ANÁLISE DA QUALIDADE DA SIMULAÇÃO DO FLUXO DE AR DE CHAMINÉS SOLARES COM O ENERGYPLUS

Matheus, Oliveira (1); Joyce, Carlo (2)

- (1) Mestrando, Arquiteto e Urbanista, matheus.menezes@ufv.br, Universidade Federal de Viçosa, Avenida Peter Henry Rolfs, s/n°, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Viçosa-MG, (31) 3899-1966
- (2) Doutora, Arquiteta e Urbanista, joycecarlo@ufv.br, Universidade Federal de Viçosa, Avenida Peter Henry Rolfs, s/n°, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Viçosa-MG, (31) 3899-1966

RESUMO

As Chaminés Solares são dispositivos que promovem o aumento das trocas de ar no ambiente, com consequente renovação de ar e redução dos gastos energéticos de um edifício. Esse artigo apresenta uma investigação sobre o tratamento estatístico dos resultados de duas metodologias usadas para simulação do efeito chaminé, uma delas, válida, e a outra, sem modelos numéricos do efeito chaminé: foram comparados e analisados os resultados obtidos por simulações em *CFD* com mais duas simulações no *EnergyPlus*, utilizando o modelo *ThermalChimney* e o *Airflow Network*. As simulações foram baseadas no dispositivo Brise-Chaminé-Solar, protótipo construído que validou o *CFD*. Foram utilizados para o tratamento dos resultados de fluxos de ar, o Erro Absoluto Médio (EAM), a diferença horária média, gráficos *BoxPlot* e de dispersão. Concluiu-se que os melhores indicadores estatísticos para análise dos fluxos de ar foram o EAM e o gráfico de dispersão, preferencialmente a combinação de ambos.

Palavras-chave: Chaminé Solar; Simulação Termoenergética; EnergyPlus

ABSTRACT

Solar Chimneys are devices that have a potential to promote air changes, with air renovation and savings in the building energy budget. This paper presents an analysis of the statistic results of two methodologies used to simulate the stack effect in EnergyPlus: results obtained from CFD simulation were used to compare and analyze two other methodologies of EnergyPlus, using the ThermalChimney model and Airflow Network.. The simulations were based on the Brise-Chaminé-Solar built prototype which validated the CFD simulations. The Root Mean Square Error (RMSE), the average hourly difference, BoxPlot and Scatter charts were used for the results processing. The conclusion pointed out that the best statistical indicators for analyzing airflows were the RMSE and the Scatter chart, rather the combination of both.

Keywords: Solar chimney; Energy Simulation; EnergyPlus

1. INTRODUÇÃO

A ventilação é uma das principais estratégias para alcançar conforto e eficiência energética. A ventilação natural pode ocorrer através da ação direta dos ventos, do efeito chaminé ou da combinação de ambos. A ventilação natural, segundo Schulze e Eicker (2012) deve atender a duas funções principais, proporcionar qualidade e trocas do ar interno, sem a necessidade do uso de eletricidade, e aumentar o nível de conforto em dias quentes. Entretanto, de acordo com os autores a falta de estudos e planejamento de aberturas para a ventilação natural, assim como a pouca disponibilidade de resultados de avaliações de edifícios ventilados naturalmente prejudicam a aplicação desse tipo de estratégia de conforto.

Neves e Roriz (2012) alertam que, em áreas urbanizadas, existem grandes perdas da velocidade do vento devido aos obstáculos urbanos, o que torna o efeito chaminé uma importante alternativa pelo fato deste não depender da ação direta dos ventos.

Nesse contexto, as Chaminés Solares são dispositivos que possuem grande potencial para o aumento das trocas de ar e ventilação natural, do conforto térmico e redução dos gastos energéticos de um edifício.

1.1 Chaminés Solares

Zhai, Song e Wang (2011) e Asadia *et al.* (2016) definiram Chaminés Solares como dispositivos que utilizam a radiação solar para promover o efeito chaminé e melhorar a ventilação natural em edificações. Estes dispositivos possuem vantagens relacionadas ao baixo custo operacional, não utilização de energia elétrica e redução nas emissões de dióxido de carbono. As Chaminés Solares são compostas por um duto que absorve a energia solar o que, por consequência, passa por um aumento da sua temperatura e uma diminuição da densidade do ar no seu interior. A queda da densidade faz com que o no ar interior da cavidade se eleve e seja expulso pela abertura superior da chaminé.

1.2 Simulação Termoenergética de Chaminés Solares

Devido a sua importância e complexidade, metodologias de análise foram desenvolvidas e testadas para prever o comportamento e efeitos do vento em edificações. Esses modelos têm como objetivo, além de prever o desempenho da ventilação, fornecer informações relativas a parâmetros do ar no interior de um ambiente ou em um edifício, antes mesmo da sua construção ou reforma (CHEN, 2009). Destacam-se na bibliografia, entre as metodologias de análise de dispositivos proporcionadores de ventilação natural os modelos analíticos, modelos experimentais em escala, modelos em escala 1:1, modelos multizonas (*EnergyPlus*) e modelos *CFD* (*Computational Fluid Dynamics*). Embora citadas diferentes metodologias de análise dos efeitos dos ventos, autores como Lee; Strand, (2008); Koronaki, (2012); Schulze; Eicker (2012); Neves; Roriz (2012); Asadi *et al.*, (2016) basearam seus estudos em simulações no *EnergyPlus* e apresentaram resultados satisfatórios na simulação de diferentes Chaminés Solares.

O *EnergyPlus* é um programa computacional criado a partir dos programas *BLAST* e *DOE-2*. É disponibilizado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, desenvolvido para a análise energética de edificações, para simulação de cargas térmicas, temperatura, ventilação, radiação entre outros (MELO; WESTPHAL; MATOS, 2009). O programa utiliza o método de cálculo do balanço térmico, é validado pelo método *bestest* da *ASHRAE Standard 140* (2011).

As simulações termoenergéticas no *EnergyPlus* são realizadas pelo modelo para cálculo de fluxo de ar denominado *AirflowNetwork*. De acordo com Zhang, Lam, Yao (2013), no modelo de rede adotado pelo programa, cada zona é um nó do sistema, em que as aberturas são ligações entre esses nós. Neves e Roriz (2012) apontam que este modelo baseia-se na hipótese de que as temperaturas superficiais e do ar são uniformemente distribuídas dentro de uma mesma zona térmica.

Neves e Roriz (2012) afirmam que a simulação termoenergética no *EnergyPlus* é um método confiável para o desenvolvimento de pesquisas relacionadas à Chaminés Solares. Lee e Strand (2008) reforçam a importância da simulação desses dispositivos no *EnergyPlus*. Os autores demonstraram a necessidade de analisar e simular uma Chaminé Solar durante todas as horas do ano, visto que somente com a simulação anual é possível produzir uma avaliação precisa da aplicabilidade dessa tecnologia.

1.3 Brise-Chaminé-Solar

O Brise-Chaminé-Solar foi o produto resultado da dissertação de Maciel (2016). A autora realizou estudos experimentais sobre o potencial de renovação de ar e redução do ofuscamento em um modelo de dispositivo que mescla as características de um brise e de uma chaminé solar para salas de aula. O estudo

resultou no depósito de patente de um produto denominado "Brise-Chaminé-Solar" sob o registro BR1020160032237.

O desempenho do Brise-Chaminé-Solar foi analisado através de simulação termoenergética nos programas *CFD*, *EnergyPlus* e medições em modelo construído em escala 1:1. Maciel (2016) comprovou que o Brise-Chaminé-Solar apresenta potencial para a renovação de ar e redução do ofuscamento em ambientes internos, porém a autora quantificou este desempenho primordialmente por *CFD*, a partir das temperaturas superficiais obtidas pelo *EnergyPlus*.

O modelo numérico de chaminés solares (equação 1) utilizado pelo *EnergyPlus* (2015), em si pode ser mais investigado com o uso de resultados experimentais.

$$Q=C_dA_o\,\sqrt{rac{2(rac{T_{fo}-T_r}{T_r})gL}{\left(1+A_r\,
ight)^{-2}}}$$
 Equação 1 $A_r\,=A_o\,/A_i$

Onde

Q – Taxa de fluxo de ar causado pelo efeito chaminé [m³/s]

Ai - Área da seção transversal da entrada do canal de ar [m²]

Ao - Área da seção transversal da saída do canal de ar [m²]

Cd – Coeficiente de descarga

g – Aceleração da gravidade [9.8 m/s²]

L – Altura total da chaminé Solar [m]

Tfo – Temperatura do ar na saída da chaminé solar [K]

Tr – Temperatura do ambiente [K]

Neves e Roriz (2012) avaliaram os fluxos de ar de chaminé solar por apenas um dia. Os autores apresentaram uma comparação entre procedimentos estimativos do potencial de uso de chaminés solares, entretanto não estabeleceram parâmetros de comparação anual entre valores. Logo, não foram encontrados na bibliografia parâmetros referenciais para uma avaliação numérica anual dos fluxos de ar de uma chaminé solar, além da realizada por Maciel (2016).

2. OBJETIVO

Investigar indicadores para análise da qualidade de simulação do fluxo de ar através diferentes modelagens do dispositivo Brise-Chaminés-Solar.

3. MÉTODO

O método utilizado nesse trabalho é baseado na comparação de diferentes simulações termoenergéticas com o software *EnergyPlus*, tendo como referência de modelo o dispositivo Brise Chaminé Solar desenvolvido por Maciel (2016). Os fluxos de ar obtidos pelas simulações são comparados através de métodos de indicadores estatísticos.

3.1 Caracterização do Brise-Chaminé-Solar

O Brise-Chaminé-Solar possui uma geometria retangular com dimensões internas de 0,90m por 0,20m, de acordo com a Figura 1.

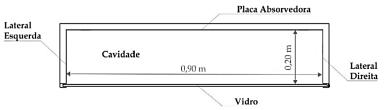


Figura 1 – Seção do Brise Chaminé Solar (MACIEL, 2016).

O dispositivo tem como características construtivas,

(...) uma placa vertical composta de múltiplas camadas: uma superfície envidraçada, uma cavidade por onde o ar flui e uma placa absorvedora. A placa absorvedora é composta por uma chapa de aço na cor preta (alta absortância térmica), uma camada de ar para isolamento térmico e outra chapa de aço para fechamento. A face externa da chapa de fechamento, voltada para a abertura do ambiente interno, tem cor de baixa absortância solar e da luz visível e tem a função de refletir a radiação externa, bem como bloquear a radiação térmica emitida pela placa absorvedora (MACIEL, 2016).

3.2 Equações do Fluxo de Ar desenvolvidas por Maciel (2016)

As equações de Maciel (2016) foram obtidas por simulação *CFD*, que por sua vez foram validadas com medições. A autora utilizou a geometria e características especificadas no item 3.1. Para a simulação, o dispositivo foi acoplado em dois laboratórios, o primeiro, um ambiente térreo, com área de 107,8m² e volume de 339,6 m³, o segundo, localizado no pavimento superior, com área de 91,3 m² e volume de 287,6m³. O Brise-Chaminé-Solar foi instalado na fachada oeste e encontra-se conectado aos dois ambientes simultaneamente.

Maciel (2016) desenvolveu três equações apresentadas na Figura 2. As equações foram obtidas através da simulação do Brise-Chaminé-Solar para três alturas: 2,85m (representando um pavimento), 5,85m (dois pavimentos) e 8,85m (três pavimentos). Além disso, para cada altura, 5 condições de temperatura superficial foram avaliadas (25°C, 45°C, 65°C, 85°C e 105°C).

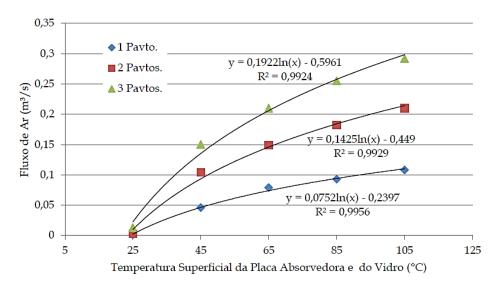


Figura 2 – Equações de Fluxo de Ar de MACIEL, 2016.

As equações de Maciel (2016) foram consideradas validadas e verdadeiras e servirão de parâmetro de comparação para os resultados dos fluxos de ar obtidos a partir das novas simulações.

3.3 Simulação EnergyPlus

O Brise-Chaminé-Solar foi simulado no *EnergyPlus* com o auxílio do *Legacy Open Studio*. A simulação foi feita para a cidade de Viçosa-MG, Zona Bioclimática 3 (NBR 15.220, 2003) com o arquivo climático TMY desenvolvido por Guimarães e Carlo (2011). A simulação levou em consideração todas as horas do ano, e foram desconsideradas cargas internas de pessoas ou equipamentos e condicionamento artificial, conforme as simulações em *CFD* de Maciel (2016).

Para uma análise do desempenho do programa e teste de metodologia de simulação, o dispositivo foi modelado de duas formas distintas, utilizando o cálculo de chaminé solar do *EnergyPlus*, *ThermalChimney*, e utilizando zonas térmicas conectadas entre si para a modelagem do dispositivo.

Em ambas as metodologias o Brise-Chaminé-Solar foi modelado para duas alturas, denominadas ALT1 (altura da chaminé equivalente a um pavimento) e ALT2 (altura da chaminé equivalente a dois pavimentos). As propriedades dos materiais dos ambientes em que o dispositivo está acoplado, assim como os materiais do Brise-Chaminé-Solar são idênticos aos especificados por Maciel (2016). A opção equivalente

a ALT3 (altura de três pavimentos, treze metros) não foi simulada, pois o modelo construído por Maciel (2016) possui altura de dois pavimentos. As aberturas foram mantidas fechadas durante a simulação, com exceção das aberturas do Brise-Chaminé-Solar. Logo apenas a infiltração foi considerada para efeitos de troca do ar.

3.3.1 Caso Base

Foi denominado "Caso Base", o fluxo de ar resultante das equações de Maciel (2016) para a temperatura da placa absorvedora que, por sua vez, foi determinada por simulação no *EnergyPlus*.

3.3.2 Brise-Chaminé-Solar modelado como *ThermalChimney*

O Brise-Chaminé-Solar foi modelado como uma chaminé solar utilizando o modelo de cálculo *ThermalChimney*. Devido ao fato do modelo *ThermalChimney* não se integrar com o modelo de ventilação *AirFlowNetwork*, foi realizada uma simulação prévia em que o ambiente foi simulado com as aberturas fechadas e com o modelo de ventilação (*AirFlowNetwork*) ativado e sem a chaminé solar (*ThermalChimney*). A partir dessa simulação obteve-se a infiltração horária pelo *AirFlowNetwork*, que foi transformada em um padrão de uso. Com a infiltração determinada, uma nova simulação foi realizada com *AirFlowNetwork* desativado e com o *ThermalChimney* ativado.

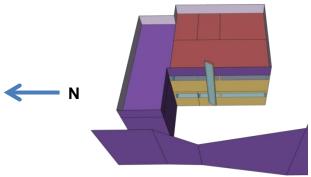


Figura 3 Modelo do Brise-Chaminé-Solar modelado como ThermalChimney (Elaborado pelos autores).

3.3.3 Brise-Chaminé-Solar modelado como zonas térmicas

O Brise-Chaminé-Solar foi modelado como zonas térmicas independentes conectadas entre si através de esquadrias constantemente abertas, conforme mostra a Figura 4. Esse modelo de simulação não considera o cálculo do efeito chaminé, logo é esperado que seus resultados se distanciassem do caso base.

Como esperado, ao contrário da simulação do modelo de cálculo da chaminé solar pelo *ThermalChimney*, a chaminé modelada como zonas não apresentou problemas na simulação da infiltração com o *AirFlowNetwork*. Logo, não foi necessária a inserção da infiltração através de um padrão de uso.

Além das simulações já citadas - modelo *ThermalChimney* e Brise-Chaminé-Solar modelado como zonas - realizou-se mais uma simulação. Essa nova simulação considerou todas as esquadrias do ambiente abertas, com o dispositivo modelado como zonas térmicas. Essas simulações foram realizadas para avaliar a influência das aberturas no desempenho do ambiente.

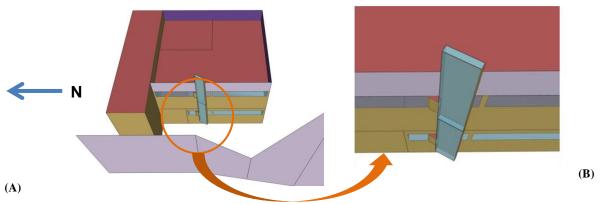


Figura 4 - Modelo do Brise-Chaminé-Solar modelado como Zona Térmica: (A) Edificação e entorno; (B) Brise Chaminé Solar (Elaborado pelos autores).

3.4 Análise dos resultados

A vazão do fluxo de ar simulada com o EnergyPlus para o Brise-Chaminé-Solar nas duas metodologias apresentadas, foi comparada com o resultado do fluxo de ar obtido do caso base.

Para determinar a relação entre fluxos de ar obtidos nas simulações e o caso base, foi utilizado o Erro Absoluto Médio (Equação 2).

EAM=
$$\sqrt{\frac{\sum_{i}^{N} \left(\frac{yi-xi}{xi}\right)^{2}}{N}} \times 100$$

Equação 2: Erro Absoluto Médio

Onde:

EAM: erro absoluto médio;

 y_i = Dados obtidos por simulação; x_i = Dados obtidos a partir do caso base;

N = número de valores analisados, horas do

ano.

Outra forma adotada para de estimar a diferença entre os resultados obtidos por simulação e caso base, foi determinar a relação de diferença horaria média entre esses conjuntos de dados. Logo, foi calculada a média da diferença entre os fluxos de ar dos casos base e os fluxos dos modelos simulados (Equação 3).

$$D(\%) = \frac{\sum_{i}^{N} \frac{Fcb - F_{ca}}{F_{cb}}}{N}$$

Equação 3: Relação de Diferença Horária Média

D: Média das Diferenças horárias (%);

 F_{ca} = Fluxo do caso analisado (m³/s);

 F_{cb} = Fluxo do caso base (m³/s);

N = número de valores analisados, horas do ano, excluindo fluxos negativos.

A análise dos indicadores foi complementada com informações gráficas para visualização dos resultados, o que inclui a obtenção do coeficiente de determinação para verificação da correlação entre dados referenciais.

Em todos os métodos de análise, apenas os valores positivos de fluxo foram selecionados, pois as equações de Maciel (2016) iniciavam a partir da temperatura de 25° C na placa absorvedora, com a obtenção restrita de valores positivos de fluxo. Logo, as temperaturas superficiais inferiores a 25°C foram descartadas, com o objetivo de evitar fluxos de ar negativos.

4. RESULTADOS

4.1 Equações do caso base

A partir da simulação, observou-se que a temperatura da placa absorvedora variou de 5,4 °C a 78,3 °C. Os fluxos resultantes da aplicação da equação de Maciel (2016) sobre esses valores apresentaram alta variação, foram observados resultados para a altura um (ALT 1) mínimo de -0,11 m³/s e máximo de 0,09 m³/s, e para altura dois (ALT 2) mínimo de -0,21 m³/s e máximo de 0,17 m³/s. Porém, como descrito no item 3.4 os valores de fluxo negativo foram descartados na análise dos resultados.

4.2 Brise-Chaminé-Solar modelado como *ThermalChimney*

Como resultado da simulação do Brise-Chaminé-Solar modelado como ThermalChimney foram obtidos resultados de fluxo de ar para a altura um (ALT 1) mínimo de 0,000 m³/s e máximo de 0,048 m³/s, e para altura dois (ALT 2) mínimo de 0,000 m³/s e máximo de 0,082m³/s (Tabela 1).

Pôde ser observado que houve aumento do fluxo com o aumento da altura da chaminé. Entretanto não houve fluxos negativos, o que caracteriza que o programa não simulou fluxos descendentes, do meio externo para o interior da chaminé.

O Erro Absoluto Médio, para ALT 1 foi de 37,35% e ALT 2 foi de 51,80%.

Ao comparar as diferenças horarias médias entre os valores de fluxo de ar do caso base e da simulação com ThermalChimney observou-se que, para a ALT 1, -164,9% foram diferentes e para a ALT 2 -72,53% (Tabela 1).

4.3 Brise-Chaminé-Solar modelado como zonas

4.3.1 Janelas Fechadas

Como resultado da simulação do Brise-Chaminé-Solar modelado como zonas, com as janelas fechadas, foram observados resultados de fluxo de ar para a ALT 1 mínimo de 0,000 m³/s e máximo de 0,003 m³/s, e para ALT 2 mínimo de 0,000 m³/s e máximo de 0,019m³/s (Tabela 1). A simulação com as janelas fechadas apresentou os menores valores de fluxo ascendente dentre as simulações realizadas, assim como a menor variação entre os fluxos de ar.

O Erro Absoluto Médio para ALT 1 foi de 174,25% e ALT 2 foi de 229,05% (Tabela 1).

As diferenças horarias médias foram, para ALT 1, 87,5% e para a ALT2 -352,73% (Tabela 1).

4.3.2 Janelas Abertas

Como resultado da simulação do Brise-Chaminé-Solar modelado como zonas, com as janelas abertas, foram observados resultados de fluxo de ar para ALT 1 mínimo de 0,000 m³/s e máximo de 0,153 m³/s, e para ALT 2, mínimo de 0,000 m³/s e máximo de 0,172m³/s, (Tabela 1).

O Erro Absoluto Médio ALT 1 foi de 194,25% e ALT 2 foi de 139,15% (Tabela 1).

As diferenças horarias médias foram, para a ALT 1, -757,0% e para a ALT 2 -352,7%. Como esperado, a simulação com as janelas abertas apresentou os maiores valores de divergência, quando comparadas com os resultados do caso base.

A Tabela 1 apresenta o resumo dos resultados obtidos a partir do tratamento estatístico dos dados das simulações.

| | BCS_Thermal Chimney_ALT 1 | BCS_Thermal Chimney_ALT 2 | BCS_Zonas_A LT1_Jan.Fech ada | BCS_Zonas_A LT2_Jan.Fech ada | BCS_Zonas_A LT1_Jan.Aber ta | BCS_Zonas_A LT2_Jan.Aber ta |
|------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| EAM | 37,35 | 51,80 | 174,25 | 229,05 | 194,25 | 139,15 |
| Diferença (%) | 164,9 | -72,5 | 87,5 | -352,7 | -756,0 | -352,7 |
| Fluxo Máximo (m³/s) | 0,048 | 0,082 | 0,003 | 0,019 | 0,153 | 0,172 |
| Fluxo Mínimo (m³/s) | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |

Tabela 1 - Indicadores estatísticos aplicados aos casos estudados (Elaborado pelos autores).

Ao ser comparado entre os modelos simulados, os EAM apresentaram menores diferenças entre o dispositivo modelado com *ThermalChimney* e o caso base. Destaca-se o EAM de ALT1 do modelo *ThermalChimney*, que apresentou o menor valor, 37,35% (Tabela 1). Os demais modelos apresentaram EAM consideravelmente elevados, o que é coerente, visto que os dispositivos modelados como zona térmica não descrevem o efeito chaminé, e para esse estudo, não possuem rigor científico de simulação.

Quando considerada as alturas ALT 1 e ALT 2, a menor diferença horaria ocorreu entre o dispositivo modelado como *ThermalChimney* e o caso base. Entretanto, o valor das diferenças horarias médias entre o "BCS_Zonas_ALT1_Jan.Fechadas" e o caso base apresentaram valores menores que quando comparados o modelos "BCS_*ThermalChimney* ALT1" e o caso base. Logo, embora apresentado resultados parciais coerentes, ocorreram limitações na comparação entre valores de fluxos de ar de maneira isolada, limitando a análise a partir da utilização das diferenças horarias médias.

A análise com o gráfico *BoxPlot* mostrou maior semelhança entre os fluxos de ar do caso base e do dispositivo modelado como zonas e com as janelas abertas (Figura 5). Entretanto, sabe-se que ela não é correta, já que apresentou resultados mais divergentes de EAM e das diferenças horárias médias, (Tabela 1). Logo, a análise a partir do gráfico *BoxPlot* não foi conclusiva para determinar a comparação entre os fluxos analisados.

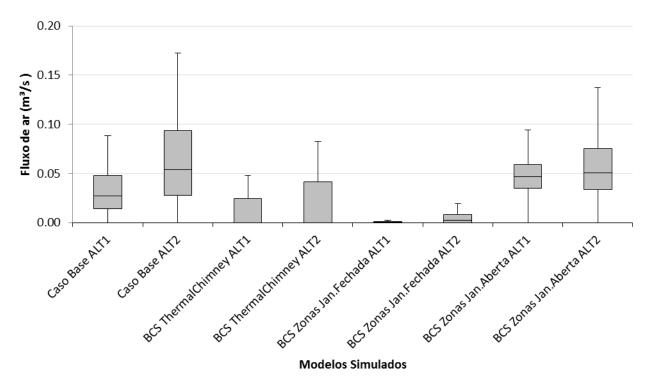


Figura 5 – Fluxo de ar horário em um ano completo no Brise Chaminé Solar (Elaborado pelos autores).

As Figuras 6 e 7 mostram a boa correlação dos fluxos para o modelo *ThermalChimney*, identificado em vermelho, cujo coeficiente de determinação para uma equação linear é 0,792 e 0,791, respectivamente. Pôde ser observado que este é o único modelo que apresenta alguma correlação com caso base. O modelo de janelas fechadas, identificado em azul, se aproxima de zero e a dispersão do modelo de janelas abertas, identificada em verde, é elevada, com coeficientes de determinação de 0,165 e 0,456 respectivamente.

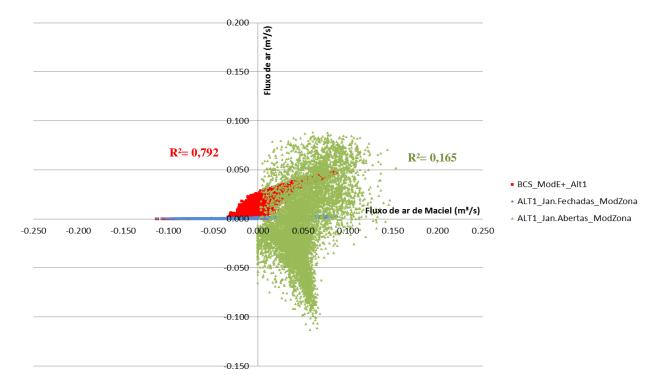


Figura 6 - Gráfico de Dispersão dos Fluxos de Ar Simulados comparados ao Caso Base, para ALT 1 (Elaborado pelos autores).

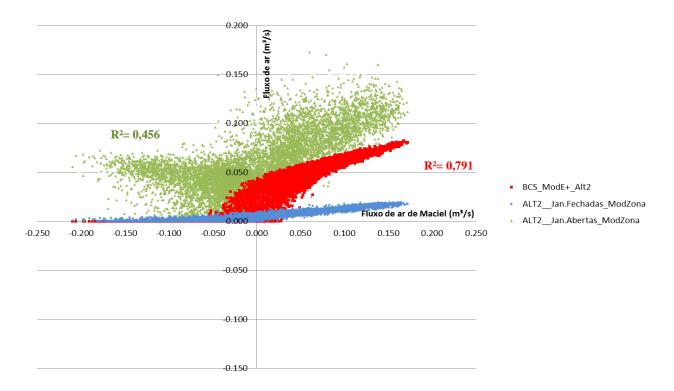


Figura 7 - Gráfico de Dispersão dos Fluxos de Ar Simulados comparados ao Caso Base, para ALT 2 (Elaborado pelos autores).

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos a partir da simulação com o *EnergyPlus* comprovaram que o modelo de cálculo *ThermalChimney* tem potencial para simular os efeitos da ventilação natural em Chaminés Solares, entretanto deve-se atentar para o tipo de abordagem adotada na análise dos dados.

O tratamento estatístico com o Erro Absoluto Médio (EAM) apresentou resultados coerentes entre o caso base e os demais modelos analisados. Considerou-se EAMs entre 37 e 52% como máximos aceitáveis para determinar a semelhança entre fluxos de ar, porém mais estudos são necessários para confirmar estes limites, o que inclui outros métodos ou modelos numéricos de simulação. Por ser um indicador de rápida obtenção, ele é aceitável em uma análise simplificada, a fim de se obter resultados instantâneos. Assim, ele pode ser usado para apontar caminhos para análises estatísticas mais complexas.

A análise através dos gráficos de dispersão contribuiu para o entendimento qualitativo do tratamento dos dados, tanto pela análise visual quanto pelo coeficiente de determinação, embora este último não indique semelhanças entre os dados, mas o ajuste entre os modelos. Em contraste, a análise com *BoxPlot* foi insuficiente para descrever o resultado encontrado, o que poderia induzir a uma interpretação equivocada.

Logo, para uma análise estatística inicial relacionada a fluxos de ar, recomenda-se a utilização do EAM e gráficos de dispersão. Destaca-se a combinação entre ambos para o melhor entendimento dos fenômenos ligados ao fluxo de ar em Chaminés Solares, visto que a análise baseada em mais de um indicador contribuiu para aumentar a confiabilidade do tratamento dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASADIA, S.; FAKHARI, M.; FAYAZ, R.; MAHDAVIPARSA, A. The effect of solar chimney layout on ventilation rate in buildings. **Energy and Buildings.** v. 123, p. 71-78, abril 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS - ABNT. NBR 15220-3. Desempenho térmico de edificações - parte 3: Zoneamento bioclimáticos brasileiros e diretrizes construtivas para habitação unifamiliar de interesse social. Rio de Janeiro. ABNT, 2003.

CHEN, Q. Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recente application. **Building and Evironment**. v. 44, n. 4, p. 848–858, abril, 2009.

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

GUIMARAES, I. B. B.; CARLO, J. C. Caracterização bioclimática da cidade de Viçosa-MG. In: XI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído...Anais: Armação de Búzios: ENCAC, 2011.

KORONAKI, P. The impact of configuration and orientation of solar thermosyphonic systems on night ventilation and fan energy savings. **Energy and Buildings.** v. 57, p. 119-131, outubro, 2012.

- MACIEL, L. F. Desenvolvimento de dispositivo de proteção solar com ênfase na ventilação natural: Um métodos de avaliação baseado em CFD. 2016. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa-MG, 2016.
- MELO, A. P. WESTPHAL, F.S., MATOS, M. **Apostila do Curso Básico do Programa** *Energyplus*. Laboratório de Eficiência energética em Edificações Labeee. Florianópolis, 2009.
- NEVES, L.; RORIZ, M. Procedimentos estimativos do potencial de uso de chaminés solares para promover a ventilação natural em edificações de baixa altura. **Ambiente Construído**. v.2, n.1, p. 177-192, março, 2012.
- SCHULZE, T. e EICKER, U. Controlled natural ventilation for energy efficient buildings. **Energy and Buildings.** v. 56, p. 221-232, julho, 2012.
- ZHAI, X.; SONG, Z. e WANG, R. A review for the applications of solar chimneys in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** v.15, p. 3757-3667, outubro de 2011.
- ZHANG, R.; LAM, K.; YAO, S. Coupled EnergyPlus and computational fluid dynamics simulation for natural ventilation. **Building** and Environment. v. 68, p. 100-113, outubro, 2013.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES/CNPQ e à FAPEMIG pelo financiamento da pesquisa.