para o território brasileiro.

Em âmbito nacional, algumas pesquisas tratam de temas correlatos, como a pesquisa de Barbosa *et al.* (2013), que apresentaram um método de simulação com o programa EnergyPlus para análise do desempenho de um ambiente com fachada dupla. Tal solução projetual apresenta fenômenos físicos semelhantes aos da chaminé solar, como a ventilação por efeito chaminé e as

trocas térmicas radiantes. Lukiantchuki *et al.* (2016) avaliaram a influência da variação na geometria de sheds no desempenho da ventilação natural.

Os trabalhos nacionais de chaminés solares enfocam, principalmente, a secagem de madeira ou produtos agrícolas, como grãos e frutas (BRASIL *et al.*, 2004; FERREIRA *et al.*, 2008; MAIA *et al.*, 2009). Frank (1981) é o primeiro registro brasileiro encontrado de estudo do uso de chaminés solares para ventilação natural de edificações. A autora avaliou matematicamente chaminés verticais de grande porte visando atender à demanda de ventilação natural em ambientes industriais. Mais recentemente, Cavalcanti e Roriz (2011) apresentaram uma publicação sobre o tema, referente à dissertação de mestrado desenvolvida em conjunto com esta pesquisa.

Internacionalmente, houve uma produção significativa de trabalhos sobre chaminés solares desde a década de 1990. Os métodos de pesquisa incluem estudos teóricos e monitoramentos experimentais que têm por objetivo identificar o potencial de vazão dos sistemas propostos a partir de condições ambientais específicas.

Um dos primeiros trabalhos a avaliar a influência da inclinação da chaminé sobre seu desempenho foi o artigo de Bansal, Mathur e Bhandari (1993). Os autores desenvolveram um modelo matemático em regime térmico estacionário considerando diferentes tamanhos de abertura da chaminé para as condições climáticas da cidade de Jaipur, na Índia (26°53' latitude norte). Os melhores resultados indicaram um fluxo de ar de 331 m<sup>3</sup>/h para um coletor solar de 2,25 m<sup>2</sup>, 0,15 m de profundidade do canal de ar, 30° de inclinação entre o coletor e a horizontal, e 1.000 W/m<sup>2</sup> de irradiância solar no plano do vidro.

Também na Índia, Mathur, Mathur e Anupma (2006) usaram métodos experimentais e teóricos para investigar os efeitos do ângulo de inclinação do coletor na taxa de ventilação de uma chaminé solar. Os resultados mostraram um ângulo ótimo de inclinação do coletor variando entre 45° e 60°, dependendo da latitude do local. Os ensaios foram realizados para latitudes variando de 0° a 65°. O modelo teórico estimou uma velocidade média do ar de 0,18 m/s para uma chaminé de seção transversal de 1,0 m x 0,35 m submetida a uma irradiância solar de 750 W/m<sup>2</sup> e à temperatura do ar exterior de 39,9 °C.

De acordo com Khanal e Lei (2014), os aspectos geométricos que mostraram ter efeito predominante no desempenho em ventilação de

uma chaminé solar são o ângulo de inclinação da chaminé e a razão entre a altura da chaminé (distância vertical entre aberturas de entrada e saída do ar) e a profundidade do canal (Figura 1).

A camada-limite no interior do canal aumenta quando a inclinação do coletor é reduzida, o que influencia diretamente nas perdas de carga por atrito e, conseqüentemente, no fluxo de ar proporcionado pela chaminé (ADAM, 2003). O aumento na área de abertura para passagem do ar ocasiona redução nas perdas de carga por fricção, resultando em melhor desempenho do sistema. No entanto, quando a profundidade ótima do canal é excedida e a abertura de entrada de ar é reduzida, pode ocorrer fluxo de ar inverso no canal.

A intensidade da radiação solar incidente na cobertura de vidro da chaminé tem grande influência em seu desempenho. Como a latitude do local influencia no ângulo de incidência da radiação solar, em localidades de baixa latitude torna-se vantajoso utilizar coletores solares inclinados, na medida em que há um consequente aumento da irradiância na cobertura de vidro, conforme observado em Neves, Roriz e Marques da Silva (2011). Segundo Khanal e Lei (2014), o ângulo de inclinação do coletor solar não tem efeito significativo na distribuição de temperatura ao longo do canal de ar, mas afeta fortemente a velocidade, interferindo diretamente no desempenho em ventilação do sistema.

A largura da chaminé tem pouca influência em seu desempenho. Adam (2003) verificou em um procedimento experimental uma distribuição uniforme de temperatura ao longo do eixo transversal da chaminé, tendo sido constatado um pequeno aumento de temperatura nas laterais, em razão da maior resistência ao fluxo de ar, mas a magnitude da diferença foi tal que pôde ser desconsiderada. Ainda segundo o autor, as temperaturas do ar no canal da chaminé sofrem alterações principalmente na direção longitudinal (comprimento) e no sentido do absorvedor para o vidro (profundidade do canal).

Bassiouny e Korah (2009) observaram um efeito notável da inclinação da chaminé solar no padrão de fluxo de ar interno, através de simulações de dinâmica de fluidos computacional. Os estudos teóricos mostraram ângulos de inclinação ótimos entre 45° e 75° com a horizontal para uma latitude de 28,4° norte. Foi encontrada uma correlação entre trocas de ar e intensidade de radiação solar, largura da chaminé e ângulo de inclinação, com limitação de intensidade de radiação maior ou igual a 500 W/m<sup>2</sup> e canal para fluxo de ar entre 0,10 m e 0,35 m de profundidade (Equação 1).

$$Nr = 0,795. (\sin(\theta))^{0,3189}. I^{0,3818}. L^{0,1658} \quad \text{Eq. 1}$$

Sendo:

Nr = número de renovações de ar por hora;

$\theta$  = ângulo de inclinação da chaminé, contado a partir da horizontal (°);

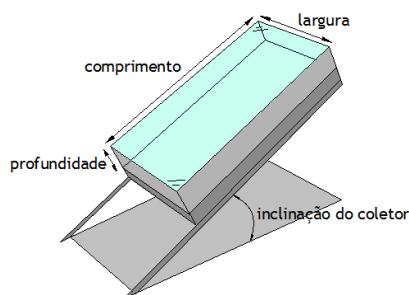
I = irradiância solar no plano do vidro (W/m<sup>2</sup>); e

L = largura da chaminé (m).

Mais recentemente, Imram, Jalil e Ahmed (2015) desenvolveram estudos numéricos e experimentais para prever o desempenho de diversas configurações geométricas de chaminés solares para as condições climáticas do Iraque. Os autores verificaram velocidade máxima de 0,8 m/s para uma radiação solar de 750 W/m<sup>2</sup> em uma chaminé inclinada a 60°, com 2 m de comprimento e 0,15 m de profundidade do canal. Não foi observada circulação de ar inversa no canal.

As propriedades físicas da cobertura de vidro do coletor também podem interferir significativamente no desempenho do sistema. Lee e Strand (2009) testaram o uso de vidro com transmitância à radiação solar variando entre 0,25 e 0,92 e obtiveram aumentos na taxa de ventilação entre 36% e 40%. A utilização de vidros de baixa emissividade pode auxiliar na redução da perda de calor através do vidro e, conseqüentemente, na melhoria da eficiência do sistema.

Figura 1 - Esquema de uma chaminé solar



Fonte : adaptado de Adam, Yamanaka e Kotani (2002).

## Análise paramétrica: materiais e métodos

Realizou-se, através de análises paramétricas, uma previsão de desempenho de chaminés solares para os climas típicos do território brasileiro. As análises consistiram na investigação de diferentes configurações geométricas e construtivas de chaminés solares aplicadas às condições climáticas e geográficas de uma cidade representativa de cada zona bioclimática brasileira (ABNT, 2005), e foram realizadas por meio de simulações computacionais no modelo AirflowNetwork, do programa EnergyPlus.

O modelo AirflowNetwork baseia-se no balanço de massas de uma zona térmica e nas relações de pressão interzonas. É um modelo simplificado, se comparado a modelos detalhados, como os utilizados em simulações de dinâmica de fluidos computacional. Os cálculos realizados pelo programa baseiam-se na hipótese de que as temperaturas superficiais e do ar são uniformemente distribuídas dentro de uma mesma zona térmica, não havendo possibilidade de desenvolver uma análise ponto a ponto no interior da chaminé. Chungloo e Limmeechokchai (2006) analisaram experimentalmente o assunto e obtiveram boa concordância entre a distribuição da temperatura do ar ao longo do canal e a meia altura.

Os algoritmos para cálculo do coeficiente de convecção oferecidos pelo programa foram testados, sendo escolhidas as opções mais apropriadas para simulação da chaminé solar, que consistiram no algoritmo Detailed para as superfícies internas e Thermal Analysis Research Program (TARP) para as externas. Esses algoritmos correlacionam o coeficiente de transferência de calor com a orientação da superfície e a diferença entre a temperatura do ar na zona térmica e na superfície. Adotam equações de transferência de calor por convecção natural para superfícies horizontais, verticais ou inclinadas, voltadas para cima quando aquecidas, ou para baixo quando resfriadas (ENERGYPLUS, 2015).

O método de inicialização linear foi escolhido, pois se adequa à simulação por efeito chaminé e tende a estabelecer uma direção adequada para o fluxo de ar. Nele os valores iniciais para fluxo mássico são obtidos por uma aproximação linear, relacionando fluxo de ar com queda de pressão (ENERGYPLUS, 2015).

Há de se considerar aqui algumas limitações dos modelos em estudo. O fluxo de ar no interior da chaminé é promovido pelo movimento, nas

superfícies do coletor, de camadas-limite de origem térmica geradas por fenômenos de convecção natural. A estimativa de ordem de grandeza dos valores característicos de processos desse tipo é realizada mediante correlações experimentais (MATA; SARAIVA, 1987). Para o caso do regime laminar, existe uma solução analítica exata das equações que regem a convecção livre. Em vista disso, o método de inicialização linear, que configura a ventilação por efeito chaminé no AirflowNetwork, é provido pelo regime laminar. Os modelos matemáticos adotados em inúmeras pesquisas na área também seguem a hipótese de fluxo laminar, pelo bom ajuste dos valores obtidos com resultados experimentais (BANSAL; MATHUR; BHANDARI, 1993; MATHUR; MATHUR; ANUPMA, 2006).

Nesta pesquisa uma análise da evolução das camadas-limite térmicas, a partir da determinação do número de Reynolds, permitiu verificar a ocorrência de uma transição entre o regime laminar e o turbulento (valores entre 1.400 e 4.000) no ponto médio do canal. Com base em validações apresentadas pela literatura especializada, considerou-se aceitável utilizar condições de fluxo laminar para todos os casos analisados. Ressalta-se, entretanto, que uma análise detalhada da adequabilidade de modelos teóricos, considerando o desenvolvimento da camada-limite, é um tema de relevada importância e merece ser mais bem investigado.

## Modelo de referência

A análise paramétrica consistiu na variação de alguns parâmetros de projeto pré-selecionados, de forma a verificar seus efeitos sobre o desempenho da chaminé solar. Foi escolhida uma configuração base para o sistema, conforme a Tabela 1.

O modelo de referência utilizado para o desenvolvimento das simulações sofreu um processo de calibração prévia, com base em resultados obtidos no procedimento experimental em uma célula de teste provida de chaminé solar com coletor de inclinação variável. Utilizou-se um extensor vertical acoplado à chaminé, de modo a garantir uma diferença de altura constante entre as aberturas, independentemente da inclinação do coletor (Figura 2). O coeficiente de descarga utilizado nas simulações foi calculado com base nos resultados experimentais.

Uma descrição detalhada do processo de calibração e dos resultados obtidos pode ser consultada em Neves e Roriz (2012). Entre alguns modelos teóricos previamente analisados, concluiu-se que a simulação computacional no programa selecionado apresentou melhor

concordância com os dados experimentais, sendo, portanto, mais viável e confiável para uso na avaliação de parâmetros de projeto e para o desenvolvimento de estudos comparativos de chaminés solares.

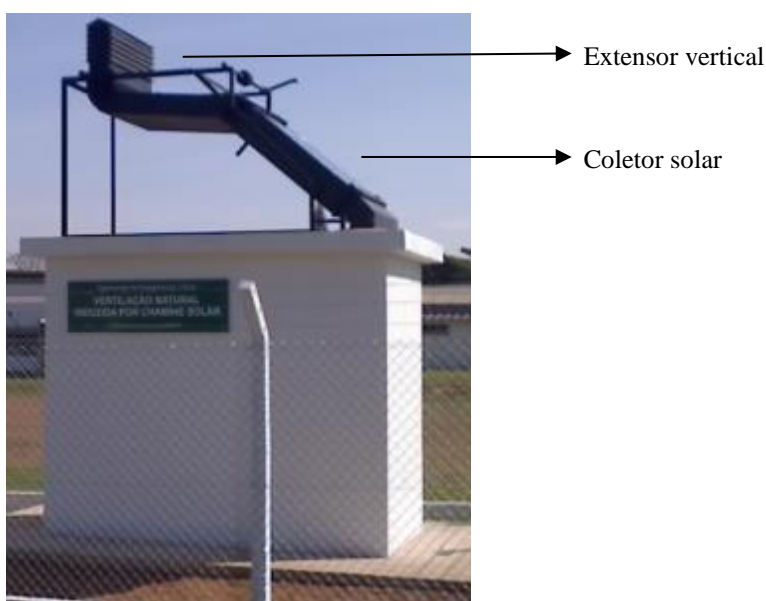
Observou-se no processo de calibração que as predições de temperatura superficial do vidro e temperatura do ar no canal da chaminé apresentaram boa concordância com o experimento. Os valores estimados por simulação para a temperatura superficial da placa absorvedora não apresentaram concordância satisfatória, ficando 15% acima dos dados medidos. Os resultados de vazão volumétrica no canal da chaminé mostraram algumas diferenças nas taxas de variação ao longo do tempo. A simulação subestimou os resultados durante os períodos da manhã e no fim da tarde, e superestimou ao meio-dia. A diferença entre médias diárias, no entanto, foi bastante reduzida, ficando em 7%.

A análise paramétrica empreendida neste artigo considera como principais variáveis de saída a vazão volumétrica e a temperatura do ar no canal da chaminé, variáveis estas que apresentaram boa concordância no processo de calibração. A temperatura superficial do vidro foi utilizada na avaliação da variação da inclinação e do tipo de vidro utilizado no coletor. Não se fez uso direto dos resultados de temperatura superficial da placa coletora – variável esta que apresentou limitações no processo de calibração. Seus resultados, no entanto, acabam por interferir na vazão volumétrica do canal da chaminé, motivo pelo qual se observa uma estimativa acima do esperado para horários próximos ao meio-dia (cerca de 15% acima dos dados medidos). Considerando-se, entretanto, que são usuais na literatura diferenças de até 20% entre dados medidos e calculados (ADAM, 2003), avaliou-se tal ferramenta como adequada para a análise aqui proposta, sendo eventuais limitações discutidas ao longo do texto.

Tabela 1 - Configuração base da chaminé solar utilizada na análise paramétrica

Parâmetro	Valor padrão
Comprimento	1 m
Largura	1 m
Espessura do canal de ar	0,3 m
Área de vidro do coletor solar	1 m <sup>2</sup>
Ângulo de inclinação da chaminé com a horizontal	10°
Condutividade térmica do isolante	0,03 W/(m.K)
Espessura do isolante nas laterais e base do coletor	0,05 m
Absortância solar da placa absorvedora	0,80
Transmitância solar do vidro	0,84
Emissividade do vidro	0,84

Figura 2 - Célula de teste com chaminé solar

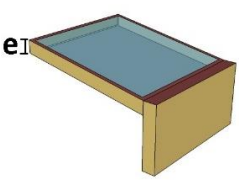
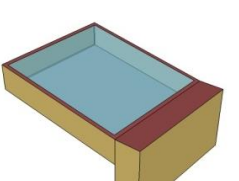
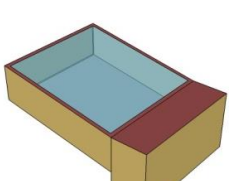
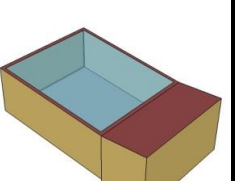
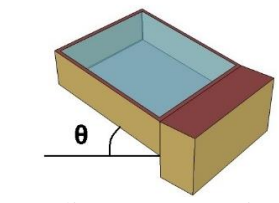
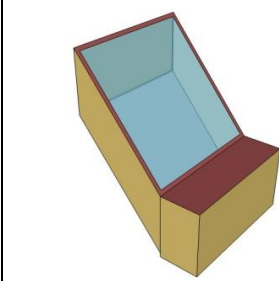
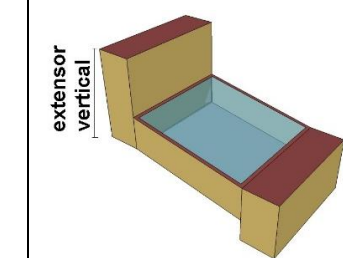
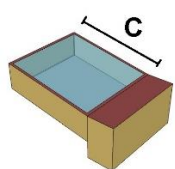
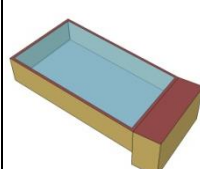
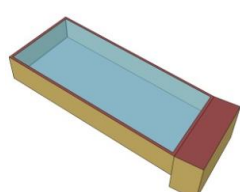
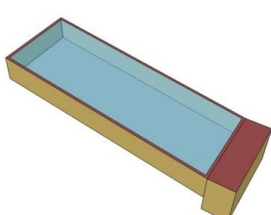


## Parâmetros de projeto analisados

A escolha dos parâmetros analisados na análise paramétrica baseou-se em características indicadas

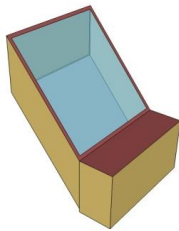
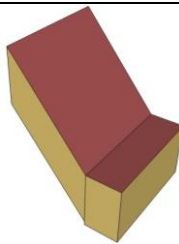
na literatura especializada como significativas para o desempenho de uma chaminé solar, sendo a quantidade de valores selecionados dependente do parâmetro analisado (Quadro 1).

Quadro 1 - Descrição dos parâmetros e valores utilizados nas simulações (Continua...)

<b>Parâmetro 1</b>	Espessura do canal de ar (e)			
<b>Justificativa</b>	Tem grande influência na vazão volumétrica da chaminé solar, pois é diretamente relacionada ao volume da chaminé e sua área de abertura. Por outro lado, canais muito espessos estão susceptíveis à ocorrência de fluxo reverso.			
<b>Valores analisados</b>	Entre 0,10 m e 0,40 m, com variação em intervalos de 0,05 m.			
<b>Imagens</b>	 0,10 m	 0,20 m	 0,30 m	 0,40 m
<b>Parâmetro 2</b>	Inclinação do coletor solar ( $\theta$ )			
<b>Justificativa</b>	No Brasil o uso de coletores solares com inclinação ideal para máxima irradiância pode resultar em uma diferença significativa de irradiância solar sobre o plano de vidro do coletor. No entanto, o uso de coletores com inclinação próxima à horizontal ocasiona perda na diferença de altura entre as aberturas de entrada e saída do ar.			
<b>Valores analisados</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inclinação para máxima irradiância, variando conforme a cidade (Tabela 2).</li> <li>• Inclinação para máximo fluxo de ar, no valor de 50°.</li> <li>• Inclinação para máxima irradiância, com extensor vertical que garanta uma diferença de altura entre aberturas equivalente à chaminé de 50° de inclinação.</li> </ul>			
<b>Imagens</b>	 Inclinação para máxima irradiância (exemplo de Brasília)	 Inclinação para máximo fluxo de ar (50°)	 Inclinação para máxima irradiância com extensor (exemplo de Brasília)	
<b>Parâmetro 3</b>	Comprimento da chaminé (C)			
<b>Justificativa</b>	O aumento no comprimento da chaminé ocasiona aumento na área de absorção da radiação solar e na área de transferência de calor entre a placa coletora e o ar. Consequentemente, provoca incremento na vazão volumétrica do sistema.			
<b>Valores analisados</b>	Entre 1,0 m e 2,5 m, com variação em intervalos de 0,5 m.			
<b>Imagens</b>	 1,0 m	 1,5 m	 2,0 m	 2,5 m



Quadro 1 - Descrição dos parâmetros e valores utilizados nas simulações (continuação)

<b>Parâmetro 4</b>	Tipo de vidro utilizado no coletor solar	
<b>Justificativa</b>	Tem relação direta tanto na quantidade de energia solar absorvida pela placa absorvedora quanto na quantidade de calor perdido por condução e convecção através do vidro.	
<b>Valores analisados</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vidro incolor comum (emissividade de 0,84)</li> <li>• Vidro de baixa emissividade (emissividade de 0,20)</li> </ul>	
<b>Parâmetro 5</b>	Chaminé com coletor solar x chaminé sem coletor solar	
<b>Justificativa</b>	A chaminé solar de configuração para máximo fluxo de ar (50° de inclinação) foi selecionada para a realização de uma análise comparativa de desempenho em relação a uma chaminé desprovida de coletor para captação da energia solar, ou seja, sem a cobertura de vidro, a placa coletora e o isolamento térmico na face externa.	
<b>Valores analisados</b>	Ambas com as mesmas características geométricas (configuração base e 50° de inclinação) e a mesma diferença de altura entre as aberturas de entrada e saída de ar.	
<b>Imagens</b>	 <p>Chaminé com coletor solar</p>	 <p>Chaminé sem coletor solar</p>

### Cálculo da inclinação da chaminé solar para máxima irradiância

Sabe-se que em baixas latitudes coletores solares com menores ângulos de inclinação em relação à horizontal recebem com maior intensidade a radiação solar. Em vista disso se calculou a inclinação ideal do coletor solar para máxima irradiância no plano de vidro em cada uma das cidades selecionadas para análise (Tabela 2). O cálculo foi realizado com base na altura solar ao meio-dia do solstício de verão (22/12), de modo a obter uma reta normal entre a radiação solar e o plano do coletor.

Para evitar que o coletor ficasse na horizontal, o que poderia prejudicar a ascensão do ar no interior do canal, adotou-se um ângulo mínimo de inclinação de 10° em relação ao plano horizontal. As cidades localizadas acima do trópico de Capricórnio tiveram os coletores orientados a sul, e as cidades abaixo do trópico tiveram os coletores orientados a norte.

### Cálculo da inclinação da chaminé solar para máximo fluxo de ar

A inclinação da chaminé solar para “máximo fluxo de ar” corresponde ao melhor ângulo de inclinação da chaminé visando elevar o gradiente de pressão em seu interior e, consequentemente, aumentar o fluxo de ar. Para a realização dessa análise considerou-se um balanço entre a radiação solar

incidente na cobertura de vidro e a diferença de altura entre as aberturas de entrada e saída do ar.

Para identificar qual seria o melhor ângulo de inclinação do coletor solar para máximo fluxo de ar, foram simuladas 14 configurações geométricas de chaminés, com variação no ângulo de inclinação entre 10° e 75° em relação ao plano horizontal. A irradiância solar global sobre o plano horizontal foi mantida constante, no valor de 870 W/m². Aplicou-se sobre os resultados das simulações uma equação para determinar o gradiente máximo de pressão de origem térmica dentro da chaminé e, consequentemente, a vazão máxima (Equação 2). A equação baseia-se na aproximação de Boussinesq em conjunto com a lei dos gases perfeitos (MARQUES DA SILVA, 2003).

$$\Delta P^T \approx 0,0021 \cdot \Delta z \cdot \Delta T \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

$\Delta P^T$  = gradiente de pressão de origem térmica (Pa);

$\Delta z$  = distância vertical entre aberturas de entrada e saída do ar (m); e

$\Delta T$  = diferença de temperatura entre o ar no canal e o ar externo (°C).

A chaminé com ângulo de inclinação de 50° resultou na vazão máxima. Uma descrição detalhada do processo de simulação e dos resultados obtidos nesta investigação pode ser consultada em Neves, Roriz e Marques da Silva (2011).



Tabela 2 - Inclinação ideal do coletor para máxima irradiância para as cidades selecionadas

Cidade	Ângulo ótimo de inclinação com a horizontal (22/12 às 12h)
ZB1 - Curitiba, PR (25°25'S)	10°N
ZB2 - Santa Maria, RS (29°41'S)	10°N
ZB3 - Florianópolis, SC (27°35'S)	10°N
ZB4 - Brasília, DF (15°46'S)	10°S
ZB5 - Santos, SP (23°57'S)	10°N
ZB6 - Campo Grande, MS (20°26'S)	10°S
ZB7 - Petrolina, PE (9°23'S)	15°S
ZB8 - Belém, PA (1°27'S)	25°S

### Cálculo da perda de carga da instalação

Para cada configuração de chaminé analisada as resistências locais dos canais de ar foram calculadas através dos coeficientes de perda de carga ( $\zeta$ ), e os valores obtidos foram utilizados como dados de entrada nas simulações computacionais.

Os cálculos foram realizados utilizando-se os procedimentos de Idel'cik (1999). Segundo o autor, o coeficiente de perda de carga de dutos curvos depende de fatores que determinam o grau de turbulência do fluxo. Isso inclui, principalmente, a forma do duto, o número de Reynolds, a rugosidade relativa das paredes do canal e as condições da abertura de entrada. Em vista disso, o cálculo do coeficiente de perda de carga global consistiu na soma dos coeficientes singulares das seções curvas, dos coeficientes por atrito das seções retas e dos coeficientes das aberturas de entrada e saída do ar, conforme as seguintes diretrizes (IDEL'CIK, 1999):

(a) seções curvas: cálculo do ângulo de curvatura do canal, da razão entre o raio de curvatura médio do canal e o diâmetro hidráulico da chaminé (Equação 3) e da razão entre altura e largura da seção da chaminé (método gráfico); e

(b) seções retas: cálculo da razão entre largura e diâmetro hidráulico da chaminé, do número de Reynolds e da rugosidade relativa da superfície do canal (método gráfico).

$$D_H = \frac{2 \cdot L \cdot e}{L + e} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

DH = diâmetro hidráulico do canal (m);

L = largura do canal (m); e

e = espessura do canal (m).

Para a determinação do número de Reynolds (Equação 4) foram utilizados resultados obtidos no monitoramento experimental (NEVES; RORIZ, 2012). Tais resultados indicaram valores entre

1.400 e 4.000, demonstrando variação entre o regime laminar e o turbulento. Em vista disso, as perdas de carga foram calculadas, caso a caso, para os dois regimes; posteriormente, uma média entre os dois valores foi obtida. Para a aplicação dos dados nas simulações, os coeficientes de perda de carga foram utilizados para calcular os coeficientes de descarga (Equação 5). Os valores resultantes para cada configuração de chaminé analisada são apresentados na Tabela 3.

$$Re = \frac{V \cdot \rho \cdot D_H}{\nu} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

Re = número de Reynolds (adimensional);

V = velocidade do ar (m/s);

$\rho$  = densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>); e

$\nu$  = viscosidade cinemática (m<sup>2</sup>/s).

$$Cd = \frac{1}{\sqrt{\zeta}} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

Cd = coeficiente de descarga (adimensional); e

$\zeta$  = coeficiente de perda de carga (adimensional).

### Simulações computacionais

Os arquivos climáticos utilizados nas simulações foram elaborados por Roriz (2012), com base nas séries históricas de dados climáticos medidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia, no período de 2000 a 2010. Em todos os casos considerou-se o vento com velocidade nula, de forma a verificar o desempenho isolado do efeito chaminé, o que anula qualquer interferência que o entorno construído poderia causar no desempenho em ventilação do sistema. O modelo de simulação não contou com quaisquer elementos construídos no entorno próximo, não havendo também obstruções na radiação solar incidente sobre o coletor.

Para a realização das análises foram calculados os dias típicos do solstício de verão (22/12) (Tabela 4). Apesar de, tradicionalmente, esse dia não

representar o período mais quente do ano, foi escolhido por ser a época em que a altura solar ao meio-dia está mais próxima do zênite na maior parte das cidades analisadas. Tal condição implica uma inclinação ideal do coletor solar mais próxima à horizontal para máxima irradiância no plano de vidro. Esse parâmetro é de grande importância para regiões de baixa latitude e consistiu em uma das principais variáveis de análise desta pesquisa. Além disso, o parâmetro 2 (inclinação do coletor) também foi simulado em uma base anual, de modo a verificar a variação no potencial de ventilação do sistema ao longo do ano.

Os resultados obtidos na análise paramétrica são apresentados na forma de gráficos comparativos, incluindo dados de diferença de temperatura entre o ar no canal da chaminé e o ar externo ( $\Delta T$ ) e de vazão volumétrica no canal ( $Q$ ), de forma a destacar as configurações de melhor desempenho. Incluem-se também análises por regressão linear

múltipla, de modo a encontrar correlações de interesse entre as variáveis e determinar equações para estimar o desempenho em vazão da chaminé solar a partir de algumas variáveis selecionadas.

## Resultados obtidos na análise paramétrica

### Variação na espessura do canal de ar

Analisa-se aqui a variação na espessura do canal de ar da chaminé solar, de modo a identificar o valor ideal para máximo fluxo de ar em cada cidade representativa do zoneamento bioclimático brasileiro. As Figuras 3 e 4 apresentam os resultados de vazão volumétrica e de diferença de temperatura entre o ar no canal e o ar externo, para as 12h do solstício de verão.

Tabela 3 - Perdas de carga das chaminés analisadas

Configuração da chaminé solar			$\zeta$ fluxo laminar	$\zeta$ fluxo turbulento	$\zeta$ médio	Cd
Parâmetro 1	e=0,10 m		1,87	1,83	1,85	0,74
	e=0,15 m		1,62	1,58	1,60	0,79
	e=0,20 m		1,43	1,41	1,42	0,84
	e=0,25 m		1,35	1,33	1,34	0,86
	e=0,30 m		1,29	1,27	1,28	0,88
	e=0,35 m		1,27	1,24	1,25	0,89
	e=0,40 m		1,24	1,22	1,23	0,90
Parâmetro 2	$\theta=10^\circ$	sem extensor	1,29	1,27	1,28	0,88
		com extensor	1,68	1,65	1,66	0,83
	$\theta=15^\circ$	sem extensor	1,26	1,25	1,26	0,89
		com extensor	1,62	1,61	1,62	0,84
	$\theta=25^\circ$	sem extensor	1,24	1,23	1,23	0,90
		com extensor	1,58	1,56	1,57	0,85
	$\theta=50^\circ$	sem extensor	1,18	1,16	1,17	0,92
Parâmetro 3	C=1,0 m		1,29	1,27	1,28	0,88
	C=1,5 m		1,30	1,28	1,29	0,88
	C=2,0 m		1,32	1,30	1,31	0,87
	C=2,5 m		1,33	1,31	1,32	0,87
Parâmetro 4	Vidro incolor comum		1,29	1,27	1,28	0,88
	Vidro de baixa emissividade		1,29	1,27	1,28	0,88

Tabela 4 - Dados climáticos das cidades selecionadas

Cidade	Temperatura de bulbo seco		Umidade relativa do ar		Irradiância solar global máxima ( $W/m^2$ )
	Máxima ( $^\circ C$ )	Mínima ( $^\circ C$ )	Máxima (%)	Mínima (%)	
Curitiba	25,4	15,4	94	68	650
Santa Maria	29,5	18,3	84	56	888
Florianópolis	26,6	20,3	92	71	738
Brasília	26,2	17,5	89	65	637
Santos	27,0	20,1	94	73	717
Campo Grande	29,8	20,4	93	68	711
Petrolina	33,1	22,5	68	41	762
Belém	31,9	22,0	97	73	731

O fluxo de ar na chaminé mostrou-se fortemente dependente da profundidade do canal, pois um canal mais profundo permite maior área de abertura para passagem do ar e menor perda por atrito, resultando em maior vazão. Por outro lado, em canais muito espessos há redução na eficiência do aquecimento do ar dentro do coletor, podendo, inclusive, ocorrer uma inversão no sentido do fluxo. Em vista disso se estabeleceu para todos os casos um valor limite de 0,40 m de espessura.

Para o caso de Curitiba, por exemplo, o aumento da espessura do canal da chaminé de 0,10 m para 0,30 m resultou em uma queda de até 11,4 °C na temperatura do ar no canal. Uma das razões para essa queda está no fato de o aumento na espessura do canal ocasionar redução no aquecimento do ar por convecção. Em contrapartida, houve incremento médio de 42 m<sup>3</sup>/h na vazão volumétrica durante o período diurno, chegando a 64 m<sup>3</sup>/h de incremento no horário de pico, ao meio-dia. O aumento da espessura do canal de 0,30 m para 0,40 m não ocasionou incremento significativo na vazão. A espessura ótima do canal de ar para cada cidade foi selecionada com base no valor em que se notou estabilização da vazão volumétrica no interior do canal.

A partir dos resultados da simulação para o solstício de verão, foram desenvolvidas análises por regressão, de modo a encontrar uma equação para a estimativa da vazão volumétrica da chaminé solar para cada cidade selecionada. Foram encontradas correlações entre a vazão volumétrica e as seguintes variáveis:

- (a) temperatura superficial do vidro ( $T_v$ );
- (b) temperatura do ar no canal da chaminé ( $T_c$ );
- (c) diferença de temperatura entre o ar no canal e o ar externo ( $\Delta T$ ); e
- (d) espessura do canal de ar (e).

A equação resultante (Equação 6) é aplicável apenas a intervalos de espessura que não excedam a espessura ótima. A Tabela 5 apresenta os valores das constantes da Equação 6, o desvio padrão (DP) e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para cada cidade. Para o desenvolvimento da correlação foram utilizadas 36 amostras por cidade.

$$Q = A_1 \cdot T_v + A_2 \cdot T_c + A_3 \cdot \Delta T + A_4 \cdot e + B \quad \text{Eq. 6}$$

### Variação na inclinação do coletor solar

Primeiramente, realizou-se uma comparação de desempenho entre uma chaminé com inclinação ideal para máxima irradiância no plano do coletor (Tabela 2) e uma chaminé de mesma configuração, mas provida de um extensor vertical, de forma a aumentar a diferença de altura entre as aberturas de entrada e saída do ar. O extensor vertical foi projetado visando manter uma diferença de altura entre as aberturas semelhante à obtida com uma chaminé de 50° de inclinação. Os resultados de vazão volumétrica para o solstício de verão, considerando-se o horário com irradiância solar incidente no plano do coletor (das 8h às 16h), estão apresentados nas Figuras 5 e 6.

Figura 3 - Variação na profundidade do canal - Q (m<sup>3</sup>/h)

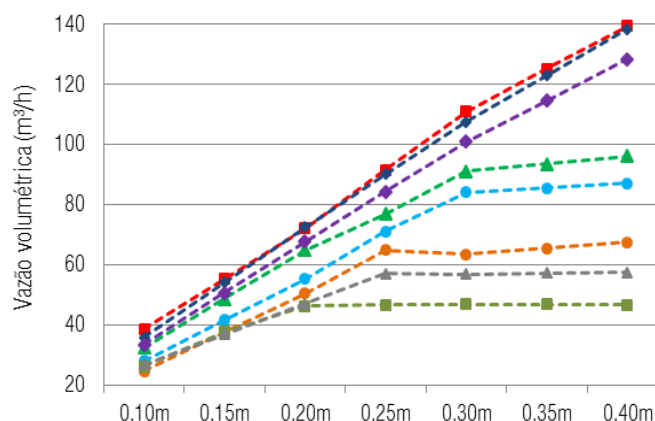


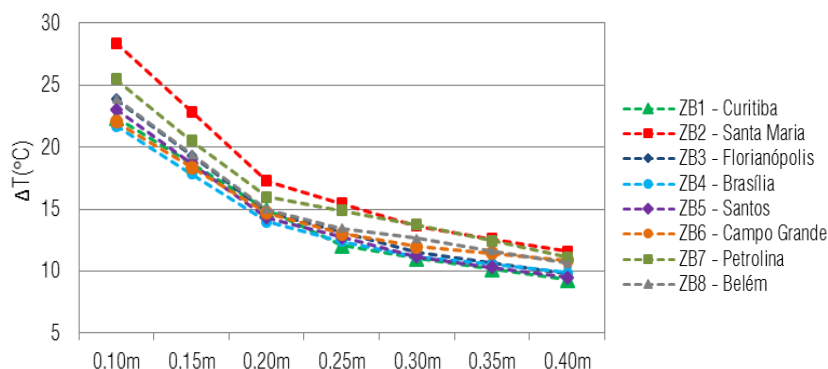
Figura 4 - Variação na profundidade do canal -  $\Delta T$  (°C)

Tabela 5 - Análise por regressão da espessura do canal

Cidade	Espessura do canal (m)	A1	A2	A3	A4	B	DP	R <sup>2</sup>
Curitiba	0,10 a 0,30	12,01096	-21,36369	11,61552	190,73131	256,34404	7,19	0,92
Santa Maria	0,10 a 0,40	11,82442	-19,47142	8,8462	170,2587	252,03029	8,06	0,94
Florianópolis	0,10 a 0,40	12,44111	-18,25891	7,14228	170,61207	204,10163	8,83	0,94
Brasília	0,10 a 0,30	14,74694	-25,008	12,61193	71,87709	326,09446	6,96	0,91
Santos	0,10 a 0,40	11,35799	-17,51909	7,63479	177,92139	205,45483	6,32	0,96
Campo Grande	0,10 a 0,25	15,40842	-23,70934	10,01091	-29,50266	321,45569	5,18	0,92
Petrolina	0,10 a 0,20	4,15468	-7,30945	4,84673	55,96366	98,34774	3,80	0,92
Belém	0,10 a 0,25	11,55423	-18,00039	8,65659	66,29933	224,77605	7,80	0,82

Figura 5 - Chaminé inclinada para máxima irradiância sem extensor - Q (m³/h)

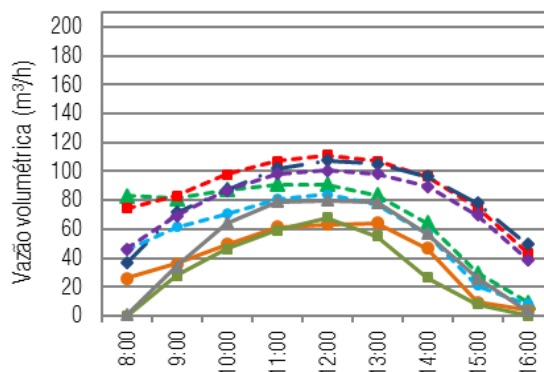
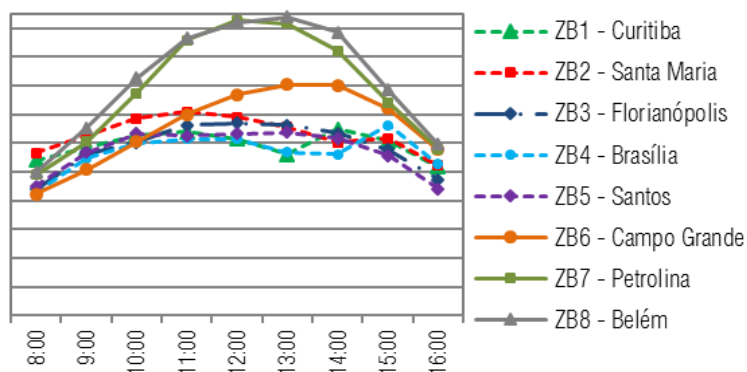


Figura 6 - Chaminé inclinada para máxima irradiância com extensor - Q (m³/h)



Os maiores incrementos no fluxo de ar da chaminé solar com extensor vertical ocorreram nas cidades localizadas mais próximo à linha do Equador, das zonas bioclimáticas 4, 6, 7 e 8. Para esses casos a diferença de desempenho em vazão ficou acima de 100%, considerando a média diária do período diurno. Para as demais cidades a diferença de desempenho variou entre 40% e 70%.

A segunda comparação de desempenho foi entre uma chaminé com inclinação ideal para “máximo fluxo de ar” (50° de inclinação) e uma chaminé com inclinação ideal para máxima irradiância no plano do coletor provida de extensor vertical. As duas configurações possuem a mesma diferença de altura entre as aberturas de entrada e saída do ar. Os resultados de vazão volumétrica para o período entre 8h e 16h do solstício de verão são apresentados nas Figuras 7 e 8.

Para as cidades localizadas nas zonas bioclimáticas 1 a 5, pode-se observar um fluxo de ar semelhante para as duas configurações. O melhor desempenho oscilou entre uma configuração e outra, hora a

hora. No entanto, considerando a média diária de vazão volumétrica no período diurno, a chaminé inclinada para máxima irradiância provida de extensor apresentou um resultado de 10% a 20% superior à chaminé inclinada para máximo fluxo de ar. Para as cidades localizadas nas zonas bioclimáticas 6 a 8, o uso do extensor na chaminé com coletor inclinado para máxima irradiância provocou um incremento significativo na vazão volumétrica, com resultados, em média, superiores em 64% para Campo Grande, 138% para Petrolina e 123% para Belém. Os principais fatores de variação nos resultados foram o ângulo de inclinação do coletor solar e a irradiância solar sobre o plano do vidro, que variaram conforme a localidade.

Apresentam-se, a seguir, resultados comparativos de irradiância solar no plano do vidro (Figura 9), diferença de temperatura entre o ar no canal da chaminé e o ar externo (Figura 10) e vazão volumétrica (Figura 11) para as três configurações analisadas, às 12h do solstício de verão.

Figura 7 - Chaminé inclinada para máxima irradiância com extensor -  $Q$  ( $m^3/h$ )

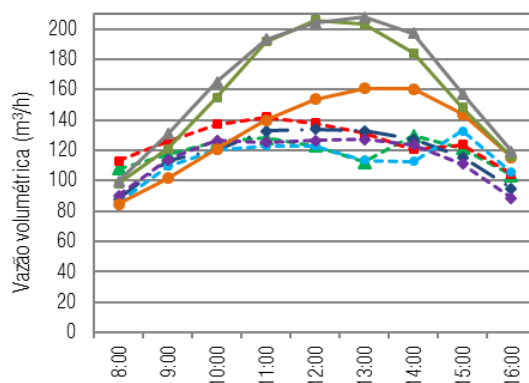


Figura 8- Chaminé calculada para máximo fluxo de ar (50° de inclinação) -  $Q$  ( $m^3/h$ )

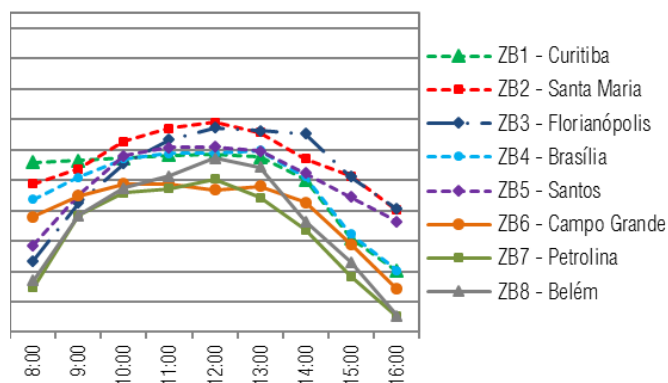


Figura 9 - Irradiância solar no plano do vidro ( $\text{W/m}^2$ )

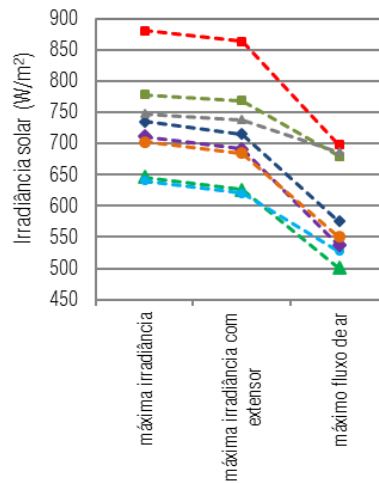


Figura 10 - Diferença de temperatura entre o ar no canal e o ar externo ( $^{\circ}\text{C}$ )

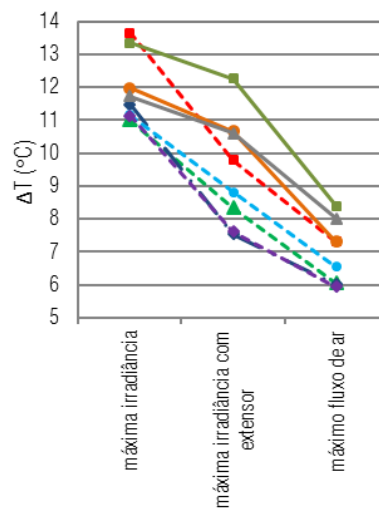
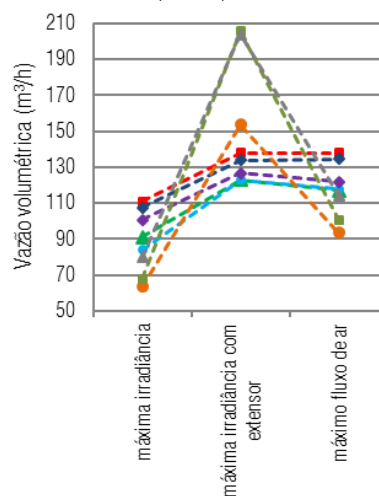


Figura 11 - Vazão volumétrica da chaminé solar ( $\text{m}^3/\text{h}$ )



Pode-se notar que o uso do extensor na chaminé inclinada para máxima irradiância provocou redução da irradiância solar sobre o plano do vidro na ordem de 3%, se comparada à configuração sem extensor, para as cidades cuja inclinação ideal do coletor é de 10° (zonas bioclimáticas 1 a 6). Para as demais cidades (zonas bioclimáticas 7 e 8) a redução ficou na ordem de 1%. Uma provável causa dessa redução está na sombra que o extensor pode provocar sobre a placa coletora, pois, mesmo sem esconder o sol, ele pode ocultar uma parcela do céu, reduzindo a parcela de irradiância difusa. A configuração de máximo fluxo de ar apresentou queda na radiação solar incidente no plano do vidro entre 12% e 22%.

O uso do extensor na chaminé inclinada para máxima irradiância provocou redução na temperatura do ar no canal da chaminé, se comparada à configuração sem extensor, na ordem de 8% a 34%. No caso da chaminé inclinada para máximo fluxo de ar, a queda na temperatura do ar no interior do canal foi significativa para todas as cidades analisadas, ficando entre 20% e 32%, se comparada à chaminé com extensor.

A análise mostrou que, para o solstício de verão, nem todos os horários do dia são favoráveis ao uso do extensor, especialmente nas cidades com latitudes mais elevadas. Entretanto, o sistema com

extensor apresentou desempenho médio de vazão superior para todos os casos analisados. Em vista disso, constatou-se adequada a proposta de uso do extensor em cidades de baixas latitudes, de modo a aumentar a irradiância solar no coletor e, consequentemente, o fluxo de ar proporcionado pelo sistema.

A adequabilidade de tal solução foi confirmada pela simulação horária anual das configurações para máximo fluxo de ar e máxima irradiância com extensor. Para as zonas bioclimáticas 1 a 5, a chaminé com extensor apresentou uma média de vazão volumétrica no período entre 8h e 16h de 1% a 10% superior à configuração para máximo fluxo de ar. Para as zonas bioclimáticas 6 a 8 o desempenho mostrou-se de 25% a 36% superior.

Alguns resultados obtidos com a chaminé inclinada para máxima irradiância com extensor foram comparados com os resultados de pesquisas levantadas da literatura especializada (Tabela 6). Nota-se uma lacuna na divulgação de informações importantes que permitam uma comparação detalhada dos resultados. Também não foram encontradas pesquisas que apresentem configuração geométrica similar à proposta na presente pesquisa. Ainda assim, pode-se concluir que os resultados de desempenho apresentam a mesma ordem de grandeza.

Tabela 6 - Dados de pesquisas desenvolvidas sobre chaminés solares

Pesquisa	Clima	Configuração geométrica			Metodologia		Desempenho (melhores resultados)					
		Seção transversal (m)	Comprimento (m)	Inclinação com a horizontal	Estudo experimental	Modelo matemático	Radiação solar incidente (W/m²)	Temperatura do ar interno (°C)	Temperatura do ar externo (°C)	Vazão volumétrica (m³/h)	Vazão mássica (kg/h)	Velocidade do ar (m/s)
Bansal, Mathur e Bhandari (1993)	26°53'N	1,5 x 0,15	1,5	30°		X	200 1000		36	140,4 331,2		0,17 0,41
Bassiouny e Korah (2009)	28°24'N	1 x 0,35	1	45°		X	750				237,6	
Mathur, Mathur e Anupma (2006)	26°53'N	1 x 0,35	1	45°	x	X	750	40		277,2		0,22
A presente pesquisa	29°41'S 1°27'S	1 x 0,30	1	10° 25°	x	x	864 738	37,4 40,8	27,6 30,2	138,1 203,9		



## Variação no comprimento da chaminé

As Figuras 12 e 13 apresentam os resultados de vazão volumétrica e de diferença de temperatura entre o ar no canal e o ar externo para a análise de variação no comprimento da chaminé, às 12 h do solstício de verão.

O incremento mais significativo no fluxo de ar decorrente do aumento no comprimento da chaminé ocorreu para o intervalo de 1,0 m para 1,5 m, sendo a menor diferença encontrada para a cidade de Florianópolis, com 18% de incremento, e chegando, para o caso de Santos, a 110% de incremento.

Apesar de o aumento nas perdas de carga por atrito em função do aumento no comprimento da chaminé não ser significativo (Tabela 3), nota-se que o incremento na vazão volumétrica da chaminé não é proporcional a seu aumento em comprimento. Em vista disso, deve-se estabelecer, caso a caso, um comprimento ideal para a chaminé, de modo que se otimize seu desempenho em função do ambiente que se deseje ventilar. Para isso foi desenvolvida uma equação para a estimativa da vazão volumétrica da chaminé solar, desenvolvida através de análises por regressão, a partir dos resultados das simulações para o solstício de verão.

A equação resultante (Equação 7) foi obtida por meio de correlações encontradas entre a vazão volumétrica e as seguintes variáveis: temperatura do ar no canal da chaminé ( $T_c$ ), diferença de temperatura entre o ar no canal e o ar externo ( $\Delta T$ ) e comprimento da chaminé ( $C$ ). A Tabela 7 apresenta os valores das constantes da Equação 7 para cada cidade. A partir da aplicação da equação, pode-se ter uma estimativa inicial da vazão volumétrica proporcionada pela chaminé solar. Para o desenvolvimento da correlação foram utilizadas 36 amostras por cidade.

$$Q = A_1 \cdot C + A_2 \cdot T_c + A_3 \cdot \Delta T + B \quad \text{Eq. 7}$$

## Variação do tipo de vidro utilizado no coletor

Analisam-se aqui os resultados comparativos de dois tipos de vidro no coletor solar da chaminé: vidro incolor comum e vidro de baixa emissividade (low-e). A baixa emissividade consiste na redução de emissão de energia térmica, que, por sua vez, aumenta a capacidade de isolamento térmico do conjunto. Por consequência, o uso desse tipo de vidro na chaminé solar resultou em redução nas perdas de calor do sistema para o ambiente externo e em redução na temperatura superficial do vidro, como pode ser observado na Figura 14.

Figura 12 - Variação no comprimento da chaminé -  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

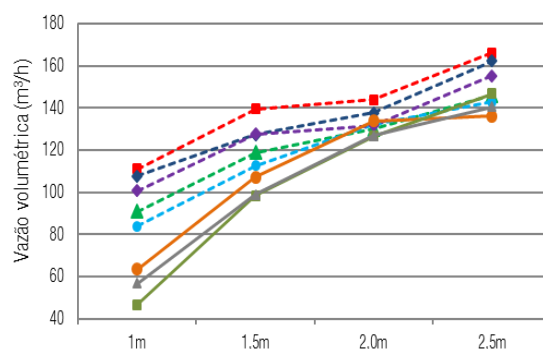


Figura 13 - Variação no comprimento da chaminé -  $\Delta T$  ( $^{\circ}\text{C}$ )

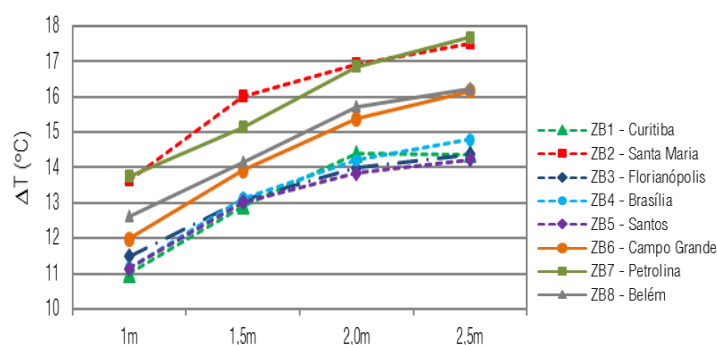
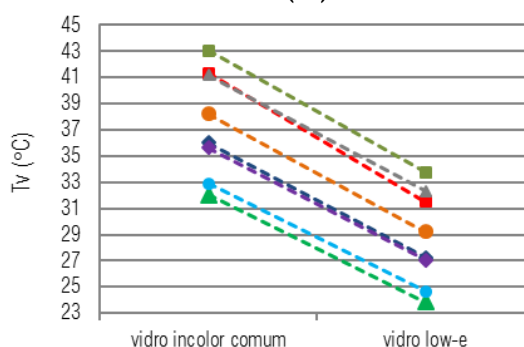


Tabela 7 - Análise por regressão do comprimento da chaminé

Cidade	A1	A2	A3	B	DP	R <sup>2</sup>
Curitiba	22,06629	-9,63462	18,54709	193,78325	7,41	0,94
Santa Maria	19,81369	-4,7618	11,83464	123,46442	5,42	0,96
Florianópolis	20,56765	-1,40573	9,9509	21,67122	4,55	0,98
Brasília	22,25946	-8,87266	19,04264	162,01109	7,51	0,96
Santos	20,08317	-3,3935	11,96649	69,99788	5,02	0,97
Campo Grande	26,21907	-6,50399	16,52432	106,97844	8,06	0,96
Petrolina	27,5021	-5,32472	14,17886	81,41254	14,73	0,90
Belém	25,19304	-4,92243	14,38318	69,4649	12,00	0,93

Figura 14 - Alteração do tipo de vidro do coletor - Tv (°C)



O uso do vidro de baixa emissividade provocou um aumento entre 3% e 7% na temperatura do ar no canal da chaminé (Figura 15). Em vista disso, o fluxo de ar sofreu incremento de 6% a 10% nas cidades localizadas nas zonas bioclimáticas 1 a 5 e de 29% a 35% nas cidades localizadas nas zonas bioclimáticas 6 a 8 (Figura 16).

### Comparação entre chaminés com e sem coletor solar

Compara-se aqui a diferença de desempenho entre chaminés com e sem coletor solar, ambas com as mesmas características geométricas, visando traçar uma estimativa do incremento no fluxo de ar proporcionado pelo uso de um coletor solar na chaminé. Os resultados são apresentados para o horário de maior irradiância do solstício de verão (Figuras 17 e 18).

Os resultados de diferença de temperatura entre o ar no canal e o ar externo (Figura 17) apontaram um aumento de 23% a 76% na temperatura do ar no canal da chaminé, dependendo da cidade, decorrente do aquecimento proporcionado pelo coletor. A vazão volumétrica (Figura 18) sofreu incremento de 37% a 159%. As cidades que apresentaram diferenças de desempenho mais significativas foram as localizadas mais próximo à linha do Equador: Brasília, Campo Grande, Petrolina e Belém.

A partir desses resultados, avaliou-se o potencial teórico de ventilação das chaminés, ambas acopladas a um ambiente com dimensões típicas de habitações, de 3 m x 3 m x 2,7 m. Os resultados de vazão volumétrica e de taxa de renovação de ar horária (número de trocas de ar por hora) são apresentados na Tabela 8. Tendo em vista que a chaminé aqui analisada possui apenas 1 m<sup>2</sup> de área de coletor, o uso de configurações com maiores dimensões poderia ampliar seu potencial de ventilação para outras situações.

### Conclusões

Este artigo teve como intuito investigar o desempenho de chaminés solares com diferentes características geométricas e construtivas localizadas em cidades representativas do zoneamento bioclimático brasileiro. O estudo da configuração geométrica da chaminé revelou grande influência da espessura do canal de ar sobre seu desempenho. Foi definida uma espessura ótima do canal para cada cidade, sendo observada estabilização do fluxo de ar no interior da chaminé quando a espessura ótima fosse excedida.

Alterações no comprimento da chaminé mostraram-se menos impactantes do que alterações na espessura do canal. A análise empreendida mostrou ser necessário estabelecer um comprimento ideal para a chaminé, de modo a otimizar seu desempenho em função do ambiente a ser ventilado.

Figura 15 - Alteração do tipo de vidro do coletor -  $\Delta T$  ( $^{\circ}\text{C}$ )

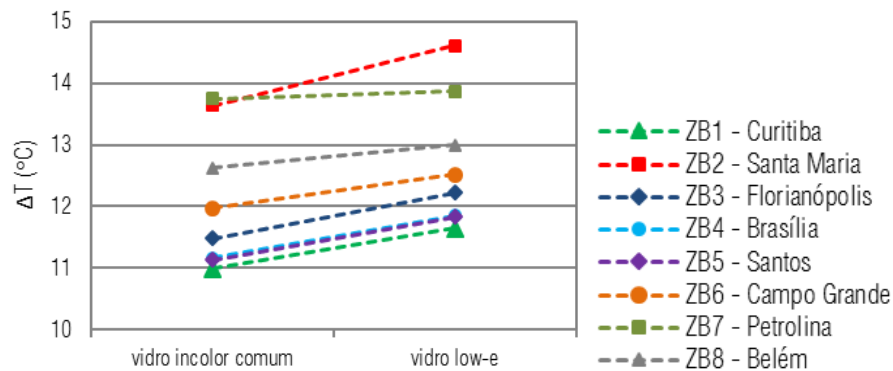


Figura 16 - Alteração do tipo de vidro do coletor -  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

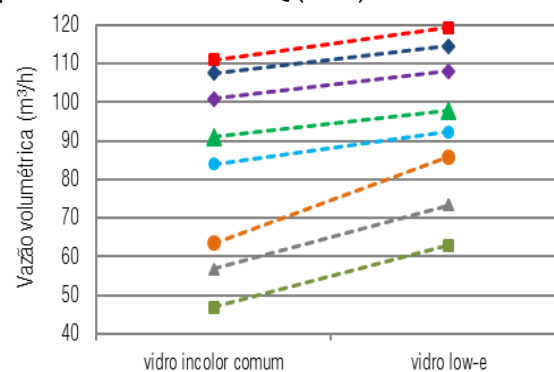


Figura 17 - Chaminés com e sem coletor solar -  $\Delta T$  ( $^{\circ}\text{C}$ )

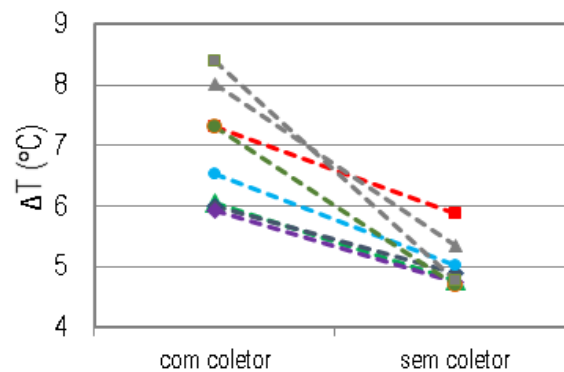


Figura 18 - Chaminés com e sem coletor solar -  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

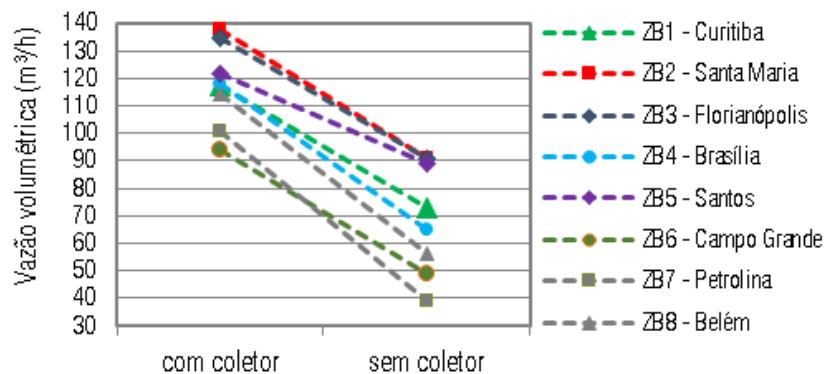


Tabela 8 - Análise de desempenho para o horário de maior irradiância (12h)

Cidade	Chaminé sem coletor		Chaminé com coletor	
	Vazão volumétrica (m <sup>3</sup> /h)	Taxa de renovação horária	Vazão volumétrica (m <sup>3</sup> /h)	Taxa de renovação horária
Curitiba	72,6	3,0	117,1	4,8
Santa Maria	90,8	3,7	138,0	5,7
Florianópolis	90,6	3,7	134,7	5,5
Brasília	65,0	2,7	117,8	4,8
Santos	89,1	3,7	121,9	5,0
Campo Grande	49,1	2,0	93,7	3,9
Petrolina	38,9	1,6	100,9	4,2
Belém	56,1	2,3	114,3	4,7

Com relação ao ângulo de inclinação do coletor solar, verificou-se que, se o coletor for posicionado em inclinação adequada para maximizar a irradiância solar no plano do vidro, é desejável o uso de um extensor vertical acoplado à chaminé, de modo a garantir a manutenção de uma mesma altura útil ao conjunto, independentemente da inclinação do coletor.

Os resultados do uso desse aparato de extensão apontaram, em todos os casos analisados, vazões superiores às da chaminé com inclinação para “máximo fluxo de ar”. Além disso, as horas mais quentes do dia, em que a ventilação natural é mais necessária como estratégia de conforto térmico em edificações, coincidem com as maiores diferenças nas taxas de fluxo de ar, o que justifica o uso dessa configuração de chaminé para a ventilação natural de edificações localizadas em regiões de baixa latitude. A análise anual ratificou este resultado ao mostrar um desempenho médio superior, principalmente para as cidades mais próximas à linha do Equador.

Um fator importante que prejudica o desempenho de chaminés solares com inclinação próxima à horizontal é o aumento nas perdas de carga provocado pelas seções curvas. A análise empreendida mostrou que o melhor aproveitamento da radiação solar pode compensar a perda de carga mais elevada. A questão, no entanto, deve ser cuidadosamente analisada durante o processo de projeto.

É importante salientar a existência de limitações no modelo escolhido para a realização das análises, que interferem nos resultados finais de vazão da chaminé, o que ocorre principalmente em função do cálculo das camadas-limite de origem térmica. Há tendência a superestimar os resultados de fluxo de ar ao meio-dia devido ao superaquecimento da placa absorvedora, e a subestimá-los no início e fim do dia. Tal constatação não invalida, no entanto, os resultados obtidos, visto que as médias diárias apresentaram estimativas coerentes com o

modelo experimental e que os resultados foram analisados de forma comparativa.

## Referências

- ADAM, Z. **On the Performance of Solar Chimneys**: with particular reference on the prediction of flow rate. Osaka, 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade de Osaka, 2003.
- ADAM, Z.; YAMANAKA, T.; KOTANI, H. Mathematical Model and Experimental Study of Airflow in Solar Chimneys. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AIR DISTRIBUTION IN ROOMS, 8., Roomvent, 2002. **Proceedings...** Copenhagen: Roomvent, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.
- BANSAL, N. K.; MATHUR, R.; BHANDARI M. S. Solar Chimney for Enhanced Stack Ventilation. **Building and Environment**, v. 28, n. 3, p. 373-377, jul. 1993.
- BARBOSA, S. A. *et al.* Método de Utilização do Programa Energyplus Para Verificação de Desempenho Térmico de Ambientes Com Fachadas Duplas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 4, p. 121-134, jul./set. 2013.
- 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.
- BRASIL, C. S. *et al.* Avaliação da Secagem de Tomates em Uma Chaminé Solar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS: ESTRATÉGIA PARA O DESENVOLVIMENTO, 19., Campinas, 2004. **Anais...** Campinas: CBCTA, 2004.

CAVALCANTI, F. S.; RORIZ, M. Ventilação Natural em Espaços Internos a Partir da Utilização de Chaminé solar. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11, Brasília, 2011. **Anais...** Brasília: ENCAC, 2011.

CHUNGLOO, S.; LIMMEECHOKCHAI, B. A Numerical Study of Natural Ventilation in Buildings: utilized solar chimney and cool ceiling. In: JOINT INTERNATIONAL CONFERENCE ON "SUSTAINABLE ENERGY AND ENVIRONMENT", 2., Bangkok, 2006. **Proceedings...** Bangkok: SEE, 2006.

ENERGYPLUS. **EnergyPlus Documentation Engineering Reference**: the reference to EnergyPlus calculations. US Department of Energy, 2015.

FERREIRA, A. *et al.* Technical Feasibility Assessment of a Solar Chimney for Food Drying. **Solar Energy**, v. 82, n. 3, p. 198-205, mar. 2008.

FRANK, B. **Convecção Induzida Pelo Sol**: chaminé solar. Porto Alegre, 1981. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1981.

IDEL'CIK, I. E. **Memento des Pertes de Charge**: coefficients de pertes de charge singulières et de pertes de charge par frottement. Paris: Editions Eyrolles, 1999.

IMRAN, A. A.; JALIL, J. M.; AHMED, S. T. Induced Flow for Ventilation and Cooling by a Solar Chimney. **Renewable Energy**, v. 78, p. 236-244, jun. 2015.

KHANAL, R.; LEI, C. An Experimental Investigation of an Inclined Passive Wall Solar Chimney For Natural Ventilation. **Solar Energy**, v. 107, p. 461-474, sep. 2014.

LEE, K. H; STRAND, R. K. Enhancement of Natural Ventilation in Buildings Using a Thermal Chimney. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 6, p. 615-621, jun. 2009.

LUKANTCHUKI, M. *et al.* Sheds Extratores e Captadores de Ar: influência da geometria e da dimensão das aberturas no desempenho da ventilação natural nas edificações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 1, p. 83-104, jan./mar. 2016.

MAIA, C. *et al.* Theoretical Evaluation of the Influence of Geometric Parameters and Materials on the Behavior of the Airflow in a Solar Chimney. **Computers & Fluids**, v. 38, n. 3, p. 625-636, mar. 2009.

MARQUES DA SILVA, F. V. **Ventilação Natural de Edifícios**: turbulência atmosférica. Lisboa, 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2003.

MATA, C.; SARAIVA, J. S. Coletores Solares Planos a Ar: considerações sobre o seu funcionamento na vertical. Lisboa, 1987. Relatório 144/87, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

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, oct. 2006.

NEVES, L. O.; RORIZ, M.; MARQUES DA SILVA, F. Modeling a Solar Chimney for Maximum Solar Irradiation and Maximum Air Flow, for Low Latitude Locations. In: CONFERENCE OF INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION, 12., Sydney, 2011. **Proceedings...** Sydney, 2011.

NEVES, L. O.; RORIZ, M. Procedimentos Estimativos do Potencial de Uso de Chaminés Solares Para Promover a Ventilação Natural em Edificações de Baixa Altura. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 1, p. 177-192, jan./mar. 2012.

RORIZ, M. **Base de Dados Climáticos de 411 Municípios Brasileiros**. 2012. Disponível em: <[http://www.roriz.eng.br/epw\\_9.html](http://www.roriz.eng.br/epw_9.html)>. Acesso em: 5 jan. 2012.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de expressar uma imensa gratidão ao professor Maurício Roriz (em memória), pela orientação e participação no desenvolvimento desta pesquisa. Gostariam também de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp), pelo apoio financeiro ao desenvolvimento desta pesquisa.

**Leticia de Oliveira Neves**

Departamento de Arquitetura e Construção, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo | Universidade Estadual de Campinas  
| Rua Saturnino de Brito, 224, Cidade Universitária | Campinas - SP - Brasil | CEP 13083-889 | Tel.: (19) 3521-2384 |  
E-mail: leticia@fec.unicamp.br

**Fernando Marques da Silva**

Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas | Laboratório Nacional de Engenharia Civil | Av. Do Brasil, 101 | Lisboa - Portugal  
| 1700-066 | Tel.: +351 (21) 844 38 62 | E-mail: fms@lnec.pt

***Revista Ambiente Construído***

Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído  
Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro  
Porto Alegre - RS - Brasil  
CEP 90035-190  
Telefone: +55 (51) 3308-4084  
Fax: +55 (51) 3308-4054  
[www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido](http://www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido)  
E-mail: [ambienteconstruido@ufrgs.br](mailto:ambienteconstruido@ufrgs.br)