UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

LILIANE FERNANDES MACIEL

BRISE-CHAMINÉ-SOLAR: AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E POR SIMULAÇÃO CFD/ENERGYPLUS DE UM DISPOSITIVO DE VENTILAÇÃO

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2016

LILIANE FERNANDES MACIEL

BRISE-CHAMINÉ-SOLAR: AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E POR SIMULAÇÃO CFD/ENERGYPLUS DE UM DISPOSITIVO DE VENTILAÇÃO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2016

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa

T
M152b
2016

Maciel, Liliane Fernandes, 19-
Brise-chaminé-solar : avaliação experimental e por simulação CFD/EnergyPlus de um dispositivo de ventilação / Liliane Fernandes Maciel. – Viçosa, MG, 2016.
xv, 133f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndice.
Orientador: Joyce Correna Carlo.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Ventilação. 2. Arquitetura e clima. 3. Edifícios escolares. 4. Simulação computacional. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo. II. Título.

CDD 22. ed. 697.72

LILIANE FERNANDES MACIEL

BRISE-CHAMINÉ-SOLAR: AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E POR SIMULAÇÃO CFD/ENERGYPLUS DE UM DISPOSITIVO DE VENTILAÇÃO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 31 de março de 2016.

Aldomar Pedrini

Antônio Cleber Gonçalves Tibiriçá

Álvaro Messias Bigonha Tibiriçá
(Coorientador)

Joyce Correna Carlo
(Orientadora)

À minha família.

AGRADECIMENTOS

"And now I know my instincts were not wrong and many things can be done.
I don't believe, now, that I'm dreaming alone." (Time – Angra)

Agradeço a todos que contribuíram com a realização deste trabalho. Em especial:

À professora Joyce Carlo, pela maestria nas orientações; pelo apoio, incentivo e compreensão; pelas oportunidades concedidas; por participar ativamente no meu desenvolvimento como pesquisadora; por me apresentar a banda Angra (CARLO, 2008) e por ser uma pessoa maravilhosa (em todos os sentidos!).

Ao professor Álvaro Tibiriçá, pela solicitude, pela enorme contribuição no desenvolvimento desta pesquisa, pelas conversas instigadoras e esclarecedoras e por me fazer admirar, ainda mais, a engenharia e os métodos numéricos.

Aos demais membros do projeto de pesquisa: professor Antônio Tibiriçá, com quem eu aprendi muito mais do que o conteúdo acadêmico, pela cooperação fundamental neste projeto; professora Luciana Bosco, pela alegria contagiante e pela colaboração; Rogério Villar, pelo excelente trabalho no detalhamento do projeto e pela dedicação à pesquisa; Matheus Oliveira, pelo auxílio nas medições.

Aos membros da banca, Aldomar Pedrini, Antônio Tibiriçá, Álvaro Tibiriçá e Joyce Carlo, pelas valiosas contribuições com esta pesquisa.

À minha família, Mércia, Geraldo, Lis, Marcelo, Gleidson e Juliane, por sempre me auxiliar, incentivar e acreditar em minha capacidade, pelos conselhos e pelo amor que me dá força e segurança para seguir firme em meu caminho.

Aos profissionais da Serralheria da UFV, em especial ao Sr. Silvério, ao Jander, ao Anderson e ao Edmilson pela atenção e empenho na execução do protótipo.

Ao professor Delly, da Engenharia Agrícola, pela gentileza ao emprestar a câmera termográfica. Ao professor Ferraz e à monitora Marica, da Engenharia de Agrimensura, pelo auxílio na caracterização do sombreamento do entorno. Ao técnico Nery, da Engenharia Mecânica, pela solicitude e assistência na instalação dos termopares. Aos funcionários do DAU, em especial, ao Donizete, pela alegria com que me ajudou nas inúmeras vezes que precisei, e ao arquiteto Ernani, pelo interesse nesta pesquisa e pelo auxílio nas medições.

Aos queridos amigos pelas contribuições e por tornar esse período de trabalho mais agradável: Carol, Janaína, Alexandre, Ítalo, Lorena, Sandro, Luiz, Pedro, Juliana, Zoleni e à Chepa, pelo incentivo, pelas risadas, pelas *happy hours* e pelos incontáveis momentos em que me apoiaram emocional e estatisticamente.

Aos colegas do Nemos e do Latecae pelo auxílio nas simulações e pelas produtivas discussões científico-arquitetônicas.

À Eletrobrás pela concessão da bolsa de estudos e pela oportunidade de participar dos trabalhos da R3E e à Fapemig por viabilizar a construção do protótipo, por meio do financiamento do projeto de pesquisa.

"The answer, my friend, is blowin' in the wind
The answer is blowin' in the wind"
Bob Dylan

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS viii
LISTA DE TABELAS x
LISTA DE QUADROS xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS xiii
RESUMO xiv
ABSTRACT xv
1 Introdução 1
1.1.1 Dispositivos de proteção solar 5
1.1.2 Ventilação natural em edificações 8
1.1.3 Justificativa e relevância do tema 9
1.2 Objetivos 11
1.2.1 Objetivo geral 11
1.2.2 Objetivos específicos 11
1.3 Estrutura do trabalho 11
Referências bibliográficas 12
2 Proposta de uma chaminé solar: avaliação paramétrica por simulação predial e por CFD 16
Resumo 16
2.1 Introdução 17
2.2 Objetivo 18
2.3 Chaminés solares 18
2.4 Métodos de simulação 21
2.4.1 Simulação com o programa EnergyPlus 22
2.4.2 Simulação CFD com o programa Ansys CFX 24
2.5 Método 27
2.6 Resultados 34
2.6.1 Simulação das alternativas pelo EnergyPlus 34
2.6.2 Simulação das alternativas por CFD 40

2.6.3 Comparação entre as simulações com o EnergyPlus e com o Ansys CFX 45
2.7 Conclusão 47
Referências bibliográficas 49

3 Simulação CFD comparada com dados experimentais para análise de desempenho de chaminé solar 52
Resumo 52
3.1 Introdução 53
3.2 Objetivo 54
3.3 Simulação CFD 54
3.4 Confiabilidade dos resultados de simulação CFD 57
3.5 Método 59
3.5.1 O brise-chaminé-solar 59
3.5.2 Método de medição 61
3.5.3 Método de simulação CFD 65
3.5.4 Comparação entre os dados medidos e simulados 67
3.5.5 Avaliação do potencial desempenho de chaminés solares por CFD 67
3.6 Resultados 67
3.6.1 Verificação dos termopares 67
3.6.2 Posicionamento do anemômetro e abertura das janelas 68
3.6.3 Análise preliminar do funcionamento da chaminé solar 68
3.6.4 Casos medidos 69
3.6.5 Casos simulados 72
3.6.6 Comparação entre os dados medidos e simulados 73
3.6.7 Desempenho da chaminé solar 74
3.7 Conclusão 75
Referências bibliográficas 76

4 Avaliação do desempenho térmico e luminoso de uma sala de aula com brise-chaminé-solar 79
Resumo 79

4.1 Introdução 80
4.2 Objetivo 81
4.3 Bioclimatologia em salas de aula 81
4.4 Métricas de conforto ambiental 84
4.4.1 Conforto térmico 85
4.4.2 Qualidade do ar no ambiente interno 86
4.4.3 Conforto visual 86
4.5 Método 88
4.5.1 Avaliação do desempenho da chaminé em um ambiente 88
4.6 Resultado 95
4.7 Conclusão 106
Referências Bibliográficas 107

5 Conclusão 111
5.1 Limitações do trabalho 112
5.2 Sugestões para trabalhos futuros 112

Apêndice I: desempenho luminoso de uma sala de aula com brise-chaminé-solar 113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.1 – Consumo somado dos setores residencial e comercial e o consumo industrial brasileiro de 2008 a 2012 2

Figura 2.5.1 – Seção horizontal da proteção solar 28

Figura 2.5.2 – Laboratórios nos quais o brise-chaminé-solar foi instalado 29

Figura 2.5.3 – Brise-chaminé-solar instalado na fachada oeste 29

Figura 2.5.4 – Superfície de sombreamento equivalente ao morro 30

Figura 2.6.1 – Volume de ar movimentado a cada dia (8h às 18h) devido à ação da chaminé solar 35

Figura 2.6.2 – Radiação solar direta incidida no vidro da chaminé solar 36

Figura 2.6.3 – Taxa de fluxo de ar em função da temperatura da placa absorvedora 37

Figura 2.6.4 – Influência das combinações de taxa relativa de fluxo de ar no volume de ar movimentado pela chaminé Alt 07 por dia (8h às 18h) simulada no EnergyPlus 37

Figura 2.6.5 – Comparação entre a taxa de fluxo de ar na saída da chaminé (Alt 07) quando simulada com arquivo climático original e sem vento 40

Figura 2.6.5 – Avaliação da malha da Geometria A 41

Figura 2.6.7 – Avaliação da malha da Geometria C 41

Figura 2.6.6 – Avaliação da malha da Geometria B 42

Figura 2.6.8 – Avaliação da malha da Geometria D 42

Figura 2.6.9 – Esquema das vazões obtidas nas simulações com o Ansys CFX 43

Figura 2.6.10 – Contornos de velocidade do ar da Alt 07 na Condição 05 – fluxo ascendente 44

Figura 2.6.11 – Contornos de velocidade do ar da Alt 07 na Condição 01 – fluxo descendente. 44

Figura 2.6.12 – Contornos de velocidade do ar da Alt 07 na Condição 02 – fluxo descendente. 45

Figura 2.6.13 – Comparação entre a taxa de fluxo de ar na saída da chaminé quando simulada pelo Ansys CFX e pelo EnergyPlus 47

Figura 3.5.1 – Seção horizontal da proteção solar 60

Figura 3.5.2 – Vista geral da chaminé solar (a) e sombreamento gerado (b) 60

Figura 3.5.3 – Abertura utilizada para medições, onde se vê os oito vãos cujos 61

Figura 3.5.4 – Pontos de monitoramento do teste de malha 66

Figura 3.6.1 – Velocidade do ar nos vãos de entrada da chaminé solar 68

Figura 3.6.2 – Período de insolação da chaminé solar 69

Figura 3.6.3 – Temperatura superficial no interior da chaminé solar 70

Figura 3.6.4 – Velocidade do ar sob diferentes refinamentos de malha 73

Figura 3.6.5 – Comparação entre os dados medidos (coluna cinza) e simulados (marcador vermelho) 74

Figura 3.6.6 – Fluxo de ar provocado pela chaminé com diferentes alturas e temperaturas superficiais 75

Figura 4.5.1 – Sala de aula estudada 89

Figura 4.5.2 – Distribuições de chaminés solares ao longo da edificação 90

Figura 4.5.3 – Limites de conforto térmico segundo a norma EN 15251 92

Figura 4.5.4 – Modelos utilizados na simulação com o TropLux 93

Figura 4.5.5 – Características do vidro utilizado na simulação em função do ângulo de incidência da radiação 95

Figura 4.6.1 – Percentual de horas do ano em que a sala de aula sem brise-chaminé-solar encontra-se em conforto, em desconforto por frio e em desconforto por calor .. 96

Figura 4.6.2 – Percentual de horas do ano em que a sala de aula com brise-chaminé-solar (8 elementos com altura de 1 pavimento) encontra-se em conforto, em desconforto por frio e em desconforto por calor 96

Figura 4.6.3 – Percentual de horas do ano em que a sala de aula com brise-chaminé-solar (4 elementos com altura de 2 pavimento) encontra-se em conforto, em desconforto por frio e em desconforto por calor 97

Figura 4.6.4 – Percentual de horas do ano em que a sala de aula com brise-chaminé-solar (3 elementos com altura de 3 pavimento) encontra-se em conforto, em desconforto por frio e em desconforto por calor 97

Figura 4.6.5 – Renovações de ar por hora da sala de aula com brise-chaminé-solar para diferentes temperaturas superficiais da placa absorvedora e do vidro 98

Figura 4.6.6 – Renovações de ar por hora da sala de aula com brise-chaminé-solar com altura de um pavimento para diferentes temperaturas superficiais da placa absorvedora e do vidro 99

Figura 4.6.7 – Renovações de ar por hora da sala de aula com brise-chaminé-solar com altura de dois pavimentos para diferentes temperaturas superficiais da placa absorvedora e do vidro 100

Figura 4.6.8 – Renovações de ar por hora da sala de aula com brise-chaminé-solar com altura de três pavimentos para diferentes temperaturas superficiais da placa absorvedora e do vidro 101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1.1 – Necessidade de ventilação natural em algumas cidades brasileiras.....3

Tabela 1.1.2 – Necessidade de sombreamento em algumas cidades brasileiras 4

Tabela 2.5.1 – Alternativas avaliadas para o projeto da proteção solar.....31

Tabela 2.5.2 – Combinações de taxa relativa de fluxo de ar (TRF) 33

Tabela 2.6.1 – Data e hora em que a temperatura superficial da placa absorvedora apresenta valores de mediana, primeiro e terceiro quartis e percentis 2,5 e 97,5 38

Tabela 2.6.2 – Temperaturas Superficiais Internas da Chaminé Solar (°C).....39

Tabela 3.6.1 – Resultado das medições.....71

Tabela 4.1.1 – Posse média de equipamentos em escolas e faculdades de baixa tensão.....81

Tabela 4.5.1 – Cores e refletâncias dos elementos opacos da sala de aula 94

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.6.1 – Parâmetros medidos e seus respectivos instrumentos 62

Quadro 3.6.2 – Casos medidos e casos correspondentes de controle 64

Quadro 4.6.1 – Isocurvas dos percentuais de horas do ano com UDI (300lx a 2000lx) - janela voltada para norte sob condição de céu encoberto 102

Quadro 4.6.2 – Isocurvas dos percentuais de horas do ano com iluminância acima de 2000lx – janela voltada para norte sob condição de céu encoberto 103

Quadro 4.6.3 – Isocurvas dos percentuais de horas do ano com UDI (300lx a 2000lx) - janela voltada para norte sob condição de céu claro 104

Quadro 4.6.4 – Isocurvas dos percentuais de horas do ano com iluminância acima de 2000lx – janela voltada para norte sob condição de céu claro 105

Quadro A.I.1 – Isocurvas dos percentuais de UDI (300lx a 2000lx) - janela voltada para leste sob condição de céu encoberto 114

Quadro A.I.2 – Isocurvas dos percentuais de iluminância acima de 2000lx - janela voltada para leste sob condição de céu encoberto 115

Quadro A.I.3 – Isocurvas dos percentuais de UDI (300lx a 2000lx) - janela voltada para leste sob condição de céu parcialmente encoberto 116

Quadro A.I.4 – Isocurvas dos percentuais de iluminância acima de 2000lx - janela voltada para leste sob condição de céu parcialmente encoberto 117

Quadro A.I.5 – Isocurvas dos percentuais de UDI (300lx a 2000lx) - janela voltada para leste sob condição de céu claro 118

Quadro A.I.6 – Isocurvas dos percentuais de iluminância acima de 2000lx - janela voltada para leste sob condição de céu claro 119

Quadro A.I.7 – Isocurvas dos percentuais de UDI (300lx a 2000lx) - janela voltada para sul sob condição de céu encoberto 120

Quadro A.I.8 – Isocurvas dos percentuais de iluminância acima de 2000lx - janela voltada para sul sob condição de céu encoberto 121

Quadro A.I.9 – Isocurvas dos percentuais de UDI (300lx a 2000lx) - janela voltada para sul sob condição de céu parcialmente encoberto 122

Quadro A.I.10 – Isocurvas dos percentuais de iluminância acima de 2000lx - janela voltada para sul sob condição de céu parcialmente encoberto 123

Quadro A.I.11 – Isocurvas dos percentuais de UDI (300lx a 2000lx) - janela voltada para sul sob condição de céu claro 124

Quadro A.I.12 – Isocurvas dos percentuais de iluminância acima de 2000lx - janela voltada para sul sob condição de céu claro 125

Quadro A.I.13 – Isocurvas dos percentuais de UDI (300lx a 2000lx) - janela voltada para oeste sob condição de céu encoberto 126

Quadro A.I.14 – Isocurvas dos percentuais de iluminância acima de 2000lx - janela voltada para oeste sob condição de céu encoberto 127

Quadro A.I.15 – Isocurvas dos percentuais de UDI (300lx a 2000lx) - janela voltada para oeste sob condição de céu parcialmente encoberto 128

Quadro A.I.16 – Isocurvas dos percentuais de iluminância acima de 2000lx - janela voltada para oeste sob condição de céu parcialmente encoberto 129

Quadro A.I.17 – Isocurvas dos percentuais de UDI (300lx a 2000lx) - janela voltada para oeste sob condição de céu claro 130

Quadro A.I.18 – Isocurvas dos percentuais de iluminância acima de 2000lx – janela voltada para oeste sob condição de céu claro.....131

Quadro A.I.19 – Isocurvas dos percentuais de UDI (300lx a 2000lx) - janela voltada para norte sob condição de céu parcialmente encoberto 132

Quadro A.I.20 – Isocurvas dos percentuais de iluminância acima de 2000lx – janela voltada para norte sob condição de céu parcialmente encoberto.....133

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Alt – Alternativa de projeto

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating & Air-Conditioning Engineers

CEN – Comité Européen de Normalisation

CFD – Computational Fluid Dynamics

CFS – Complex Fenestration Systems

CIE – Commission Internacionale de L'Eclairage

Cz – Coeficiente de descarga

EUA – Estados Unidos da América

K – Coeficiente de perda

PCM – Phase Change Material

PMV – Predicted Mean Vote

PPD – Predicted Percentage of Dissatisfied

RANS - Reynolds Averaged Navier-Stokes

RTQ-R - Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais

TMY – Typical Meteorological Year

TRF – Taxa Relativa de Fluxo de Ar

TRY – Test Reference Year

UDI – Useful Daylight Illuminances

ZB – Zona Bioclimática

RESUMO

MACIEL, Liliane Fernandes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2016. **Brise-chaminé-solar: avaliação experimental e por simulação CFD/EnergyPlus de um dispositivo de ventilação.** Orientadora: Joyce Correna Carlo. Coorientador: Álvaro Messias Bigonha Tibiriçá.

Dentre os múltiplos critérios a serem considerados na concepção do projeto de escolas, destaca-se o conforto ambiental por apresentar relação direta na eficácia do processo educativo. Esta pesquisa trata do desenvolvimento de um elemento arquitetônico e da avaliação de seu potencial de utilização em salas de aula. O objetivo deste trabalho consiste em conceber e avaliar o desempenho de um brise-chaminé-solar. Investigou-se o potencial de utilização de proteções solares sob a forma de chaminés solares para promover a ventilação natural. Soluções projetuais foram avaliadas parametricamente por meio de dois pacotes comerciais de simulação computacional, cujas potencialidades e fragilidades foram discutidas. Os resultados deste estudo constatam que os programas de simulação predial e de CFD (Dinâmica de Fluidos Computacional) apresentaram discrepâncias relevantes, de modo que se torna arriscada a tomada decisões projetuais com base em resultados de simulação não validados. Em seguida, discutiu-se de forma mais aprofundada a simulação CFD, incluindo os métodos de modelagem, medição *in loco*, e os desafios pertinentes à validação dos resultados obtidos com ferramentas de simulação CFD. Os dados reais indicaram que os resultados da simulação CFD foram válidos. Ressalta-se a importância da realização de testes para calibração. Por fim, avaliou-se o desempenho térmico e luminoso de uma sala de aula com brise-chaminé-solar. Identificou-se que o dispositivo foi capaz de reduzir a temperatura operativa da sala de aula, alterando os percentuais de horas em conforto térmico. Com relação à renovação de ar, o brise-chaminé-solar alcançou as taxas recomendadas para a qualidade do ar interior. O brise-chaminé-solar apresentou, ainda, capacidade de reduzir os níveis de desconforto por excesso de iluminação em salas de aula, especialmente sob condições de céu encoberto.

ABSTRACT

MACIEL, Liliane Fernandes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2016. **Shading-solar-chimney: experimental evaluation and by CFD/EnergyPlus simulation of a ventilation device**. Adviser: Joyce Correna Carlo. Co-adviser: Álvaro Messias Bigonha Tibiriçá.

Among the multiple criteria to be considered during the design of scholar buildings, the environmental comfort can be highlighted because of its straight relation with the efficacy of the learning process. This research considers the development of an architectural element and evaluates its potential to be used in classrooms. This study aims to design and evaluate the performance of a shading-solar-chimney. It was investigated the potential use of shading devices under the shape of a solar chimney to promoting natural ventilation. Design solutions were parametrically evaluated using two commercial simulation software, for whose the strengths and weakness were discussed. The results showed that building simulation and CFD (Computational Fluid Dynamics) presented relevant discrepancies, in a way that the design decision based on non-validated simulation results might be risky. In addition, the CFD simulation was discussed in a deeper way, including the modeling methods, in loco measurements, challenges about the validation of the results achieved by CFD simulation tools. The measured data indicated that the CFD results are valid. It is emphasized the importance of the calibration tests. Finally, the thermal and lighting performance of a classroom with the shading-solar-chimney was evaluated. It was identified that the shading-solar-chimney was able to reduce the classroom operative temperature and it changed the percentage of hours in thermal comfort. About the air changes, the shading-solar-chimney achieved the recommended rates to interior air quality. The shading-solar-chimney was, also, able to reduce the levels of discomfort by glare in classrooms, especially under overcast sky.

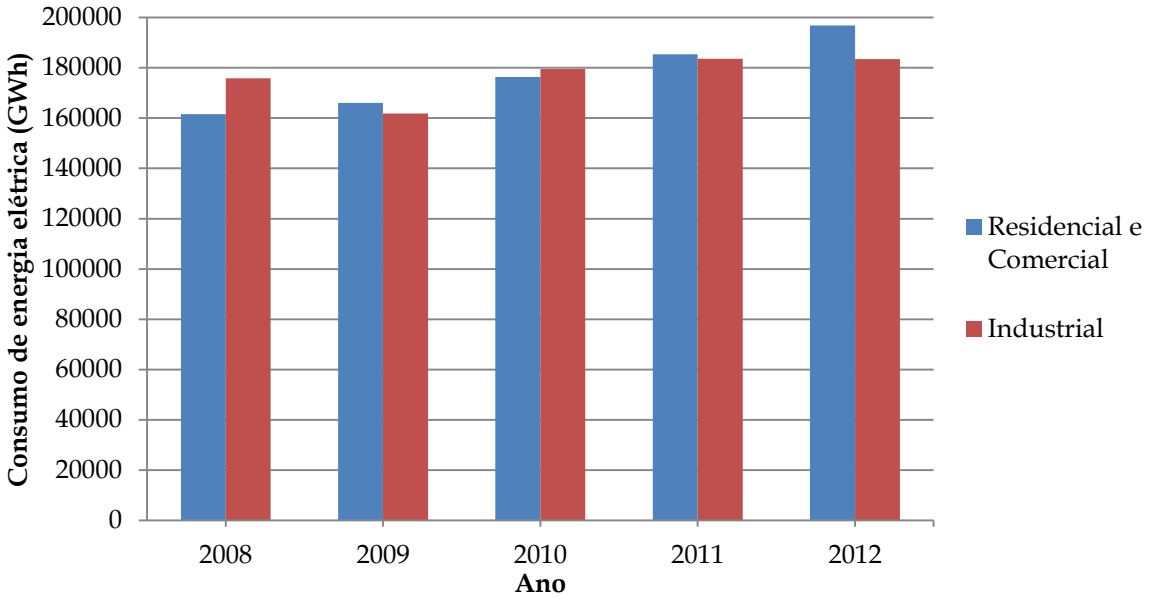
CAPÍTULO I

1 Introdução

O consumo eficiente de energia em edificações tem ganhado importância nas políticas energéticas brasileiras desde o início do século XXI. A Lei 10.295 (BRASIL, 2001) reiterou a necessidade de gerar mecanismos de avaliação de eficiência energética de equipamentos e edificações e criou meios para a inclusão de edificações comerciais de serviços e públicas (BRASIL, 2010) e residenciais (BRASIL, 2012) no Programa Brasileiro de Etiquetagem do Inmetro.

Em 2012, o setor comercial de edificações foi responsável pelo consumo de 17,7% do total de energia elétrica utilizada no Brasil, enquanto o setor residencial consumiu 26,3% do consumo total (BRASIL, 2013). Observa-se que esses setores juntos já superam o consumo energético industrial brasileiro (Figura 1.1.1).

Figura 1.1.1 – Consumo somado dos setores residencial e comercial e o consumo industrial brasileiro de 2008 a 2012



Fonte: elaborado a partir de dados extraídos de Brasil (2013)

O setor educacional brasileiro não entrou na lista dos 10 setores comerciais de maior consumo energético em 2012 (BRASIL, 2013)[1]. Apesar desse consumo relativamente baixo, a melhoria da eficiência energética das instalações foi colocada entre as prioridades por 64,4% das instituições de ensino superior e por 73,3% das instituições de ensino fundamental entrevistadas na Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso (Ano Base 2005), que investigou edificações de alta tensão (BRASIL, 2008).

Diante desse cenário, o condicionamento térmico passivo representa uma potencial contribuição na redução do consumo de energia de edificações. Embora o Brasil apresente uma grande diversidade climática devido à sua extensão territorial que abrange áreas tropicais e subtropicais, ele é um país onde as condições de

[1] Os 10 setores comerciais brasileiros que mais consomem energia são: Comércio Varejista; Comércio por Atacado, Exceto Veículos Automotores e Motocicletas; Alimentação; Telecomunicações; Atividades de Serviços Financeiros; Serviços para Edifícios e Atividades Paisagísticas; Atividades de Atenção à Saúde Humana; Alojamento; Outras Atividades de Serviços Pessoais e Atividades de Organizações Associativas.

conforto ambiental podem ser alcançadas por meio de estratégias passivas num elevado percentual de horas do ano.

Dentre as estratégias apresentadas na carta bioclimática (GIVONI, 1992), destaca-se o uso de ventilação natural. Trata-se de uma recomendação que deve ser avaliada considerando-se as características do local e da edificação, tais como os níveis de poluentes, a carga térmica e a ocupação dos ambientes. Em condições normais, Lamberts, Dutra e Pereira (2014) mostram o percentual de horas nas quais a ventilação natural é a estratégia bioclimática mais importante para as cidades brasileiras que possuem dados climáticos no formato TRY (Tabela 1.1.1). Observa-se que para a maioria das cidades que constam na tabela, a ventilação natural é desejável em um elevado percentual de horas do ano e/ou do período de verão, com destaque para Belém e São Luís, com 88,8% e 86,7% das horas do ano.

Tabela 1.1.1 – Necessidade de ventilação natural em algumas cidades brasileiras

Cidade	Latitude	Necessidade de ventilação natural (% das horas do ano)	Necessidade de ventilação natural (% das horas de verão)
Belém	01°22′ S	88,8	93,1
Brasília	15°51′ S	17,3	36,3
Curitiba	25°30′ S	6,84	19,9
Florianópolis	27°39′ S	36,4	77,1
Fortaleza	03°46′ S	85,8	92,3
Maceió	09°30′ S	76,4	84,9
Natal	05°54′ S	84,2	88,7
Porto Alegre	30°00′ S	23,3	59,0
Recife	08°00′ S	67,8	76,2
Rio de Janeiro	22°49′ S	60,9	78,0
Salvador	12°45′ S	57,9	80,6
São Luís	02°34′ S	86,7	86,5
São Paulo	23°36′ S	14,3	45,2
Vitória	20°15′ S	60,9	87,4

Fonte: Lamberts, Dutra e Pereira (2014)

Uma estratégia adicional e também relevante é o sombreamento de aberturas, como o uso de proteções solares para controle da radiação solar. Pereira e Souza (2008) apresentam um método para determinação da necessidade do uso de proteção solar em aberturas em função de temperaturas neutras mensais e de limites de aceitação de radiação solar incidente em aberturas. Pereira e Souza (2008) afirmam

que a incidência da radiação solar direta é indesejável em edificações comerciais em horários do dia em que ocorra alta temperatura coincidente com alta incidência de radiação solar quando a área de abertura transparente à radiação solar for inferior a 25% da área do piso. Já em ambientes onde a área de abertura supere 25% da área do piso, a incidência solar direta é indesejável quando a temperatura estiver alta ou quando houver alta incidência de radiação, mesmo que essas situações não sejam coincidentes[2].

Analogamente à Tabela 1.1.1, a Tabela 1.1.2 apresenta o percentual de horas do ano em que o sombreamento é uma estratégia recomendada para algumas cidades brasileiras. Observa-se que, com exceção de Curitiba, São Paulo e Porto Alegre, há necessidade de sombreamento em todas as cidades analisadas na maior parte do ano. Destaca-se que o sombreamento é necessário durante 100% do tempo em algumas cidades do Norte e Nordeste do país.

Tabela 1.1.2 – Necessidade de sombreamento em algumas cidades brasileiras

Cidade	Latitude	Necessidade de sombreamento (% das horas do ano)
Belém	01°22′ S	100,0
Brasília	15°51′ S	54,5
Curitiba	25°30′ S	23,2
Florianópolis	27°39′ S	56,7
Fortaleza	03°46′ S	100,0
Maceió	09°30′ S	94,6
Natal	05°54′ S	99,4
Porto Alegre	30°00′ S	45,3
Recife	08°00′ S	99,9
Rio de Janeiro	22°49′ S	84,7
Salvador	12°45′ S	96,9
São Luís	02°34′ S	100,0
São Paulo	23°36′ S	36,6
Vitória	20°15′ S	80,6

Fonte: elaborado pela autora

[2] Para edificações comerciais, Pereira e Souza (2008) consideram temperatura alta quando $T_{ar}>T_n+2°C$. Já a radiação solar é considerada alta quando I_g é superior a 500W/m² para aberturas inferiores a 25% da área do piso, ou I_g é superior a 600W/m² quando a área de abertura é superior a 25% da área do piso. T_{ar} é a temperatura do ar média mensal horária (°C), T_n é a temperatura neutra (°C) e I_g é a radiação solar global incidente sobre a fachada (W/m²). A temperatura neutra é definida por $T_n=0,31T_e+17,6°C$, sendo T_e, a temperatura média mensal do ar (°C) extraída das Normais Climatológicas.

No caso da cidade de Viçosa-MG (latitude: 20,77° Sul, longitude: 42,87° Oeste, altitude: 712,2 m), local de realização do presente estudo, Guimarães e Carlo (2011) identificaram que há disponibilidade de ventos satisfatória nos momentos em que a estratégia da ventilação natural é necessária. Quando se analisa o arquivo climático TMY da cidade de Viçosa durante o ano todo, a ventilação é necessária em 14,0% das horas do ano e o sombreamento é necessário em 47,5%. Quando a análise é feita somente para o verão, a necessidade de ventilação ocorre em 27,5% das horas e a necessidade de sombreamento chega em 64%.

Apesar desse potencial de utilização das estratégias bioclimáticas, que são indicadas para edificações residenciais unifamiliares, observa-se que grande parte do estoque de edificações comerciais e públicas em uso no país adota sistemas artificiais de condicionamento de ar. O uso final de energia para condicionamento de ar chega a 47% do total de energia consumida em edificações comerciais de alta tensão e a 48% em edificações públicas (BRASIL, 2007).

Além da eficiência energética, com vistas à redução do uso de condicionamento artificial, a ventilação natural tem o potencial de aumentar a satisfação dos usuários no que se refere à melhoria da qualidade do ar interno, ao mesmo tempo em que dá ao usuário maior controle com o uso de aberturas operáveis manualmente (COOK; YANG; CROPPER, 2011). Esse controle muitas vezes não é possível nos sistemas centrais de condicionamento artificial.

Por sua vez, a utilização de dispositivos de proteção solar também traz benefícios aos usuários como controle da iluminação, conforto visual, vistas e privacidade, além da economia de energia na promoção do conforto térmico (O´BRIEN; KAPSIS; ATHIENITIS, 2013).

1.1.1 Dispositivos de proteção solar

Os dispositivos de proteção solar são elementos construtivos utilizados em edificações para impedir que a radiação solar direta atinja os ambientes internos e, consequentemente, para atuar no controle e redução do ganho de calor solar da edificação. Em decorrência, há uma redução no consumo de energia para resfriamento. A proteção solar é parte de um sistema de abertura composto pelo vão,

pela janela (esquadria que define seu modo de abrir mais a superfície transparente, geralmente envidraçada) e pelo elemento de sombreamento.

Quando esses dispositivos são constituídos de lâminas (geralmente paralelas) externas à edificação são chamados de *brise-soleil*. Além da função primordial de proteção da radiação direta, os *brises* também são utilizados no controle do excesso de luminosidade, característico de regiões de clima quente. As proteções solares também influenciam na visibilidade para o exterior e na ventilação da edificação (GUTIERREZ; LABAKI, 2005). Olbina (2008) afirma que os dispositivos de proteção solar podem gerar os seguintes benefícios: proteger da radiação solar direta, evitar o superaquecimento, evitar o ofuscamento, melhorar os níveis de iluminação natural, promover a privacidade e lidar com a questão da vista para o exterior.

Devido à tendência arquitetônica de se usar fachadas envidraçadas em edifícios comerciais, o gerenciamento dos ganhos solares é uma consideração importante no projeto de edifícios eficientes energeticamente. De acordo com Lomanowski e Wright (2012), os ganhos solares através da janela representam a maior e mais variável fonte de calor de um edifício. Nesse sentido, o uso apropriado de dispositivos de proteção solar representa uma economia no consumo de energia para resfriamento. Segundo eles, elementos móveis podem equilibrar o balanço entre os ganhos solares e as condições de ofuscamento e de aproveitamento da luz diurna. O controle dos ganhos solares não é necessário apenas nos edifícios envidraçados e com isolamento térmico ineficiente, mas são também fundamentais no projeto de novos edifícios comerciais e residenciais energeticamente eficientes.

O uso de proteções solares em climas quentes gera melhorias no desempenho termoenergético de edificações, pois impede a incidência de radiação solar direta e evita o consequente aquecimento do ambiente. Além dessa função primordial, Gutierrez e Labaki (2005) apresentam também funções secundárias dos *brises* como o controle do excesso de luminosidade, característico de regiões de clima quente e afirmam que esses elementos também influenciam em aspectos como a visibilidade para o exterior e a ventilação da edificação. No entanto, esses dispositivos podem tornar-se obstruções à luz natural, o que pode acarretar o aumento do uso de energia para iluminação artificial. Dessa forma, é preciso avaliar o balanço entre a carga

térmica e a disponibilidade de luz natural em um ambiente que adote dispositivos de proteção solar (FERREIRA; SOUZA, 2010).

Nesse sentido, Oteiza e Soler (1995) compararam o desempenho de iluminação em diferentes dispositivos de proteção solar que geram a mesma máscara de sombra e identificaram que o modelo com prateleiras de luz apresentou um desempenho superior, tanto em termos de uniformidade quanto em níveis de iluminância. Preocupados com o desempenho da iluminação natural quando dispositivos de sombreamento são utilizados, Olbina e Beliveau (2009) propuseram um sistema de proteção solar translúcido. Utilizando os princípios óticos, eles desenvolveram dispositivos móveis e automaticamente controlados, que são formados por aletas de seção triangular de plástico translúcido e revestimento refletivo prateado.

Ainda com relação ao papel das proteções solares, Laouadi (2009) afirma que sistemas complexos de aberturas, do inglês *complex fenestration systems* (CFS), são componentes típicos dos edifícios de alto desempenho. Segundo ele, CFS incluem dispositivos de sombreamento integrados entre camadas de vidro, ou anexos ao interior ou exterior de fachadas envidraçadas. Esses sistemas contribuem no controle da iluminação natural, dos ganhos de calor solar e da visão do exterior, e podem conter elementos fotovoltaicos embutidos nas camadas de vidro para produzir energia no local. Entretanto, de acordo com o autor, a previsão do desempenho térmico desses sistemas ainda encontra-se em estágio inicial.

A análise do desempenho energético de sistemas de abertura que considera os fenômenos térmicos e luminosos já apresenta uma grande complexidade, que acaba por excluir um fator adicional: frequentemente aspectos relacionados à ventilação são negligenciados. Devido a essa complexidade, a simulação computacional do desempenho de edificações tem sido uma ferramenta valiosa para quantificar o potencial benefício de proteções solares e para auxiliar no projeto das mesmas. O uso de proteções solares deve ser planejado tendo em vista que as decisões projetuais implicam em uma série de consequências que não se restringem às condições de conforto térmico e à incidência de radiação. Essas consequências se relacionam também com outros aspectos como níveis de iluminação natural, consumo de energia, privacidade, visão do exterior e ventilação natural.

1.1.2 Ventilação natural em edificações

Considerando-se a necessidade de reduzir o consumo de energia de edificações, observa-se uma tendência em se utilizar a ventilação natural em edificações localizadas em diferentes climas e regiões geográficas (EMMERICH, 2006; GADO; OSMAN, 2010; LIPING; HIEN, 2007).

Os sistemas de ventilação natural têm sido cada vez mais aplicados nos edifícios comerciais europeus. Além disso, o interesse na aplicação desses sistemas nos Estados Unidos da América (EUA) também tem crescido, uma vez que contribuem na redução do consumo de energia das edificações (EMMERICH, 2006). Entretanto, o potencial de utilização exclusiva da ventilação natural nos edifícios nos EUA é limitado a poucas regiões, embora Emmerich (2006) mostre que nas demais localidades o uso combinado de ventilação natural e condicionamento de ar já representa economias significativas de energia.

A arquitetura de uma vila tradicional do deserto do Saara (clima quente e seco) chamada El-Qasr, no Egito, também faz uso da ventilação natural para atingir o conforto térmico de forma energeticamente eficiente (GADO; OSMAN, 2010), onde os sistemas de aberturas desempenham um papel importante na condução da ventilação natural e nos fluxos de ar dentro dos edifícios. Gado e Osman (2010) afirmam que, para obter melhores resultados, o tamanho, a posição e o número de aberturas devem ser planejados para melhorar a distribuição do ar, aumentar a velocidade e induzir a ventilação cruzada através dos ambientes internos. A velocidade do ar e a ventilação cruzada podem ser trabalhadas utilizando aberturas de saída maiores que de entrada, o que aumenta a diferença de pressão entre os espaços. Já a distribuição do ar interno pode ser melhorada utilizando duas ou mais saídas para cada entrada de ar.

Com relação aos climas quentes e úmidos, Liping e Hien (2007) analisaram arquivos climáticos de Singapura e concluíram que é possível alcançar conforto térmico em um elevado número de horas do ano para edificações residenciais usando apenas ventilação natural e um projeto de fachada adequado[3]. Para melhorar as condições durante o percentual de horas que as edificações ficaram fora da zona

[3] As fontes de calor internas foram desprezadas nessa análise.

de conforto, os autores indicaram duas estratégias: aumentar a velocidade do ar (acima de 1m/s) e fazer uso de outras soluções projetuais, como a especificação de materiais, o uso de dispositivos de proteção solar ou ventilação mecânica. Com tais estratégias, Liping e Hieng (2007) mostraram que a temperatura interna pode ser reduzida em 2°C a 3°C em comparação com a temperatura externa.

O uso de chaminés solares como sistema passivo de ventilação de edificações tem aumentado devido à sua eficácia e à sua relação amigável com o meio ambiente (KHANAL; LEI, 2014). Considerando o potencial desse sistema de ventilação natural, várias configurações geométricas foram desenvolvidas. Zhai, Song e Wang (2011) apresentam as principais configurações de chaminés solares isoladas ou integradas a outras tecnologias. Segundo eles, as chaminés solares podem ser verticais ou inclinadas e se agrupam em duas famílias: coletores de radiação solar de parede e coletores de radiação solar de cobertura (ZHAI; SONG; WANG, 2011).

Nesse sentido, tornam-se oportunos estudos que busquem associar a ventilação natural, por meio do uso de chaminés solares, à já consolidada prática de sombreamento das aberturas em edifícios brasileiros.

1.1.3 Justificativa e relevância do tema

Mueller (2007) afirma que existe uma quantidade preocupante de escolas[4] cujas condições físicas não são adequadas para a realização das atividades básicas a que se propõem. Dentre os múltiplos critérios a serem considerados na concepção do projeto de escolas, Paes e Bastos (2014) destacam o conforto ambiental (higrotérmico, visual e auditivo) por apresentar relação direta na eficácia do processo educativo.

Nesse sentido, o desenvolvimento de um sistema de abertura, que integre dispositivos de proteção solar à ventilação natural pode contribuir para a promoção de conforto higrotérmico em condições de uso e ocupação típicos de salas de aulas. Igualmente, o uso de sistemas de abertura que promovam a ventilação natural é um mecanismo eficiente do ponto de vista do consumo de energia.

[4] Entende-se por escolas "quaisquer instituições públicas ou particulares que tenham como objetivo principal oferecer educação ao público que assim o demanda (do ensino básico ao superior)" (MUELLER, 2007, p.04).

As diretrizes advindas desta pesquisa poderão subsidiar a criação de outros dispositivos de proteção solar. Assim, esta pesquisa contribui também no processo de concepção de proteções solares e na avaliação do seu desempenho integrado à arquitetura. O desempenho do sistema de abertura influencia o desempenho do edifício e é dependente de características gerais do ambiente como área, padrões de uso e ocupação. Para exemplificar, um mesmo sistema de abertura pode apresentar um desempenho excelente em um ambiente amplo e utilizado por poucas pessoas e, ao mesmo tempo, ser inadequado a um ambiente com uma ocupação mais densa.

Situação, como a exemplificada, requer aprofundamento de estudos de avaliação da ventilação natural, como também é o caso de ambientes de ensino com dimensões e padrões de uso conhecidos. Observa-se, na literatura, que a análise de desempenho da ventilação natural pode ser feita por parâmetros diretamente relacionados à ventilação, como taxa de fluxo de ar, velocidade do ar e distribuição interna dos fluxos de ar (ASFOUR; GADI, 2007; AL-KAYIEM; SREEJAYA; GILANI, 2014; KASAEIAN; GHALAMCHI; GHALAMCHI, 2014; YUSOFF *et al*., 2010) ou por parâmetros que consideram a ventilação associada a outros fatores, como é o caso da avaliação para conforto higrotérmico (COOK; YANG; CROPPER, 2011; VECCHI; CÂNDIDO; LAMBERTS, 2013).

A avaliação de desempenho da ventilação natural deve considerar que em climas quentes, como a maior parte do clima brasileiro, o uso de sistemas de abertura que contêm proteções solares é uma prática recorrente. Entretanto, a prática projetual que considera esse uso como barreira ou elemento de canalização da ventilação para o interior do edifício é rara: seu projeto é baseado em cartas solares e a ventilação é participante apenas na orientação do vão.

Diante dessa situação, apresenta-se a seguinte questão de pesquisa: de que maneira um dispositivo pode ser integrado à arquitetura para promover sombreamento, ventilação natural e renovação de ar de ambientes internos?

Nesse sentido, esta pesquisa considera o contexto de ambientes de salas de aulas para o desenvolvimento de um brise-chaminé-solar. O modo de concepção e desenvolvimento propostos para o produto transcende a concepção tradicional de uma proteção solar ao integrar a análise da ventilação natural.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Conceber um produto arquitetônico que integre as funções de brise e chaminé solar e avaliar a sua influência no desempenho ambiental.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar o potencial desempenho de chaminés solares e suas variações geométricas na indução da ventilação e avaliar comparativamente as potencialidades e limitações dos programas de computador utilizados para avaliação de desempenho;
- Investigar o potencial de ventilação num protótipo em escala real e verificar as diferenças com relação à sua modelagem em CFD (*Computational Fluid Dynamics*);
- Investigar o desempenho térmico e luminoso de ambientes com brise-chaminé-solar frente aos aspectos analisados para espaços educacionais, com o apoio de programas de simulação térmica predial e luminosa.

1.3 Estrutura do trabalho

Esta dissertação foi estruturada em cinco capítulos, sendo três em formato de artigo.

O primeiro capítulo consiste na caracterização e introdução do trabalho, o que inclui os objetivos, a justificativa e a relevância do tema.

O Capítulo II é um artigo que investiga o potencial de utilização de proteções solares sob a forma de chaminés solares para promover a ventilação natural e que aborda o desenvolvimento do projeto de uma proteção solar para ambientes de ensino, dando-se ênfase à ventilação natural. Soluções projetuais foram avaliadas parametricamente por meio de dois programas comerciais de simulação computacional, cujas potencialidades e fragilidades foram discutidas.

O Capítulo III é um artigo que aborda de forma mais aprofundada a simulação CFD, incluindo os métodos de modelagem, medição *in loco*, e os desafios pertinentes à validação dos resultados obtidos com ferramentas de simulação CFD. Inclui ainda uma análise do desempenho da chaminé solar com diferentes alturas.

O Capítulo IV é um artigo que tem como foco a avaliação do desempenho térmico e luminoso do ambiente que contém o dispositivo de proteção solar.

Por fim, o Capítulo V apresenta as conclusões alcançadas por meio deste estudo e indica sugestões para trabalhos futuros.

Referências bibliográficas

AL-KAYIEM, H. H.; SREEJAYA, K. V.; GILANI, S. I. U. Mathematical analysis of the influence of the chimney height and collector area on the performance of a roof top solar chimney. **Energy and Buildings**, v.68, parte A, p. 305-311, jan. 2014.

ASFOUR, O. S.; GADI, M. B. Using CFD to investigate characteristics of domes as wind-inducing devices in buildings. **International Journal of Green Energy**, v. 4, n. 6, p. 571-588, nov. 2007.

BRASIL. Lei n° 10.295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências**. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Legislativo, Brasília, DF, 18 out. 2001. Seção 1, p. 01.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Eletrobrás. **Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil:** Sumário Executivo (Ano-Base 2005). Rio de Janeiro, 2007. 77 p. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/services/procel-info/Simuladores/DownloadSimulator.asp?DocumentID=%7B2FC65B57-33B1-47F7-AB3A-E44B1A18DF5D%7D&ServiceInstUID=%7B5E202C83-F05D-4280-9004-3D59B20BEA4F%7D>. Acesso em: 18 jul. 2014.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Eletrobrás. **Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso (Ano-Base 2005):** Classe Comercial Alta Tensão: Relatório Setorial: Instituições de Ensino. Rio de Janeiro, 2008. 13 p. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/data/Pages/LUMIS2C33E0C2PTBRIE.htm>. Acesso em: 18 jul. 2014.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário estatístico de energia elétrica 2013**. Rio de Janeiro, 2013. 251 p. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Forms/Anurio.aspx>. Acesso em: 16 jul. 2014.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. Portaria nº 372, de 17 de setembro de 2010. Aprova a revisão dos Requisitos Técnicos da Qualidade para o

Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 22 set. 2010. Seção 1, p. 68. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/detalhe.asp?seq_classe=1&seq_ato=1599>. Acesso em: 24 set. 2014.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. Portaria nº 18, de 16 de janeiro de 2012. Aprova a revisão dos Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 17 jan. 2012. Seção 1, p. 54. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/detalhe.asp?seq_classe=1&seq_ato=1788>. Acesso em: 24 set. 2014.

COOK, M.; YANG, T.; CROPPER, P. Thermal comfort in naturally ventilated classrooms: application of coupled simulation models. In: CONFERENCE OF INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION, 12. **Anais…** Sidnei: IBPSA, 2011.

EMMERICH, S. J. Simulated Performance of Natural and Hybrid Ventilation Systems in an Office Building. **HVAC&R Research**, London, v. 12, n. 4, p. 975-1004, out. 2006.

FERREIRA, C. C.; SOUZA, R. V. G. Avaliação dos impactos dos brises no conforto térmico e luminoso conforme as recomendações do RTQ-C: estudo de Tribunal de Justiça de Minas Gerais. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 13. **Anais...** Canela: ANTAC, 2010.

GADO, T.; OSMAN, M. Investigating traditional natural ventilation methods used in El-Dakhla Oasis, old village. **Intelligent Buildings International**, London, v.2, n.4, p. 267-285, dez. 2010.

GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. **Energy and Buildings**, v.18, n.1, p. 11-23, 1992.

GUIMARÃES, I. B. B.; CARLO, J. C. Caracterização bioclimática da cidade de Viçosa-MG. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11.; ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7., 2011, Búzios. **Anais...** Búzios: Antac, 2011. p. 01-10.

GUTIERREZ, G. C. R.; LABAKI, L. C. Considerações sobre o brise-soleil na Arquitetura Moderna brasileira. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO

AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2005. p. 874-881.

KHANAL, R.; LEI, C. A scaling investigation of the laminar convective flow in a solar chimney for natural ventilation. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v.45, n. 1, p. 98-108, fev. 2014.

KASAEIAN, A.; GHALAMCHI, M.; GHALAMCHI, M. Simulation and optimization of geometric parameters of a solar chimney in Tehran. **Energy Conversion and Management**, v.83, n. 1, p. 28-34, jul. 2014.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: [s. n.], 2014. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/apostilas/eficiencia_energetica_na_arquitetura.pdf>. Acesso em: 09 jun. 2014.

LAOUADI, A. Thermal performance modelling of complex fenestration systems. **Journal of Building Performance Simulation**, London, UK, v.2, n.3, p. 189-207. 2009.

LIPING, W.; HIEN, W. N. Applying natural ventilation for thermal comfort in residential buildings in Singapore. **Architectural Science Review**, Londres, v. 50, n.3, p.224-233, set. 2007.

LOMANOWSKI, B. A.; WRIGHT, J. L. The complex fenestration construction: a pratical approach for modeling windows with shading devices in ESP-r. **Journal of Building Performance Simulation**, London, UK, v.5, n.3, p. 185-198. 2012.

MUELLER, C. M. **Espaços de ensino-aprendizagem com qualidade ambiental: o processo metodológico para elaboração de um anteprojeto**. 2007. 258 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2007.

O'BRIEN, W.; KAPSIS, K.; ATHIENITIS, A. K. Manually-operated window shade patterns in office buildings: a critical review. **Building and Environment**, v.60, n. 1, p. 319-338, fev. 2013.

OLBINA, S. J. Windows: Shading Devices. **Encyclopedia of Energy Engineering and Technology**, New York, p. 1641-1648. 2008.

OLBINA, S.; BELIVEAU, Y. Developing a transparent shading device as a daylighting system. **Building Research & Information**, London, UK, v.37, n.2, p. 148-163. 2009.

OTEIZA, P.; SOLER, A. A comparison of the daylighting performance of different shading devices giving the same solar protection. **Architectural Science Review**, London, UK, v.38, n.4, p. 171-176, 1995.

PAES, R. F. S.; BASTOS, L. E. G. Qualidade ambiental na edificação: o caso das escolas públicas da cidade do Rio de Janeiro. **Paranoá**, Brasília, v.01, n. 12, p. 131-140, 2014.

PEREIRA, I. M.; SOUZA, R. V. G. Proteção Solar em Edificações Residenciais e Comerciais – Desenvolvimento de Metodologia. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 12., 2008, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ANTAC, 2008. p. 1-10.

VECCHI, R.; CÂNDIDO, C.; LAMBERTS, R. O efeito da utilização de ventiladores de teto no conforto térmico em salas de aulas com condicionamento híbrido em um local de clima quente e úmido. **Ambiente Construído**, v.13, n. 4, p. 189-202, jul./set. 2013.

YUSOFF, W. F. M.; SALLEH, E.; ADAM, N. M.; SAPIAN, A. R.; SULAIMAN, M. Y. Enhancement of stack ventilation in hot and humid climate using a combination of roof solar collector and vertical stack. **Building and Environment**, v.45, n. 10, p. 2296-2308, out. 2010.

ZHAI, X. Q.; SONG, Z. P.; WANG, R. Z. A review for the applications of solar chimneys in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.15, n. 8, p. 3757-3767, out. 2011.

CAPÍTULO II

2 Proposta de uma chaminé solar: avaliação paramétrica por simulação predial e por CFD

Resumo

A chaminé solar consiste em uma estratégia construtiva que utiliza a radiação solar para induzir e aumentar a ventilação natural em edificações. Trata-se de um duto vertical ou inclinado para passagem de ar, no qual há uma parede envidraçada e outra de alta absortância solar térmica, sendo o fluxo induzido por uma força motora gerada em função do aquecimento do ar e a consequente diminuição da sua densidade. O objetivo deste artigo consiste em investigar opções projetuais de um protótipo de proteção solar com chaminé térmica a ser construído em escala real e identificar as potencialidades e limitações da simulação predial e dos modelos de fluidodinâmica computacional. Essas investigações indicaram que, embora as simulações CFD (*Computational Fluid Dynamics*) apresentem um rigor maior do que os modelos empíricos no sentido de reproduzir os fenômenos físicos, a limitação do tempo para execução do protótipo inviabilizou sua adoção. Dessa forma, a elaboração do projeto executivo a partir da avaliação das alternativas de projeto foi realizada por meio do modelo de chaminé térmica do EnergyPlus. Após a definição do projeto executivo, as alternativas de projeto puderam ser avaliadas pelo Ansys CFX, que identificou algumas discrepâncias em comparação com os resultados do EnergyPlus.

2.1 Introdução

A ventilação natural é uma estratégia recomendada, em diferentes níveis, para habitações unifamiliares de interesse social na maior parte do território brasileiro. A parte 3 da NBR 15220 (ABNT, 2003) recomenda ventilação cruzada para as Zonas Bioclimáticas (ZB) 02, 03, 05 e 08 e ventilação seletiva para as ZB 04, 06 e 07. Entretanto, Bastos, Barroso-Krause e Beck (2007), ao sobreporem o mapa de zoneamento bioclimático brasileiro ao mapa de disponibilidade eólica, perceberam que a disponibilidade de ventos pode não ser suficiente em algumas áreas onde a ventilação natural é recomendada. Nesse caso, após a identificação da Zona Bioclimática, o arquiteto deve observar o zoneamento eólico do local onde o seu projeto se insere (BRASIL, 2005).

Com relação às áreas urbanizadas, onde os obstáculos reduzem a velocidade do vento, Neves e Roriz (2012) afirmam que o efeito chaminé é uma estratégia de projeto viável, pois independe dos ventos. Tais situações restringem o uso da ventilação por ação dos ventos em determinados locais e sob determinadas condições e faz com que o efeito chaminé seja uma alternativa aos métodos de condicionamento ativos.

O efeito chaminé ocorre quando o fluxo de ar é direcionado por diferenças de densidade entre o ar interno e o externo (ACRED; HUNT, 2014). A ventilação por tal efeito tem se popularizado como estratégia passiva na arquitetura. Vários elementos ou espaços como átrios, chaminés solares e fachadas duplas são frequentemente incorporados ao projeto de grandes edifícios com o objetivo de promover o efeito chaminé e alcançar condições de conforto no ambiente interno (ACRED; HUNT, 2014).

Em climas quentes e úmidos, entretanto, o efeito chaminé tem se mostrado ineficiente devido à pequena diferença de temperatura entre o ambiente interno e o externo. Uma alternativa que torna viável o uso do efeito chaminé nesse tipo de clima é a chaminé solar, ou seja, a ventilação induzida pelos ganhos solares (YUSOFF *et al.*, 2010). Entre as possíveis aplicações dessa alternativa, destacam-se a fachada dupla e a parede Trombe.

Neste artigo, estratégias de ventilação natural por efeito chaminé subsidiaram as decisões projetuais de um protótipo de brise-chaminé-solar para edificações escolares.

2.2 Objetivo

O objetivo deste artigo consiste em identificar as potencialidades e limitações da simulação predial e dos modelos de dinâmica de fluidos computacional com o uso de opções projetuais para um protótipo de brise-chaminé-solar.

2.3 Chaminés solares

A chaminé solar consiste em uma estratégia construtiva que utiliza a radiação solar para aumentar a ventilação natural em edificações. Trata-se de um duto vertical ou inclinado para passagem de ar, no qual há uma parede envidraçada e outra de alta absortância solar térmica, sendo o fluxo induzido por uma força motora gerada em função do aquecimento do ar e a consequente diminuição da sua densidade (KHANAL; LEI, 2014; ZHAI; SONG; WANG, 2011).

A forma, as propriedades térmicas do duto e as condições de operação influenciam diretamente o desempenho da chaminé solar, isto é, a sua capacidade de promover a ventilação natural e o consequente potencial de conservação de energia em edificações (ZHAI; SONG; WANG, 2011). A aplicação mais popular do conceito de chaminé solar é a parede Trombe, que é composta por um fechamento de vidro, uma camada de ar e uma parede absorvedora feita, geralmente, de concreto (ZHAI; SONG; WANG, 2011).

Fachadas duplas também podem funcionar como chaminés solares. Mingotti, Chenvidyakarn e Woods (2011) investigaram a ventilação natural de uma fachada dupla conectada a uma sala em um edifício de múltiplos pavimentos. A cavidade da fachada contém elementos semelhantes a *brise-soleils* que se aquecem com a radiação solar, transferem calor para o ar e provocam a ventilação da sala por efeito chaminé nas estações quentes. Já nas estações frias, é utilizado o ar pré-aquecido na fachada do pavimento imediatamente inferior para reduzir o consumo do sistema de aquecimento do edifício.

Além das configurações de parede (verticais), as chaminés solares inclinadas também são frequentes na literatura. Seytier e Naraghi (2013) pesquisaram chaminés solares inclinadas e identificaram que elas podem prover ventilação natural desde que haja radiação solar. Eles acrescentam que as chaminés solares inclinadas são configurações adequadas para residências, contudo a sua implantação em edifícios altos não é indicada porque a cobertura representa uma pequena parte do edifício e, em geral, é plana. Nesse caso, os autores indicam configurações verticais ou adaptações em fachadas duplas.

É notável, ainda, a influência dos materiais no desempenho das chaminés solares. Charvat, Jicha e Stetina (2004) compararam o desempenho de dois tipos de chaminé solar por meio de um experimento em escala real sob as condições climáticas da República Checa. Foram construídas duas chaminés solares com as mesmas características geométricas, porém uma com a placa absorvedora de metal leve e a outra de concreto com massa térmica. Observaram que a temperatura da placa absorvedora de metal se aproximou da temperatura externa logo após o sol se pôr. No caso da placa de concreto, a inércia garantiu que a temperatura se mantivesse superior à temperatura externa durante o período noturno.

A literatura indica, ainda, a utilização de materiais porosos na placa absorvedora. Chen e Qu (2014) analisaram placas absorvedoras compostas por rochas porosas e alumínio em chaminés solares para secagem de alimentos. Identificaram que, em comparação com placas não porosas, a temperatura do ar e a velocidade na saída da chaminé foram aumentadas, uma vez que o material poroso apresenta maior área superficial e coeficiente de transferência de calor mais alto.

Outra possibilidade é o uso de materiais de mudança de fase (PCM, do inglês *Phase Change Material*) na placa absorvedora. Amori e Mohammed (2012) investigaram os efeitos da integração de parafina em uma chaminé solar e identificaram o seu potencial de induzir a ventilação natural após o pôr-do-sol. Entretanto, a temperatura máxima da placa absorvedora com PCM foi mais baixa do que quando composta por apenas aço, pois parte da energia é armazenada no PCM e, consequentemente, o fluxo de ar foi menor durante o dia.

Ainda com relação ao uso de PCM em chaminés solares, Li e Liu (2014) identificaram que o desempenho do sistema é mais estável quando há troca de calor latente. Quando ocorre troca de calor sensível, há quedas bruscas nas taxas de fluxo de ar e na diferença de temperatura. Além disso, Li e Liu (2014) ressaltaram que o desempenho do sistema é altamente dependente da radiação solar. Quando a radiação solar diminui o desempenho da chaminé solar também cai, chegando a necessitar de técnicas mais efetivas quando a radiação solar é inferior a 500 W/m².

Hu *et al.* (2013) conduziram um experimento na China no qual analisaram o desempenho de uma placa absorvedora equipada com aletas que dividem a cavidade em câmaras e forma uma espécie de serpentina por onde o ar flui. A introdução de aletas pode aprimorar o processo de transferência de calor por convecção e diminuir a perda de calor por radiação, contribuindo, assim, para uma maior eficiência do sistema. Isso ocorre porque as aletas fazem com que a turbulência do ar interno aumente, misturando de forma mais eficiente o ar quente próximo à placa absorvedora ao ar mais frio próximo do vidro; essa temperatura do ar relativamente mais baixa é útil para reduzir a temperatura da placa absorvedora e, consequentemente, as perdas de calor por radiação. Os autores ressaltam que embora a turbulência seja útil para melhorar o processo de transferência de calor, pode causar perdas no fluxo, devendo ser controlada racionalmente para um melhor desempenho. Nesse sentido, um número ótimo de aletas deve ser calculado; no caso de Hu *et al.* (2013) foram 3 aletas. Sem aletas ocorria muitas perdas por radiação e com aletas em excesso (9 aletas) as perdas por convecção eram maiores.

Al-Kayiem, Sreejaya e Gilani (2014) realizaram uma análise matemática da influência da altura da chaminé, da área da placa coletora e intensidade da radiação solar no desempenho de um sistema de chaminé solar sobre telhado inclinado. Os resultados obtidos por esses autores indicaram que o parâmetro que mais influenciou no desempenho da chaminé solar foi a intensidade solar. O desempenho do sistema foi baixo para taxas de radiação de até 400 W/m², mesmo para a placa absorvedora de maior dimensão (600m²) e para chaminés mais altas (15m).

Outra configuração possível é composta por uma placa absorvedora associada a um duto vertical. Kasaeian, Ghalamchi e Ghalamchi (2014) investigaram o protótipo

de uma chaminé solar instalada em um edifício da Universidade de Tehran para geração de energia. Esse modelo é composto por uma base horizontal circular absorvedora sobre a qual há uma cavidade e uma superfície transparente. A entrada de ar se dá ao longo da circunferência dessa base. No centro é acoplado um tubo vertical aberto no topo que é responsável pela altura da chaminé. Identificou-se que o modelo piloto pode ter a velocidade do ar aumentada de 4% a 25% por meio da combinação ótima dos parâmetros geométricos. Os autores salientam que a altura e o diâmetro do tubo vertical foram as variáveis físicas mais importantes no projeto da chaminé solar estudada.

Patel, Prasad e Ahmed (2014) também estudaram o efeito de parâmetros geométricos no desempenho de chaminés solares para geração de energia. Esse tipo de chaminé solar é composto por uma base circular para absorção solar e um tubo vertical centralizado na base. A altura da chaminé e o diâmetro da placa absorvedora foram mantidos constantes em, respectivamente, 10m e 8m, enquanto as áreas de entrada e de saída de ar, o diâmetro da chaminé e a altura da entrada de ar da chaminé (conexão com placa absorvedora) foram variados. Nesse estudo, obteve-se uma taxa de fluxo de ar maior quando a área de entrada da placa absorvedora era menor e foram estabelecidos valores ótimos para altura e área de entrada da chaminé.

Outra configuração de chaminé solar é a proposta por Yusoff *et al.* (2010). Trata-se de um modelo composto por duas partes: uma placa absorvedora inclinada sobre a cobertura e um duto vertical ligado à saída da placa. A placa tem a função de captar a radiação solar, aquecer o ar interno e gerar diferenças de temperatura; o duto vertical (uma chaminé convencional que não tem a função de captar a radiação solar) é importante para prover altura suficiente para o efeito chaminé. Um protótipo desse modelo foi construído e avaliado experimentalmente e se mostrou capaz de promover ventilação em clima quente e úmido.

2.4 Métodos de simulação

Os trabalhos mencionados avaliaram chaminés solares de modo experimental, por meio de modelos matemáticos ou com o uso de simulação computacional. No

caso da simulação da ventilação natural, vários métodos de simulação têm sido utilizados para modelagem da distribuição térmica e movimento do fluxo de ar em ambientes e edificações. A escolha do método depende da complexidade do fenômeno observado, dos resultados esperados, dos parâmetros investigados e do grau de precisão requerido (MEGRI; HAGHIGHAT, 2007).

Os modelos nodais podem trabalhar a simulação em uma zona única ou em um modelo de rede multizonas. Tais modelos consideram uma zona como um espaço perfeitamente homogêneo. Srebric (2011) afirma que o método mais simples de simulação da ventilação é o modelo de rede (multinodal). Esse modelo divide um espaço ou edifício em um determinado número de volumes (zonas), para o qual as equações de conservação de massa, concentração e energia são resolvidas. O fluxo de ar geralmente se dá devido às diferenças de pressão entre as zonas conectadas.

Já os modelos de Dinâmica de Fluidos Computacional, mais conhecidos pela sigla CFD (*Computational Fluid Dynamics*), podem gerar parâmetros detalhados que auxiliam no projeto, como velocidade do ar, temperatura e concentração de contaminantes. A simulação CFD tem custos menores que as medições e é mais detalhada que o modelo de rede. O modelo CFD subdivide o interior do ambiente em pequenas células para as quais os balanços de massa, de quantidade de movimento de energia são satisfeitos (SREBRIC, 2011).

2.4.1 Simulação com o programa EnergyPlus

A chaminé térmica (*Thermal Chimney*) do EnergyPlus (versão 8.0) é um duto vertical que utiliza a radiação solar para promover a ventilação natural em edificações. Essa chaminé consiste numa parede absorvedora, uma camada de ar e uma superfície externa de vidro de alta transmitância. Os parâmetros desses componentes podem ser especificados pelo usuário (ENERGYPLUS, 2013).

O modelo de cálculo do EnergyPlus faz algumas suposições. A versão 8.0 considera que as temperaturas superficiais do vidro e da parede absorvedora são uniformemente distribuídas, que a temperatura na entrada da chaminé é igual à temperatura da sala a que a chaminé está acoplada, que a resistência ao fluxo de ar devido ao atrito superficial é desprezível e que a quantidade de ar do ambiente

induzida para fora pela chaminé é reposta por infiltração (ENERGYPLUS, 2013). O cálculo da taxa de fluxo de ar total causada pela chaminé solar, Q (m^3/s), é realizado pela equação 2.4.1, sendo C_d o coeficiente de descarga (adimensional), A_i e A_o as áreas de entrada e saída de ar (m^2), respectivamente, T_{fo} a temperatura de ar na saída (K), T_r a temperatura do ambiente interno (K) e L o comprimento total da chaminé (m) (ENERGYPLUS, 2013).

Analisando-se a equação 2.4.1, observa-se que algumas variações na geometria da chaminé tornam o fluxo de ar função somente da temperatura do ar na saída. Por exemplo: num ambiente onde a altura da chaminé e as áreas de entrada e saída de ar são mantidas constantes e são feitas variações na largura e comprimento da seção transversal da chaminé; nesse caso, a única variável que considera a geometria da chaminé é T_{fo}.

$$Q = C_d \, A_o \sqrt{\frac{2\left(\frac{T_{fo} - T_r}{T_r}\right) gL}{\left(1 + \frac{A_o}{A_i}\right)^2}} \tag{2.4.1}$$

O valor de T_{fo} é obtido por meio de uma equação diferencial (Eq. 2.4.2), considerando-se que a temperatura do ar na entrada da chaminé é igual à temperatura do ar na sala (ENERGYPLUS, 2013).

$$h_{wf}\left(T_w - \overline{T_f}\right) = h_{gf}\left(\overline{T_f} - T_g\right) + \frac{m\,C_p}{w}\frac{dT_f}{dx} \tag{2.4.2}$$

Nesta equação, h_{wf} é o coeficiente de transferência de calor convectivo entre a parede absorvedora e o fluido ($W/m^2°C$); T_w é a temperatura da parede absorvedora (K); $\overline{T_f}$ é a temperatura média do fluido ao longo da chaminé (K); h_{gf} é o coeficiente de transferência de calor convectivo entre o vidro e o fluido ($W/m^2°C$); T_g é a temperatura do vidro (K); m é a taxa de fluxo de massa do ar (kg/s); C_p é o calor específico do ar (J/kg°C); w é a largura da parede absorvedora (m) e x é o comprimento elementar da parede absorvedora (m) (ENERGYPLUS, 2013).

O modelo de chaminé solar do Energy Plus, embora seja capaz de oferecer diretrizes para a compreensão inicial de seu desempenho, não descreve a totalidade

dos fenômenos envolvidos, pois efeitos aerodinâmicos dentro da abertura, efeitos de fricção e mudanças de direção do ar não são captados pelo programa.

Além disso, a simulação pelo EnergyPlus exige um dado de entrada que dificilmente o simulador tem em mãos, uma vez que, no momento da simulação, ele desconhece as taxas de fluxo de ar através da chaminé. Isso ocorre no caso de chaminés com mais de uma entrada de ar, quando o simulador precisa determinar as taxas relativas de fluxo de ar que passa através de cada entrada da chaminé. Trata-se de um número adimensional que descreve a distribuição do fluxo entre as zonas que compartilham a mesma chaminé (ENERGYPLUS, 2013). O programa indica que a taxa de ar que passa pela entrada de ar deve atender à equação 2.4.3, na qual r_1 é a taxa de ar relativa na entrada 1, r_2 é a taxa de ar relativa na entrada 2, e assim sucessivamente até a taxa de ar relativa na enésima entrada, r_n, entretanto, não apresenta diretrizes para a determinação de tal proporção. Nesse sentido, a ausência de fundamentação para determinar esse parâmetro pode significar uma fonte de incerteza para a simulação.

$$r_1 + r_2 + r_3 + \cdots + r_n = 1 \tag{2.4.3}$$

O fluxo de ar que passa pela entrada de ar é determinado pela equação 2.4.4:

$$Q_n = Q r_n \tag{2.4.4}$$

sendo Q_n o fluxo de ar que passa pela enésima entrada (m^3/s) e r_n a taxa relativa de fluxo de ar que passa pela enésima entrada (ENERGYPLUS, 2013). Observa-se, então, que a taxa relativa de fluxo de ar exerce uma grande influência no resultado do fluxo de ar ao longo da chaminé.

2.4.2 Simulação CFD com o programa Ansys CFX

A Dinâmica de Fluidos Computacional é uma ferramenta para simulação do desempenho de sistemas que envolvem fluxo de fluidos, transferência de calor e outros processos físicos relacionados. Essa ferramenta funciona resolvendo equações de fluxos de fluidos em uma região de interesse, com condições de contorno conhecidas (ANSYS, 2013).

As equações que descrevem os processos de transferência de massa, calor e momento são conhecidas por equações de Navier-Stokes. Essas equações não possuem uma solução analítica geral conhecida, mas podem ser discretizadas e resolvidas numericamente (ANSYS, 2013).

Existem diferentes métodos de solução que são usados nos códigos CFD. O mais comum, no qual o Ansys CFX é baseado, é conhecido por Método dos Volumes Finitos. Nessa técnica, a região de interesse é dividida em pequenas sub-regiões, chamadas de volumes de controle. As equações são discretizadas e resolvidas de forma iterativa para cada volume de controle. Como resultado, uma aproximação do valor de cada variável em pontos específicos em todo o domínio pode ser alcançada. Com isso, obtém-se uma visão completa do desempenho do fluido (ANSYS, 2013).

As equações de conservação de massa, momento e energia são apresentadas abaixo (ANSYS, 2013).

Na equação 2.4.5, equação de continuidade, ρ é a densidade, t é o tempo e U é o vetor de velocidade.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla . (\rho \boldsymbol{U}) = 0 \tag{2.4.5}$$

Na equação 2.4.6, equação de momento, ρ é a densidade, t é o tempo, U é o vetor de velocidade, p é a pressão, S_M é momento original e o tensor τ está relacionado com a taxa de deformação de acordo com a equação 2.4.7, na qual μ é a viscosidade molecular, U é o vetor de velocidade, T é a temperatura estática e δ é a matriz identidade.

$$\frac{\partial (\rho \boldsymbol{U})}{\partial t} + \nabla . (\rho \boldsymbol{U} \otimes \boldsymbol{U}) = -\nabla p + \nabla . \tau + \boldsymbol{S}_M \tag{2.4.6}$$

$$\tau = \mu \left(\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3} \delta \nabla . U \right) \tag{2.4.7}$$

A energia total é descrita pela equação 2.4.8,

$$\frac{\partial (\rho \, h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla . (\rho \, \boldsymbol{U} \, h_{tot}) = \nabla . (\lambda \nabla \mathrm{T}) + \nabla . (\boldsymbol{U} . \tau) + \boldsymbol{U} . \boldsymbol{S}_M + \boldsymbol{S}_E \tag{2.4.8}$$

na qual ρ é a densidade, t é o tempo, p é a pressão, U é o vetor de velocidade, λ é a condutividade térmica, T é temperatura estática, S_E é a energia original, o termo $\nabla.(\boldsymbol{U}.\tau)$ representa o trabalho devido à tensão viscosa e é chamado de termo de trabalho viscoso. Esse termo modela o aquecimento interno pela viscosidade no fluido, e é desprezível na maioria dos fluxos. O termo $\boldsymbol{U}.\boldsymbol{S}_M$ representa o trabalho devido a fontes de momento externas e é frequentemente desprezado. A variável h_{tot} é a entalpia total, relacionada à entalpia estática $h\,(T,p)$, obtida pela equação 2.4.9.

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2}\boldsymbol{U}^2 \tag{2.4.9}$$

O CFX possui ainda uma alternativa ao cálculo da energia total que é o cálculo da energia térmica. Embora seja uma simplificação, esse método é adequado a fluxos de baixa velocidade e pode ser útil para evitar potenciais problemas de estabilidade das fórmulas de energia total (ANSYS, 2013).

A equação da energia térmica é dada pela equação 2.4.10,

$$\frac{\partial\,(\rho\,h)}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla\,.\,(\rho\,\boldsymbol{U}\,h) = \nabla\,.\,(\lambda\,\nabla\,T) + \boldsymbol{U}\,.\nabla p + \tau : \nabla\boldsymbol{U} + S_E \tag{2.4.10}$$

na qual ρ é a densidade, h é a entalpia específica estática, t é o tempo, p é a pressão, U é o vetor de velocidade, λ é a condutividade térmica, T é temperatura estática, S_E é a energia original e o termo $\tau : \nabla\boldsymbol{U}$ é chamado de dissipação viscosa. Esse termo modela o calor interno gerado pela viscosidade do fluido e é desprezível na maioria dos fluxos (ANSYS, 2013).

Por se tratar de um programa computacional que visa reproduzir apropriadamente alguns fenômenos físicos, é fundamental que o código CFD seja validado. Asfour e Gadi (2007) afirmam que a validação do código CFD deve ser implementada antes da realização de estudos definitivos, a fim de evitar que resultados incertos sejam produzidos. Uma opção possível é comparar os resultados do CFD com modelos matemáticos de ventilação natural (ASFOUR; GADI, 2007). Outra possibilidade de verificação de um código CFD é a comparação dos resultados com dados medidos. Entretanto, a maioria dos pacotes comerciais dispensa que o

simulador realize tal validação, uma vez que os testes são realizados antes da comercialização dos programas. Hajdukiewicz, Geron e Keane (2013) afirmam que o Ansys CFX é um código comercial verificado, já com um *benchmarking* de muitos casos de avaliação de fluxo de ar e transferência de calor em ambientes internos, portanto, a validação do código pode ser excluída do trabalho.

Ao contrário do código comercial, a simulação deve ser validada, uma vez que pode produzir diferentes resultados em função dos dados de entrada definidos pelo simulador. Resultados diferentes decorrem, por exemplo, do tamanho e da geometria dos volumes de controle que são definidos durante a geração da malha, isto é, durante a subdivisão do volume em estudo. É necessário, portanto, a realização de testes de independência de malha que consiste em efetuar sucessivas simulações diminuindo o tamanho dos elementos da malha e comparar os resultados dessas simulações. Uma solução é considerada independente da malha quando os resultados não variam significativamente quando o número de elementos é aumentado (HAJDUKIEWICZ; GERON; KEANE, 2013).

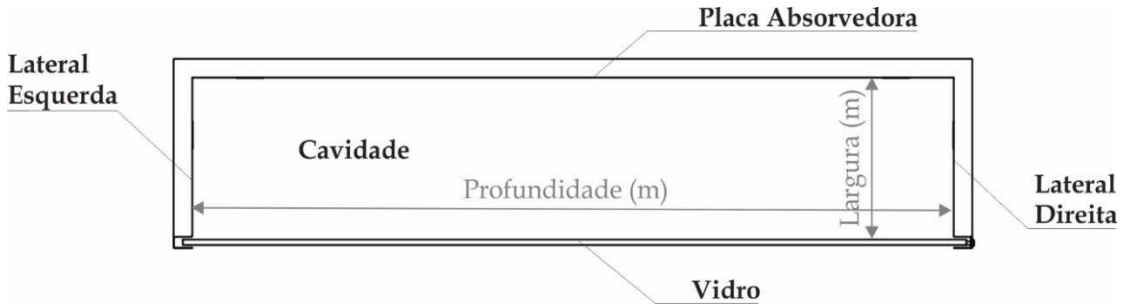
Outro parâmetro definido pelo usuário nas simulações CFD e que pode influenciar significativamente nos resultados é o modelo de turbulência. Asfour e Gadi (2007) afirmam que a maioria dos problemas em edificações considera que o fluxo de ar é turbulento. Dessa forma, a definição de um modelo de turbulência é necessária para a solução das equações. O modelo de turbulência k-ε é o mais aconselhável para estudos de fluxo de ar em edificações (ASFOUR; GADI, 2007).

2.5 Método

O desenvolvimento do projeto de um dispositivo de proteção solar que induza a ventilação natural partiu de conceitos já consolidados na arquitetura. O controle solar de aberturas em fachadas tem sido feito tanto por meio de placas ou aletas quanto pela utilização de uma segunda camada envidraçada (fachada dupla). A ideia de um *brise-soleil* oco surgiu ao mesclar a forma tradicional dos *brise-soleils* verticais, que muitas vezes seguem ininterruptamente ao longo das fachadas de vários pavimentos, aos efeitos de uma chaminé térmica.

O protótipo é constituído de uma placa vertical composta de múltiplas camadas: uma superfície envidraçada, uma cavidade por onde o ar flui e uma placa absorvedora, seguindo o conceito de chaminé solar já abordado (Figura 2.5.1). A contribuição desse projeto não está nos conceitos envolvidos, mas na integração de tais conceitos de forma a obter um produto único com a função de ventilar e sombrear sem obstruir a visão para o exterior.

Figura 2.5.1 – Seção horizontal da proteção solar



Fonte: elaborado pela autora

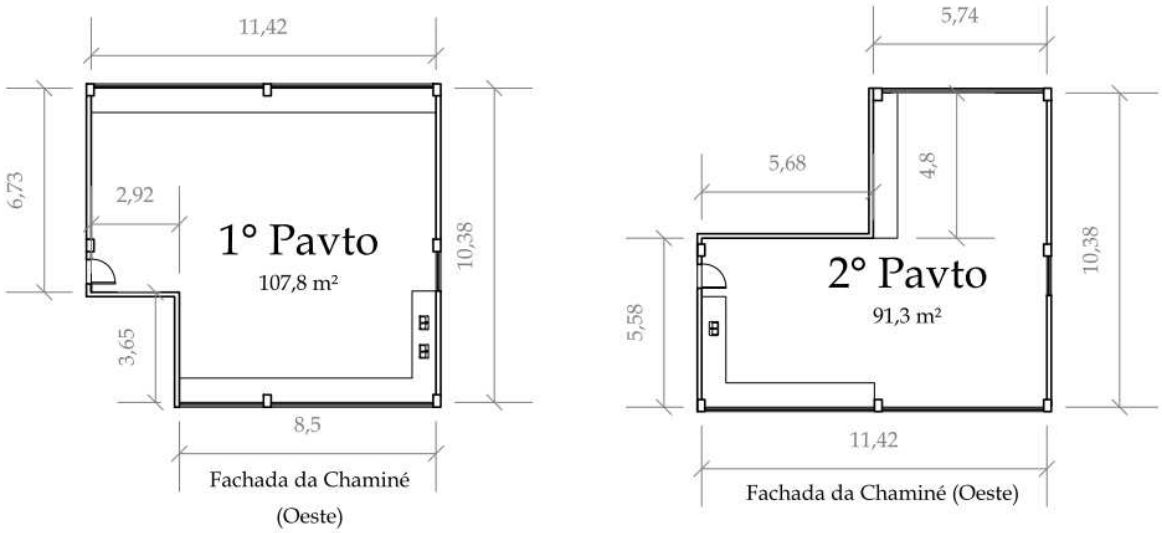
O protótipo foi instalado no edifício sede do Departamento de Arquitetura e Urbanismo (DAU), localizado na Universidade Federal de Viçosa, em Minas Gerais. A cidade de Viçosa, na Zona Bioclimática 3, está localizada na latitude 20,77° Sul e longitude 42,87° Oeste e a 712,2 m acima do nível do mar.

Os ambientes que receberam a chaminé solar são dois laboratórios que possuem dimensões semelhantes, aberturas de mesmas dimensões e orientação solar e são usados para pesquisa e eventuais aulas práticas. Um desses laboratórios encontra-se em contato com o solo e o outro em contato com a cobertura.

A área do laboratório do pavimento térreo é de 107,8 m² e a do pavimento superior é de 91,3 m² (Figura 2.5.2), o pé direito em ambos os andares é de 3,15 m, as janelas são de vidro comum 3 mm com folhas fixas e folhas móveis (tipo basculante), as paredes são de alvenaria comum, a laje de piso do pavimento superior é de concreto armado revestido por uma camada de cimento queimado e a cobertura é de telha metálica com forro de lã mineralizada.

A fachada dos laboratórios na qual o dispositivo foi instalado (Figura 2.5.3) está voltada para a orientação oeste, recebendo incidência solar principalmente no período da tarde, quando há maior necessidade de ventilação. Entretanto parte da radiação solar é bloqueada pelo relevo local (Figura 2.5.4).

Figura 2.5.2 – Laboratórios nos quais o brise-chaminé-solar foi instalado

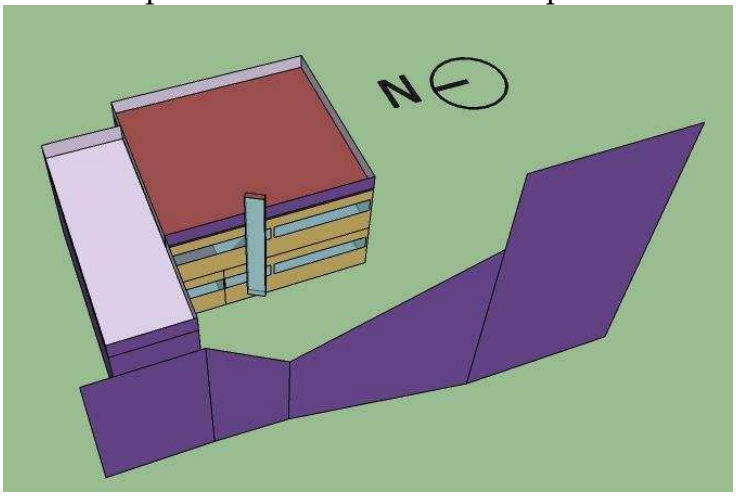


Fonte: elaborado pela autora

Figura 2.5.3 – Brise-chaminé-solar instalado na fachada oeste

Fonte: acervo da autora

Figura 2.5.4 – Superfície de sombreamento equivalente ao morro



Fonte: elaborado pela autora

Alternativas de projeto foram avaliadas por meio de simulação computacional a fim de identificar os parâmetros que apresentavam melhor desempenho na ventilação natural. As alternativas testadas consistiram em variações nas dimensões da chaminé, no seu ângulo horizontal de inclinação em relação à fachada, nas áreas de abertura e no material da placa absorvedora (Tabela 2.5.1). Quanto à superfície transparente, foi feita de vidro comum de 6 mm de espessura em todas as alternativas. Os laboratórios foram simulados desconsiderando-se as cargas térmicas de equipamentos e pessoas.

As alternativas avaliadas incluíram duas alturas para a chaminé. A primeira com a saída de ar alinhada com a platibanda (1,45 m acima da entrada de ar do pavimento superior) e a segunda a 2,7 m acima da entrada de ar do pavimento superior.

A placa absorvedora é do tipo "sanduíche", isto é, contém fechamentos de metal separados por uma camada isolante. Para a superfície da placa absorvedora em contato com a cavidade da chaminé, definiu-se o material como aço pintado de preto, para que houvesse alta absortância de radiação solar. Já o fechamento externo da placa absorvedora e a camada de isolante tinham a função de reduzir as perdas de calor para o ambiente externo. Foram avaliadas duas possibilidade de material para o fechamento externo da placa (aço e alumínio) e duas possibilidades de material isolante (poliestireno e ar).

Tabela 2.5.1 – Alternativas avaliadas para o projeto da proteção solar

Alter-nativa	Largura do duto (m)	Profundidade do duto (m)	Ângulo horizontal em relação à fachada (graus)	Área Entrada (m²)	Área Saída (m²)	Altura entre a entrada* e saída de ar (m)	Placa Absorvedora (camadas: interna, câmara, externa)
Alt 01	0,1	1,0	30	0,085	0,1	1,45	Aço Poliestireno Alumínio
Alt 02	0,1	1,0	30	0,085	0,1	1,45	Aço Poliestireno Aço
Alt 03	0,1	1,0	30	0,085	0,1	2,70	Aço Poliestireno Aço
Alt 04	0,2	1,0	30	0,17	0,2	2,70	Aço Poliestireno Aço
Alt 05	0,2	0,5	30	0,17	0,1	2,70	Aço Poliestireno Aço
Alt 06	0,2	1,0	45	0,17	0,2	2,70	Aço Poliestireno Aço
Alt 07	0,2	1,0	30	0,17	0,2	2,70	Aço Ar Aço

* Considerou-se a distância até a borda superior da entrada de ar do primeiro pavimento. A distância entre a entrada de ar do pavimento térreo e a saída de ar é igual ao valor apresentado na tabela acrescido de 3,55m (maior que o pé-direito, pois os peitoris são diferentes).
Fonte: elaborado pela autora

Para que não se perdesse a característica de uma proteção solar, definiu-se que as dimensões da placa não poderiam exceder a largura de 0,20 m e a profundidade de 1,00 m. Acima desse limite considerou-se que o elemento construtivo perderia seu papel compositivo como proteção solar e passaria a ser somente uma chaminé solar obstruindo uma fachada. A Tabela 2.5.1 descreve as características de cada alternativa proposta.

Um dado de saída chave do modelo de chaminé térmica é a taxa de ventilação causada pela presença da chaminé solar (ENERGYPLUS, 2013). É importante analisar como essa taxa de fluxo de ar é influenciada pela temperatura superficial da placa absorvedora, já que essa temperatura é utilizada como dado de entrada na simulação

CFD. Nesse sentido, foi analisada a correlação entre a taxa de fluxo de ar e as temperaturas da superfície interna da placa absorvedora.

Essas correlações foram determinadas pelo coeficiente de correlação de Pearson (r). Segundo Barbetta (2011), esse coeficiente é um número entre -1 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1 (ou -1) mais forte é a correlação entre duas variáveis quantitativas. Uma correlação positiva perfeita (quando os pontos estiverem exatamente sobre uma reta ascendente) possui r = 1. Já quando houver uma correlação negativa perfeita (reta descendente), tem-se r = -1. E no caso de não haver correlação nos dados, o valor de r será próximo de zero (BARBETTA, 2011).

De acordo com Barbetta (2011), o coeficiente de correlação linear de Pearson (r) é definido pela equação 2.5.1,

$$r = \frac{\sum(x'.y')}{n-1} \qquad (2.5.1)$$

na qual n é o tamanho da amostra, isto é, o número de pares (x, y) e $\sum(x'.y')$ a soma dos produtos dos pares de valores padronizados. A padronização dos valores é feita para evitar o efeito da unidade de medida, seguindo as equações 2.5.2 e 2.5.3.

$$x' = \frac{x-\bar{X}}{S_x} \qquad (2.5.2) \qquad ,e, \qquad y' = \frac{y-\bar{Y}}{S_y} \qquad (2.5.3)$$

sendo: x′ um valor padronizado; x um valor da variável X; $\bar{X}$ a média dos dados da variável X; S_x o desvio padrão dos dados de X; y′ um valor padronizado; y um valor da variável Y; $\bar{Y}$ a média dos dados da variável Y e S_y o desvio padrão dos dados Y.

As simulações do EnergyPlus tiveram sua taxa relativa de fluxo de ar (TRF) configuradas arbitrariamente de modo que a abertura do térreo fosse responsável por 60% do volume de ar movimentado pela chaminé (TRF = 0,60) e a abertura do pavimento superior tivesse uma influência de 40% (TRF = 0,40). Como não havia nenhuma informação que balizasse a escolha desses valores, foi realizada uma análise de sensibilidade. A alternativa selecionada para construção foi simulada novamente para avaliar a influência das taxas relativas de fluxo de ar que passa através de cada entrada da chaminé (*relative ratio of air flow rates passing through the zone*) no resultado da simulação. Considerando-se que a soma das taxas relativas de

fluxo de ar deve ser igual a 1 e que a chaminé solar analisada apresenta duas entradas de ar, foram analisadas algumas das combinações possíveis (Tabela 2.5.2).

A fim de se evitar que características da edificação como volume de ar dos ambientes e propriedades térmicas dos materiais influenciassem na comparação com o modelo de chaminé térmica do EnergyPlus, o modelo simulado no Ansys CFX incluiu somente a chaminé, sem a edificação. Os dados de entrada inseridos no Ansys CFX foram obtidos pela simulação do EnergyPlus, de modo que as condições de contorno usadas pelos dois programas fossem iguais.

Enquanto o EnergyPlus permitiu a obtenção de resultados para todas as horas do ano, as simulações CFD foram realizadas em regime permanente, isto é, não há variações nas condições de contorno ao longo do tempo e o resultado é dado para uma situação de regime permanente. A partir das simulações realizadas com o EnergyPlus, observou-se que a temperatura superficial da placa absorvedora apresentou forte correlação com a taxa de fluxo de ar provocada pela chaminé (como será visto no item 2.6). As horas em que os valores extremos (percentis 2,5 e 97,5), medianos e quartis da temperatura superficial da placa absorvedora ocorreram foram identificadas e os dados referentes a essas horas foram configurados como dados de entrada no Ansys CFX. Além das temperaturas superficiais, os dados obtidos no EnergyPlus que foram inseridos no Ansys CFX são temperatura do ar nas entradas da chaminé e temperatura do ar externo.

Tabela 2.5.2 – Combinações de taxa relativa de fluxo de ar (TRF)

Combinação	Entrada 01 (Térreo)	Entrada 02 (Pavimento Superior)
TRF 01	0,1	0,9
TRF 02	0,2	0,8
TRF 03	0,3	0,7
TRF 04	0,4	0,6
TRF 05	0,5	0,5
TRF 06	0,6	0,4
TRF 07	0,7	0,3
TRF 08	0,8	0,2
TRF 09	0,9	0,1

Fonte: elaborado pela autora

Embora o modelo de chaminé solar do EnergyPlus não utilize, diretamente, os dados de velocidade e direção de vento presentes no arquivo climático, foi realizado um teste da influência desses dados. Para isso, o arquivo climático original foi manipulado de forma que a velocidade e a direção de vento fossem anuladas.

Alguns programas de simulação utilizam o coeficiente de descarga (C_z) para caracterizar o efeito das aberturas no fluxo de ar, enquanto outros utilizam o coeficiente de perda (K). Embora haja variação no valor do coeficiente de descarga observado na literatura, Cóstola, Alucci e Etheridge (2009) afirmam que o valor comumente utilizado é 0,60. A norma Ashrae (2001) afirma que o valor de C_z = 0,60 é frequentemente utilizado quando todas as aberturas de bordas vivas de uma edificação são combinadas em uma abertura equivalente. Já o coeficiente de perda localizada indicado para entradas de tubos de bordas vivas é K = 0,50 (FOX; McDONALD; PRITCHARD, 2006). Com esses coeficientes, pode-se manter a correspondência dos parâmetros configurados para as aberturas da chaminé solar no EnergyPlus (Cz = 0,60) e no Ansys CFX (K = 0,50), considerando-se a abertura como um orifício de bordas vivas.

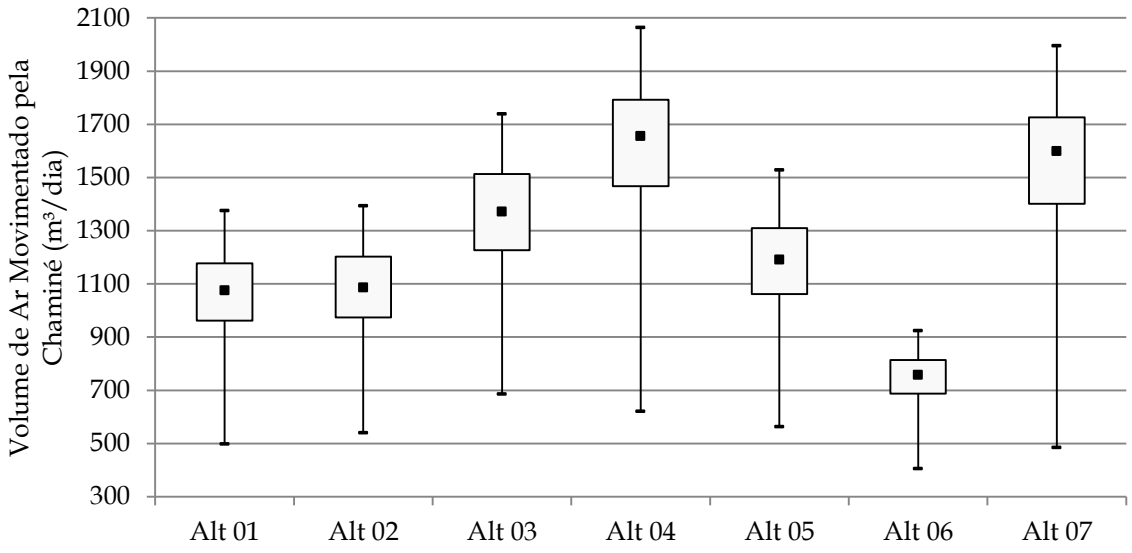
A comparação entre os programas foi realizada com base nos resultados de taxa de fluxo de ar (m^3/s) obtidos na saída da chaminé. Em ambos os programas, a chaminé foi simulada com as entradas de ar abertas nos dois pavimentos.

2.6 Resultados

2.6.1 Simulação das alternativas pelo EnergyPlus

Os resultados da simulação pelo EnergyPlus foram analisados considerando-se os 365 dias do ano durante as horas do dia em que o edifício é utilizado, isto é, no intervalo entre 8h e 18h. A Figura 2.6.1 permite a análise do volume de ar movimentado pela chaminé solar a cada dia para as alternativas avaliadas. São apresentados o primeiro quartil, o terceiro quartil, a mediana, o percentil 2,5 e o percentil 97,5. Foram usados os percentis 97,5 e 2,5, em vez do máximo e mínimo, para que os valores extremos fossem excluídos da análise.

Figura 2.6.1 – Volume de ar movimentado a cada dia (8h às 18h) devido à ação da chaminé solar



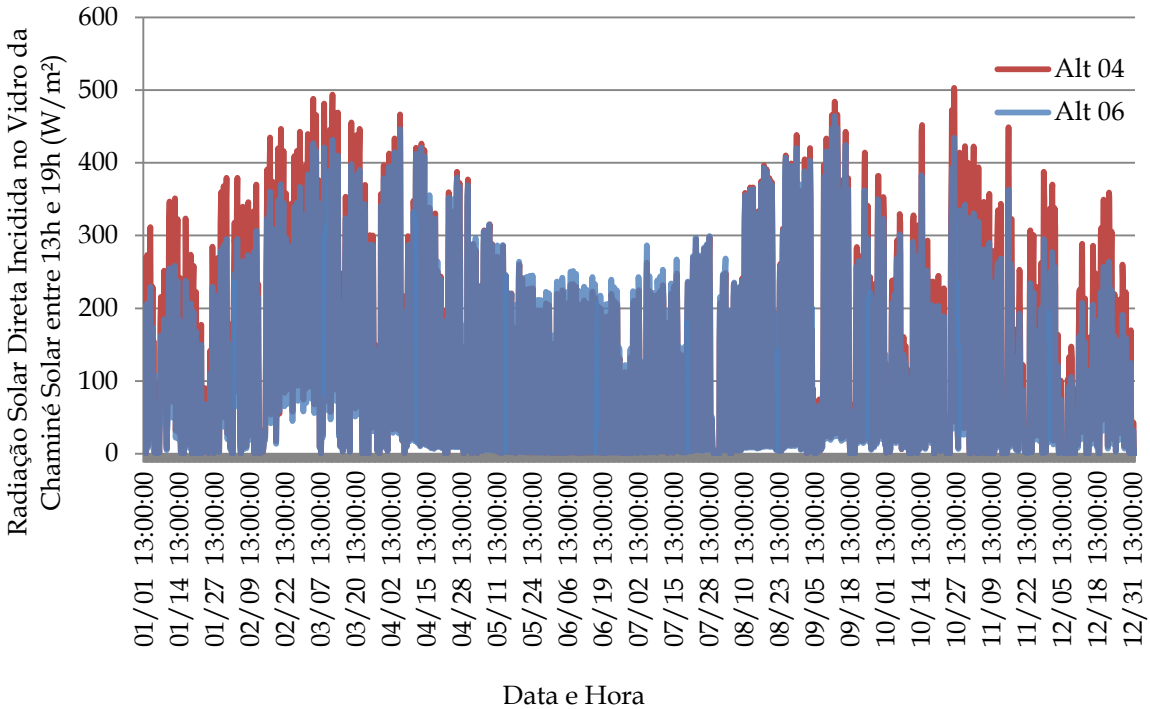
Fonte: elaborado pela autora

A fim de se obter o desempenho da chaminé mais próximo do que ocorre na realidade, essas simulações foram realizadas com o arquivo climático original, isto é, com os valores de velocidade e direção de vento inalterados. Diante dos resultados obtidos na simulação, identificou-se a solução que apresentou o melhor desempenho. Com as alternativas Alt 01 e Alt 02, comparou-se a influência do material de fechamento externo da placa absorvedora nas perdas térmicas para o exterior. Em Alt 01 foi simulado o uso de alumínio e em Alt 02, aço. Na Figura 2.6.1, constata-se que o desempenho dessas duas alternativas foi semelhante. Nesse caso, selecionou-se Alt 02, já que o alumínio apresentaria um custo construtivo mais elevado. A comparação entre Alt 02 e Alt 03 buscou identificar a altura da chaminé que apresenta o melhor desempenho. Observou-se que a Alt 03 provocou a movimentação de um volume de ar maior. Dessa forma, as alternativas seguintes adotaram a mesma altura de chaminé de Alt 03. Já a comparação entre Alt 03 e Alt 04 buscou identificar a influência do aumento da largura e das áreas de abertura da chaminé no seu desempenho. Nesse sentido, a Alt 04, que possui áreas de abertura maiores, apresentou movimentação em um volume de ar maior que a Alt 03. Comparando-se, então, Alt 04 com Alt 05, isto é, a profundidade da chaminé cuja superfície recebe a radiação solar, identificou-se que, com a profundidade menor e, consequentemente, uma área de abertura de saída menor (Alt 05), a movimentação

de ar reduziu, confirmando que uma maior área de superfície captadora de radiação aumenta o fluxo de ar. Continuou-se a comparação entre Alt 04 e Alt 06, ou seja, avaliou-se a influência do ângulo horizontal entre a chaminé solar e a fachada e identificou-se que o ângulo de 45° (Alt 06) comparado com o ângulo de 30° (Alt 04) apresentou um desempenho inferior. Esse fato pode ser entendido ao analisar a Figura 2.6.2, que mostra que a radiação solar que incide diretamente sobre o vidro da chaminé solar é maior em Alt 04 que em Alt 06, especialmente nos meses de verão. Finalmente, comparou-se o desempenho do material isolante da placa absorvedora. Alt 04 utiliza isopor e Alt 07 utiliza uma camada de ar. Considerando-se que o isopor não resiste ao calor do processo de solda que será utilizado na construção do protótipo e que o desempenho não foi discrepante, adotou-se o ar como material isolante. Portanto, Alt 07 é a alternativa que foi construída.

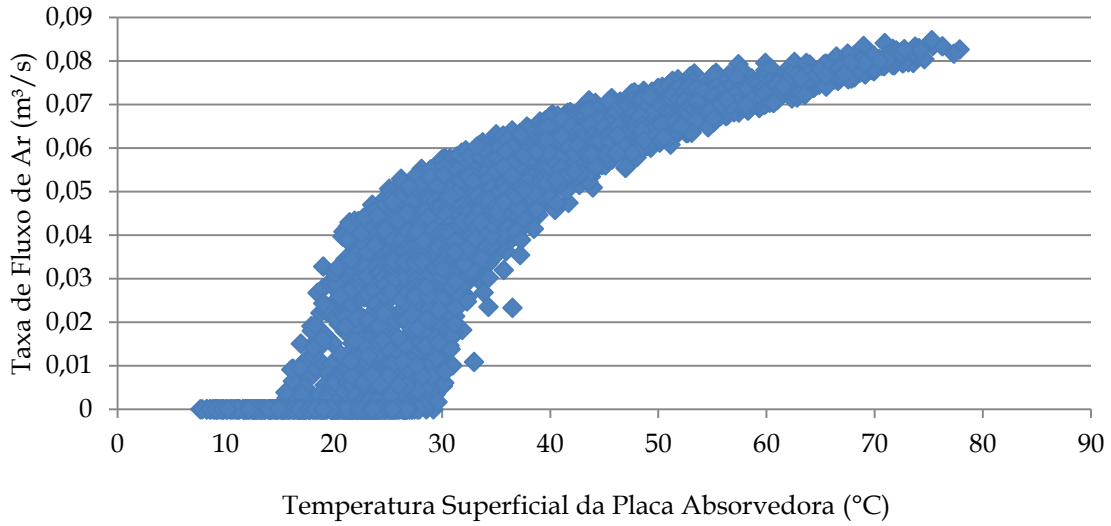
A correlação entre a taxa de fluxo de ar e a temperatura superficial da placa absorvedora determinadas pelos modelos matemáticos do EnergyPlus para Alt 07 nas horas do ano em que o edifício está ocupado (8h às 18h) foi de 0,87, o que indica a existência de uma correlação positiva forte entre os dados da Figura 2.6.3.

Figura 2.6.2 – Radiação solar direta incidida no vidro da chaminé solar



Fonte: elaborado pela autora

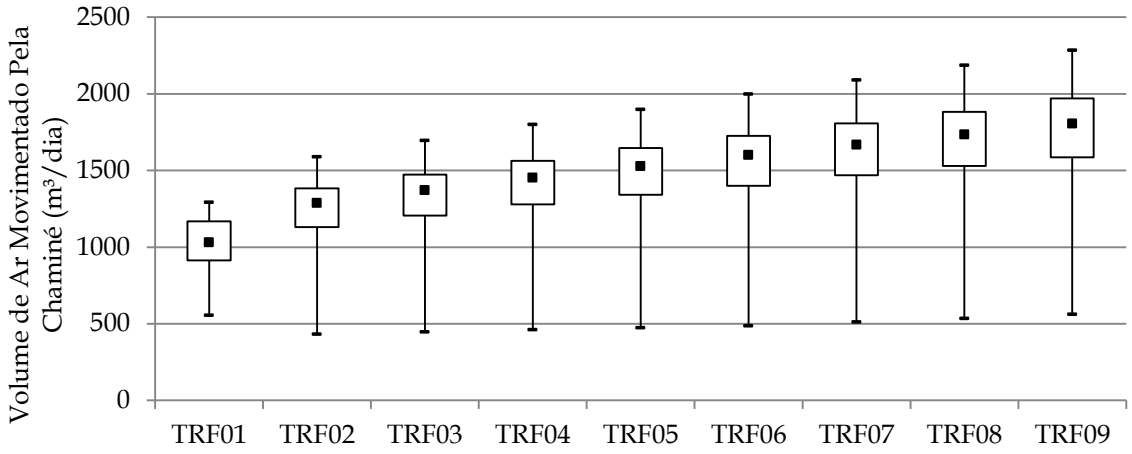
Figura 2.6.3 – Taxa de fluxo de ar em função da temperatura da placa absorvedora



Fonte: elaborado pela autora

Ao analisar a influência da taxa relativa de fluxo de ar das entradas (Tabela 2.5.2) no volume de ar que passa pela Alt 07 ao longo de um dia (período de 8h às 18h), percebe-se que há uma tendência de crescimento à medida que aumenta a proporção de contribuição da abertura mais distante do topo da chaminé no fluxo de ar (Figura 2.6.4). A Figura 2.6.4 descreve o volume de ar que passa pela chaminé por meio da mediana, do primeiro e do terceiro quartil e dos limites superior e inferior, para os quais foram utilizados os percentis 97,5 e 2,5, respectivamente, de modo que 5% dos dados extremos não influenciassem na análise.

Figura 2.6.4 – Influência das combinações de taxa relativa de fluxo de ar no volume de ar movimentado pela chaminé Alt 07 por dia (8h às 18h) simulada no EnergyPlus



Fonte: elaborado pela autora

Os dados de temperatura superficial da placa absorvedora obtidos por meio das simulações no EnergyPlus foram inseridos como condições de contorno no Ansys CFX para cinco situações diferentes em cada alternativa de projeto da chaminé solar. As situações escolhidas foram aquelas que ocorreram nas horas em que a temperatura superficial da placa absorvedora apresentou valores de percentil 2,5 (Condição 01), primeiro quartil (Condição 02), mediana (Condição 03), terceiro quartil (Condição 04) e percentil 97,5 (Condição 05), conforme apresentado na Tabela 2.6.1. Os dados obtidos no EnergyPlus para representar as condições de contorno são apresentados na Tabela 2.6.2, que mostra as temperaturas superficiais internas da chaminé solar.

Tabela 2.6.1 – Data e hora em que a temperatura superficial da placa absorvedora apresenta valores de mediana, primeiro e terceiro quartis e percentis 2,5 e 97,5

	Condição 01 (percentil 2,5)	**Condição 02** (1° Quartil)	**Condição 03** (Mediana)	**Condição 04** (3° Quartil)	**Condição 05** (Percentil 97,5)
Alt 01	12/08 às 8h	15/11 às 8h	14/11 às 17h	27/03 às 16h	19/03 às 16h
Alt 02	12/06 às 9h	28/04 às 17h	28/03 às 15h	13/07 às 15h	10/03 às 17h
Alt 03	07/07 às 9h	13/11 às 15h	07/09 às13h	03/03 às 13h	25/02 às 17h
Alt 04	01/06 às 8h	26/07 às 11h	13/01 às 10h	23/04 às 13h	19/02 às 16h
Alt 05	02/06 às 8h	17/07 às 11h	03/04 às 11h	22/08 às 15h	10/09 às 15h
Alt 06	01/06 às 8h	13/11 às 15h	28/12 às 14h	20/01 às 15h	02/03 às 17h
Alt 07	28/05 às 8h	25/05 às 11h	14/11 às 16h	17/03 às 16h	10/09 às 15h

Fonte: elaborado pela autora

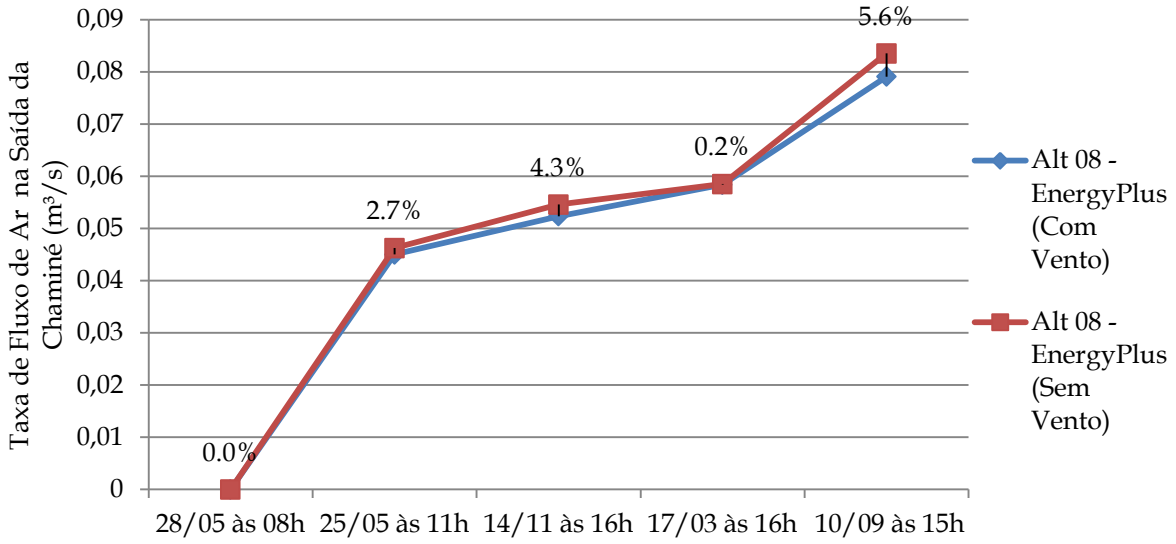
Um teste foi realizado para identificar a influência dos ventos no modelo de chaminé solar do EnergyPlus, tendo em vista que o modelo simulado no Ansys CFX desprezou o efeito de vento. A alternativa Alt 07 foi simulada no EnergyPlus com um arquivo climático manipulado, onde os dados de velocidade e direção de vento foram zerados. A Figura 2.6.5 mostra que o fluxo de ar provocado pela chaminé solar (Alt 07), quando simulada com o arquivo climático original e com o arquivo sem vento, apresentou diferença máxima de 5,6% para as horas apresentadas na Tabela 2.6.1. Como essa diferença não é significativa para efeito de comparação com o Ansys CFX, os dados utilizados como condição de contorno da simulação CFD, foram extraídos dos resultados da simulação no EnergyPlus com o arquivo climático original (com velocidade e direção de vento).

Tabela 2.6.2 – Temperaturas Superficiais Internas da Chaminé Solar (°C)

		Placa Absorvedora	Vidro	Fundo	Lateral Esquerda	Lateral Direita
Condição 01	**Alt 01**	12,46	11,98	12,02	11,97	11,83
	Alt 02	12,73	12,82	11,83	12,04	11,98
	Alt 03	12,98	11,52	12,01	12,45	12,23
	Alt 04	12,86	12,77	12,39	12,43	12,35
	Alt 05	12,64	12,48	12,18	12,61	12,13
	Alt 06	12,61	12,89	12,30	12,34	12,24
	Alt 07	13,59	12,71	12,77	13,56	12,65
Condição 02	**Alt 01**	24,53	22,13	23,60	23,70	23,63
	Alt 02	25,22	21,48	24,06	24,47	24,47
	Alt 03	26,02	23,46	25,07	25,38	25,44
	Alt 04	26,31	22,49	23,72	25,29	24,66
	Alt 05	24,92	22,78	23,89	24,98	24,44
	Alt 06	25,77	23,38	25,32	25,55	25,64
	Alt 07	26,01	23,40	23,62	26,33	25,09
Condição 03	**Alt 01**	31,19	28,93	30,62	30,78	30,63
	Alt 02	32,28	26,91	30,42	30,59	30,90
	Alt 03	33,19	25,41	31,98	31,21	31,90
	Alt 04	34,27	27,94	30,09	31,42	31,16
	Alt 05	31,44	27,74	29,35	31,07	30,42
	Alt 06	33,39	28,54	34,23	33,30	32,90
	Alt 07	32,92	29,94	31,46	31,95	32,10
Condição 04	**Alt 01**	44,25	33,05	40,65	40,01	39,23
	Alt 02	45,26	32,62	36,43	38,15	40,93
	Alt 03	46,20	37,38	54,12	42,31	44,35
	Alt 04	50,11	35,76	52,74	41,66	47,71
	Alt 05	42,60	33,40	37,17	36,70	37,59
	Alt 06	46,22	35,63	54,12	49,89	43,89
	Alt 07	43,99	33,04	38,75	37,89	37,50
Condição 05	**Alt 01**	66,81	45,63	65,57	58,61	52,87
	Alt 02	68,05	46,92	56,47	63,39	57,18
	Alt 03	68,41	47,99	57,79	66,74	58,51
	Alt 04	77,39	48,59	69,87	64,97	57,84
	Alt 05	62,81	40,34	62,25	48,20	48,55
	Alt 06	67,62	49,51	58,46	69,48	60,36
	Alt 07	65,67	41,29	57,88	46,09	46,14

Fonte: elaborado pela autora

Figura 2.6.5 – Comparação entre a taxa de fluxo de ar na saída da chaminé (Alt 07) quando simulada com arquivo climático original e sem vento



Fonte: elaborado pela autora

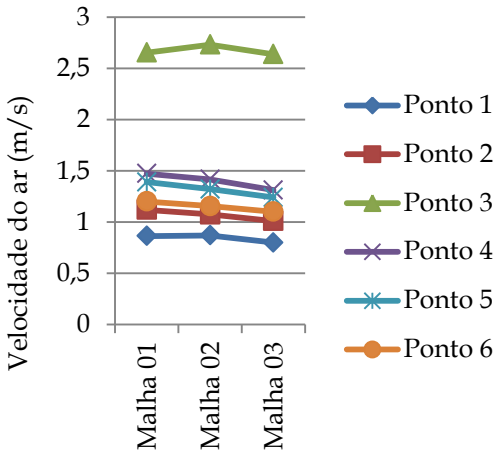
2.6.2 Simulação das alternativas por CFD

Para que os resultados da simulação não fossem influenciados pela discretização do domínio, foram realizados testes de independência de malha para as geometrias estudadas. Notou-se que, quando as alterações de uma alternativa para outra se referem apenas ao material ou à posição da chaminé solar, não há variação na geometria da chaminé. Dessa forma, os testes de independência de malha foram realizados para quatro situações: Geometria A (Alt 01 e Alt 02), Geometria B (Alt 03), Geometria C (Alt 04, Alt 06 e Alt 07) e Geometria D (Alt 05). As condições de contorno usadas nas simulações de teste de malha são aquelas descritas na Tabela 2.6.2 para a Condição 05. No caso da Geometria A, foram usadas as condições de contorno de Alt 01 e para a Geometria C, as condições de contorno de Alt 07.

O parâmetro utilizado para avaliação da malha foi a velocidade do ar. Foram monitorados 6 pontos em diferentes alturas no interior da chaminé. Os pontos foram centralizados no interior da chaminé em relação à largura e profundidade. Com relação à altura, os pontos foram distribuídos verticalmente de modo que os pontos 01 e 02 ficassem na altura da abertura do pavimento térreo (respectivamente, a 1,20m e 1,50m do fundo da chaminé), o ponto 03 ficasse entre a abertura do térreo e do pavimento superior (a 3,10m do fundo da chaminé), os pontos 04 e 05 ficassem na altura da abertura do pavimento superior (respectivamente, a 4,70m e 5,00m do

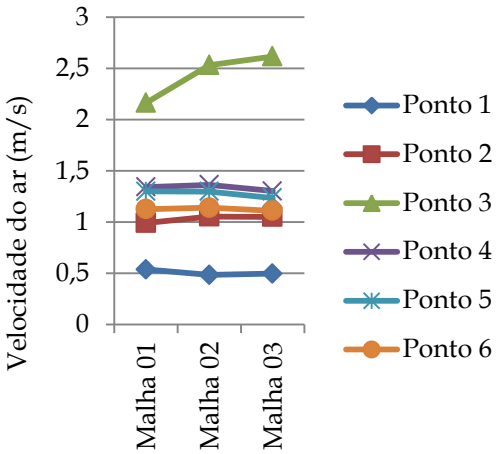
fundo da chaminé) e o ponto 06 se localizasse na saída da chaminé (a 6,75m do fundo na Geometria A e a 8,00m do fundo nas demais geometrias). O teste foi realizado para três graus de refinamento de malha. As malhas utilizadas neste trabalho são compostas por elementos hexaédricos. A malha 01 é a que possui o menor grau de refinamento, com 06 elementos na menor dimensão da chaminé, isto é, entre a superfície interna do vidro e a placa absorvedora. A malha 02 apresentou um refinamento médio, com 10 elementos, e a malha 03 foi a mais refinada, com 14 elementos. As figuras 2.6.5 a 2.6.8 mostram a variação de velocidade do ar nos pontos monitorados em função do grau de refinamento da malha. Para as Geometrias A e D, constatou-se que da malha 02 para a malha 03 gerou diferenças inferiores a 10% na velocidade do ar em todos os pontos monitorados. Na geometria B, as diferenças provocadas pela alteração da malha 02 para a malha 03 também foram inferiores a 10% para a maioria dos pontos, com exceção dos pontos 01 e 04 que apresentaram diferenças de, respectivamente, 14% e 12%. Já na Geometria C, essas diferenças observadas com o refinamento da malha 02 para a malha 03 foram inferiores a 5% para todos os pontos. Dessa forma, considerou-se que os resultados das simulações não foram influenciados expressivamente pela malha e as configurações da Malha 02 foram utilizadas para as demais alternativas simuladas.

Figura 2.6.5 – Avaliação da malha da Geometria A



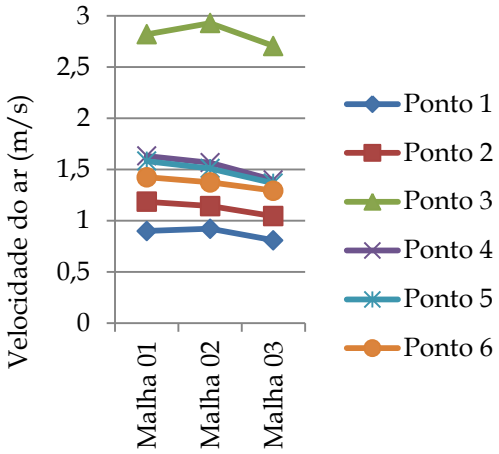
Fonte: elaborado pela autora

Figura 2.6.7 – Avaliação da malha da Geometria C



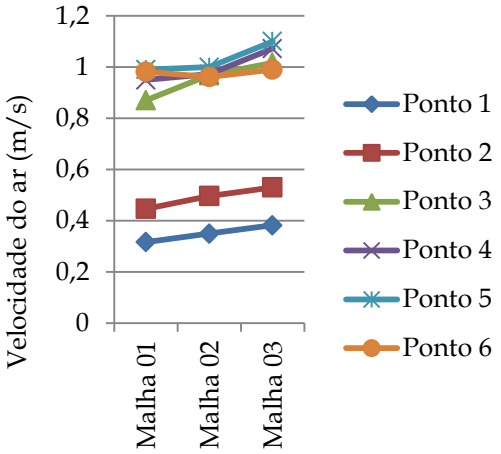
Fonte: elaborado pela autora

Figura 2.6.6 – Avaliação da malha da Geometria B



Fonte: elaborado pela autora

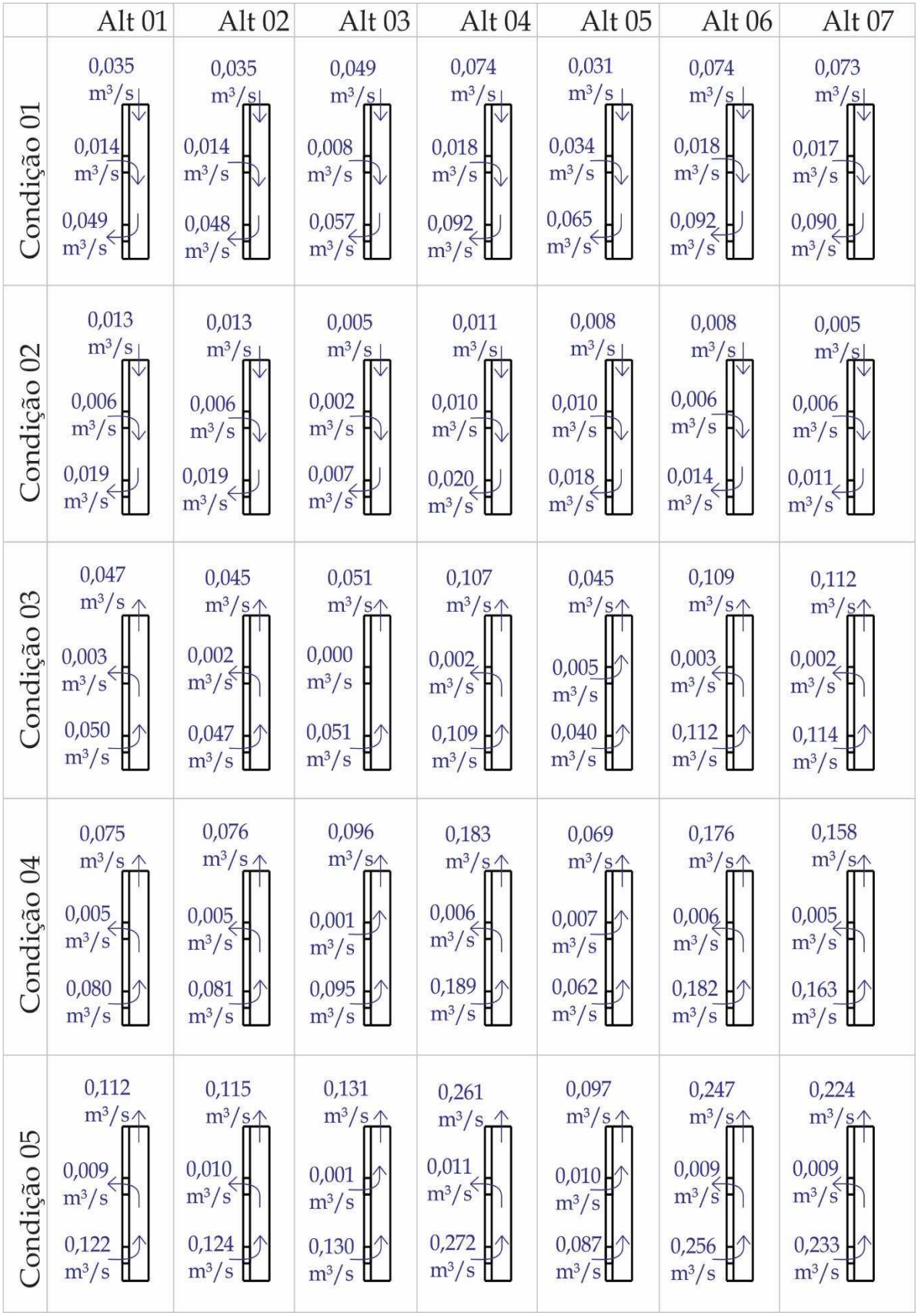
Figura 2.6.8 – Avaliação da malha da Geometria D



Fonte: elaborado pela autora

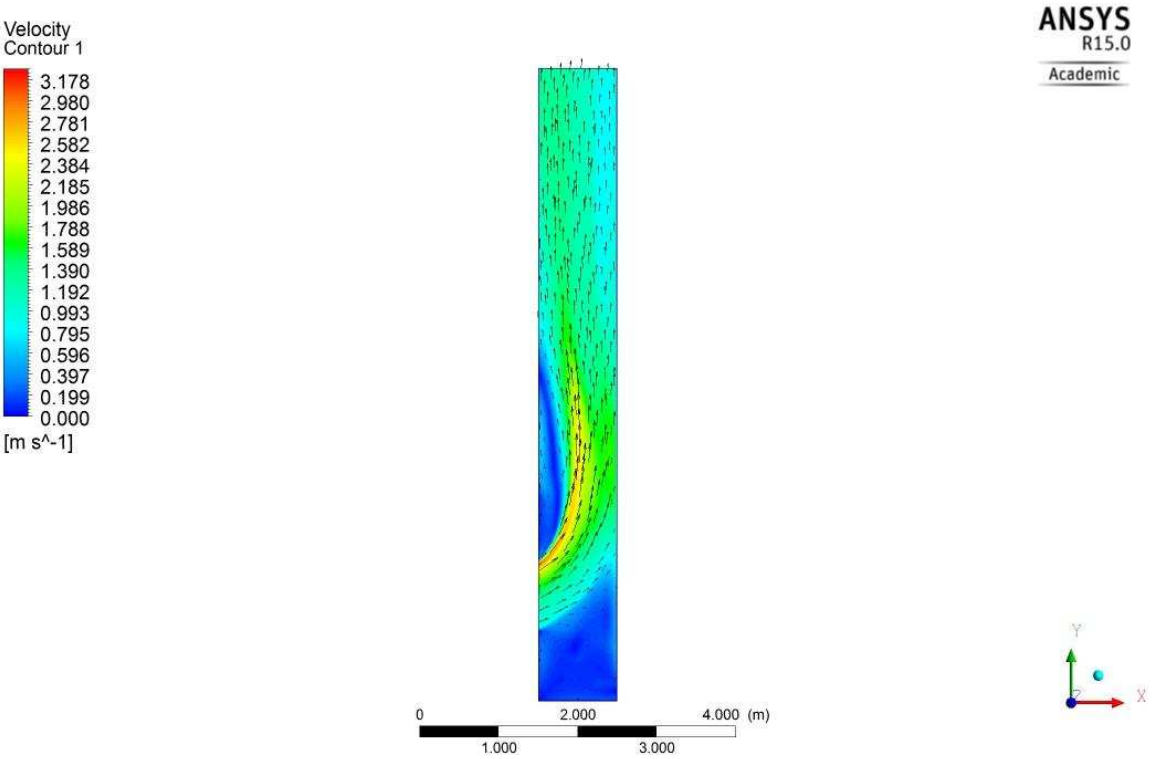
Após a verificação da independência da malha, realizou-se a análise dos resultados da simulação CFD. Esperava-se que a chaminé solar provocasse um fluxo de ar ascendente, o que não ocorreu em todos os casos. A Figura 2.6.9 resume, de forma esquemática, o desempenho da chaminé solar. São apresentadas as vazões e direções do fluxo de ar nas alternativas simuladas para cada condição de temperatura superficial da placa absorvedora. Constatou-se que, para todas as alternativas projetuais, o funcionamento esperado foi alcançado nas situações em que a placa absorvedora apresentou temperatura superficial superior a 30°C (Figura 2.6.10), o que acontece nas Condições 03, 04 e 05 da Tabela 2.6.2. Para as situações nas quais a temperatura da placa absorvedora era igual ou inferior a 27°C, a chaminé apresentou fluxo de ar descendente (Figura 2.6.11). A Figura 2.6.10 mostra os contornos e vetores de velocidade do ar no interior da chaminé solar Alt 07 na Condição 05. Pode-se constatar que a velocidade do ar é superior próximo à abertura do pavimento térreo, ou seja, que a abertura do pavimento superior apresentou pouca influência no desempenho da chaminé. Para as situações em que o fluxo de ar é ascendente, a vazão na abertura do pavimento superior é inferior a 1,0% da vazão na abertura do pavimento térreo, com exceção de Alt 05 em que essa relação chega a 12,5%. Nas situações de temperaturas baixas na placa absorvedora, observou-se que o fluxo de ar proveniente do pavimento superior se junta ao fluxo descendente vindo do topo da chaminé em direção à abertura do térreo (Figura 2.6.12).

Figura 2.6.9 – Esquema das vazões obtidas nas simulações com o Ansys CFX



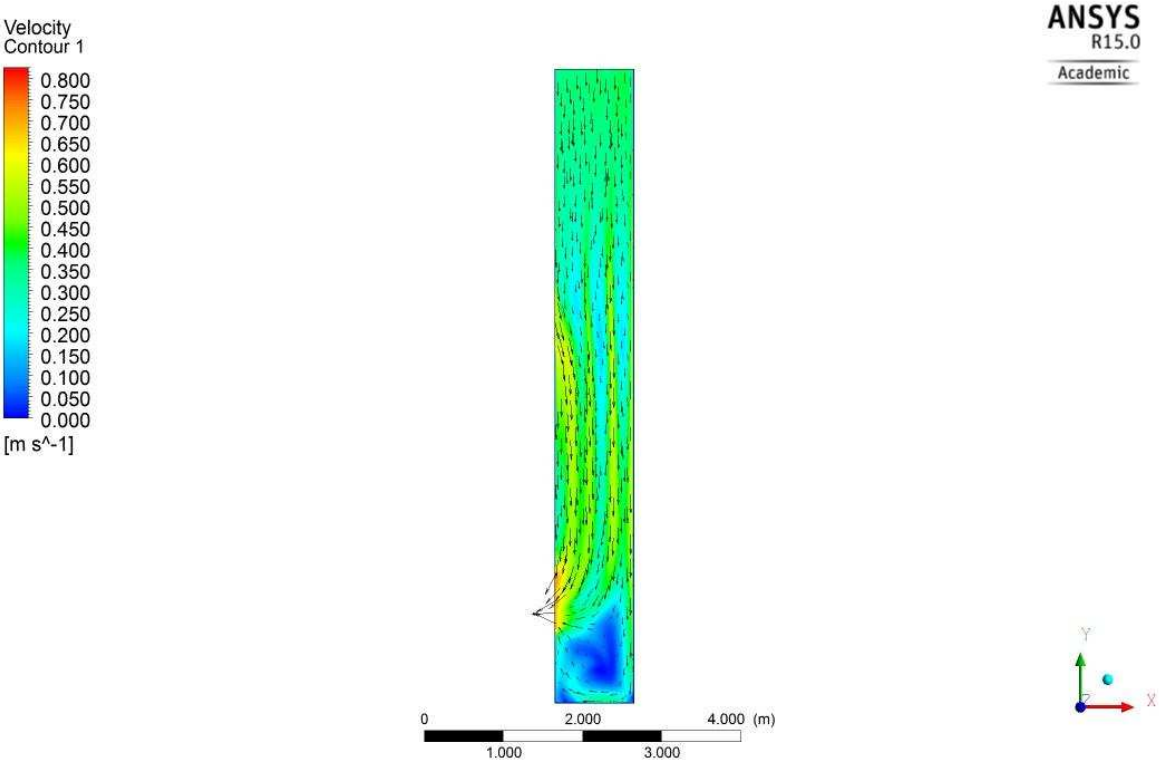
Fonte: elaborado pela autora

Figura 2.6.10 – Contornos de velocidade do ar da Alt 07 na Condição 05 – fluxo ascendente.



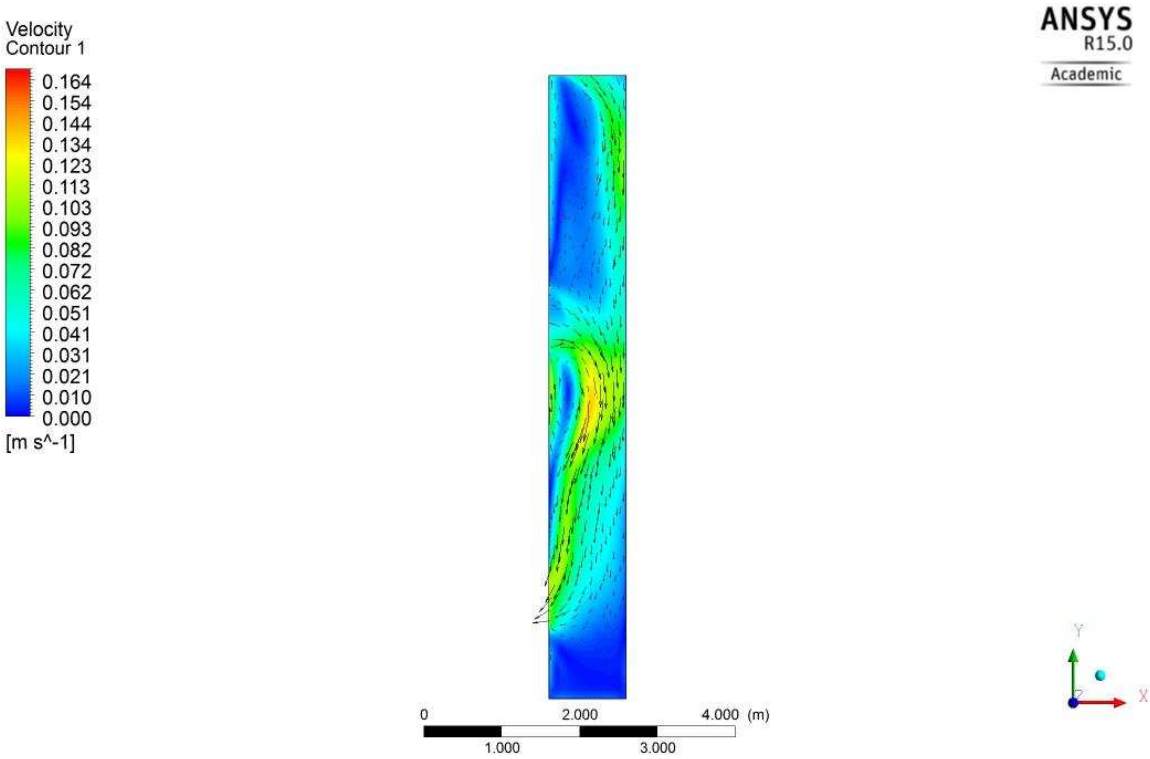
Fonte: elaborado pela autora

Figura 2.6.11 – Contornos de velocidade do ar da Alt 07 na Condição 01 – fluxo descendente.



Fonte: elaborado pela autora

Figura 2.6.12 – Contornos de velocidade do ar da Alt 07 na Condição 02 – fluxo descendente.



Fonte: elaborado pela autora

2.6.3 Comparação entre as simulações com o EnergyPlus e com o Ansys CFX

A partir de uma análise comparativa entre os resultados apresentados pelas simulações, constata-se que o Ansys CFX é mais sensível às variações de temperatura das superfícies internas que o EnergyPlus. As condições de contorno simuladas pelo Ansys CFX foram extraídas dos resultados da simulação do EnergyPlus para cinco condições de temperatura superficiais. A Figura 2.6.13 mostra que os resultados de fluxo de ar na saída da chaminé quando simulada pelo EnergyPlus (marcadores vermelhos) ficaram concentrados em uma faixa estreita entre zero (ausência de fluxo) e 0,08 m³/s. É esperado que o fluxo de ar na chaminé solar seja ascendente, portanto, os valores positivos da Figura 2.6.13 indicam que o fluxo de ar está entrando pelas aberturas das salas e saindo pelo topo da chaminé. Já os valores negativos indicam a ocorrência de fluxo reverso, ou seja, entrada de ar pelo topo da chaminé e saída pelas aberturas para as salas. Observa-se que o modelo de chaminé térmica do EnergyPlus não foi capaz de captar as situações onde o fluxo de ar é reverso. O Ansys CFX (marcadores azuis na Figura 2.6.13), ao contrário, apresentou fluxos descendentes em

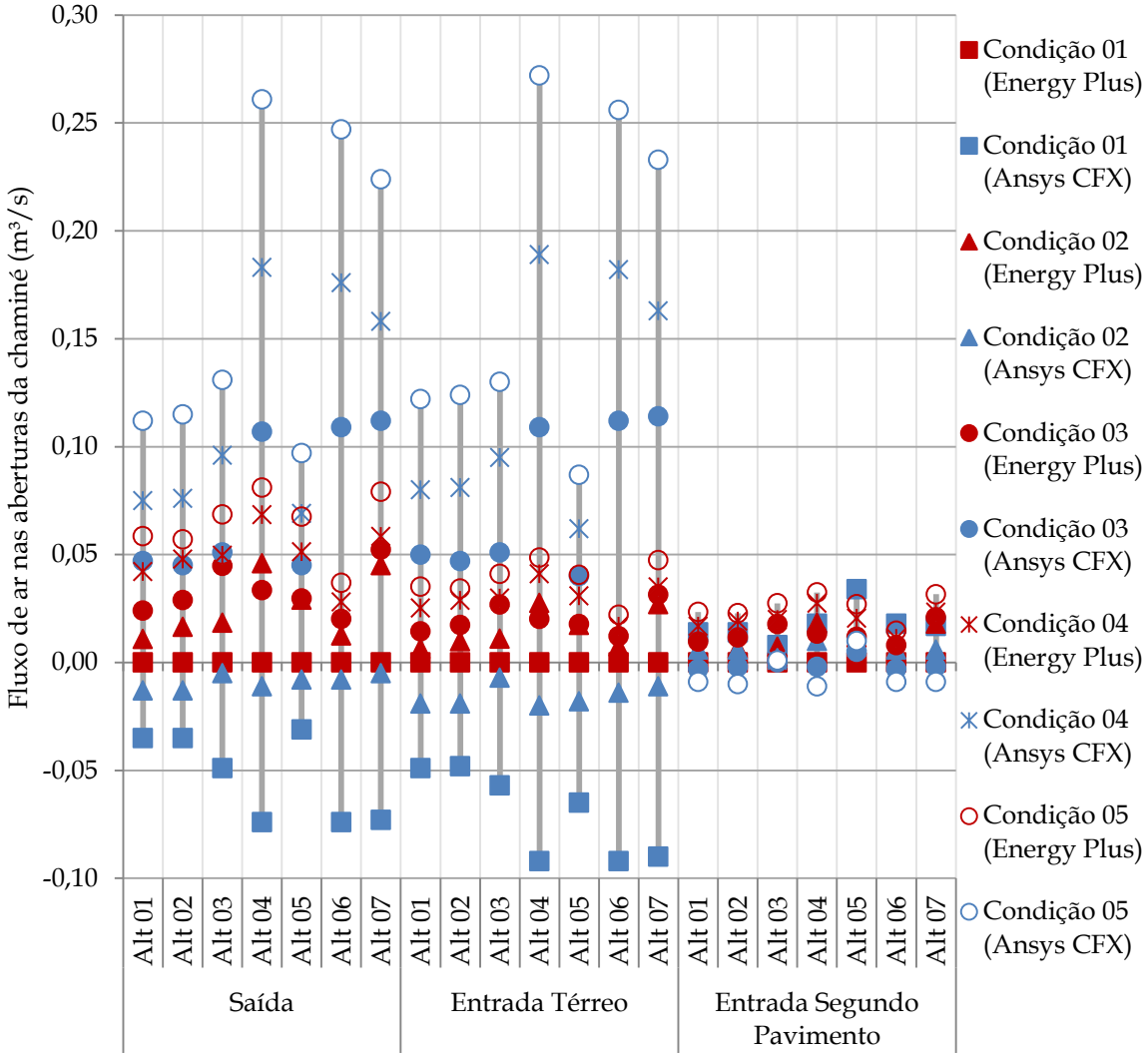
todas as alternativas de projeto analisadas nas situações onde as temperaturas superficiais eram baixas (igual ou inferior a 25°C). Para temperaturas superficiais mais altas (entre 30°C e 78°C) os fluxos de ar obtidos pelo Ansys CFX apresentaram valores mais elevados que com o EnergyPlus. Essa diferença era esperada pelo fato de que o fluxo de ar obtido com o EnergyPlus consiste na média horária, enquanto o fluxo de ar obtido com o Ansys CFX é um dado instantâneo (simulado em regime permanente). Esperava-se que apesar dessa diferença quantitativa, os dois programas apresentassem resultados semelhantes quando avaliados qualitativamente, ou seja, esperava-se que as alternativas que apresentaram o melhor desempenho em um programa também fossem as melhores no outro programa. Entretanto, a Alt 06 que teve o pior desempenho na simulação com o EnergyPlus apresentou um dos melhores desempenhos com o Ansys CFX.

A análise da Figura 2.6.13 permite constatar, ainda, que, quando as entradas de ar dos dois pavimentos estão abertas, a entrada de ar do pavimento superior exerce uma influência muito pequena no volume total de ar movimentado pela chaminé, considerando-se os dados obtidos pela simulação CFD. Com relação aos dados obtidos pelo EnergyPlus, deve-se lembrar que a condição de que o térreo é responsável por 60% e o pavimento superior por 40% do volume de ar que passa pela saída da chaminé foi um dado de entrada da simulação. Sendo essa relação definida pelo usuário, conforme discutido anteriormente.

Com base nesses dados e considerando-se uma demanda de renovação de ar de 17m³/pessoa/hora, quando uma aula prática com 54 alunos e um professor estiver sendo realizada no laboratório do pavimento térreo, tem-se uma necessidade de renovação de ar de 935m³/hora. Pela Figura 2.6.13, tem-se que a chaminé solar Alt 07 na Condição 03, ou seja, na condição cujas temperaturas superficiais apresentam valores medianos, resulta em fluxo de ar no pavimento térreo de 0,114m³/s (ou 410,4m³/hora) quando simulada pelo Ansys CFX e de 0,031m³/s (ou 111,6m³/hora) quando simulada pelo EnergyPlus. Dessa forma, adotando-se números inteiros de chaminés solares, 3 chaminés seriam suficientes para atender a demanda de renovação de ar do laboratório para um mínimo de 50% das horas do ano, considerando-se a taxa de fluxo de ar obtida pelo Ansys CFX. Mas quando se

considera a taxa de fluxo de ar obtida com o EnergyPlus, seriam necessárias 9 chaminés solares para a mesma situação. Apesar das diferenças obtidas com os dois programas, é viável a inserção do número de chaminés solares necessárias para renovação de ar em ambos os casos.

Figura 2.6.13 – Comparação entre a taxa de fluxo de ar na saída da chaminé quando simulada pelo Ansys CFX e pelo EnergyPlus



Fonte: elaborado pela autora

2.7 Conclusão

Por meio das simulações CFD, observou-se que a chaminé solar apresentou seu funcionamento esperado, ou seja, fluxo de ar ascendente no sentido do ambiente para o exterior nas situações onde a temperatura superficial no interior do duto é maior ou igual a 30°C. Para temperaturas mais baixas, foi observado um fluxo de ar descendente, isto é, do exterior para o ambiente interno.

Os resultados obtidos neste estudo indicaram que os programas de simulação predial e CFD apresentaram discrepâncias relevantes. Identificou-se que o modelo de chaminé térmica do EnergyPlus, em comparação com o Ansys CFX, apresentou fluxos de ar menores. Apesar dessa diferença quantitativa, a comparação entre os dois métodos de simulação mostrou que as alternativas que apresentaram os melhores desempenhos em um programa, também foram as melhores no outro programa. A exceção foi a alternativa 06, que embora tenha apresentado o pior desempenho quando simulada pelo EnergyPlus, apresentou um dos melhores desempenhos na simulação com o Ansys CFX. Como a decisão do modelo de chaminé solar a ser construído foi tomada com base nos resultados do EnergyPlus, a alternativa escolhida para construção foi a Alt 07. A Alt 06 teve sua possibilidade de construção eliminada devido ao seu baixo desempenho no EnergyPlus.

Esse fato exemplifica o risco de se tomar decisões projetuais com base nos resultados de simulação não validados. Observou-se que o EnergyPlus não consegue caracterizar o fenômeno quando as temperaturas superficiais são baixas e o fluxo de ar tende a ser descendente. Ainda com relação ao modelo de chaminé térmica do EnergyPlus, os resultados mostraram-se sensíveis à Taxa Relativa de Fluxo de Ar (TRF), um dado de entrada que, em geral, o usuário não tem informações *a priori*. O modelo de simulação CFD também pode apresentar incertezas relativas às configurações feitas pelo usuário, por exemplo, a determinação do modelo de turbulência ou do coeficiente de perda de carga. Diante dessas incertezas, os resultados de simulações de chaminés solares não validados devem ser utilizados com cautela.

Em ambos os programas a chaminé solar mostrou-se adequada ao uso em edificações com a finalidade de renovação de ar, adicionalmente à função de sombreamento. Os resultados obtidos com o EnergyPlus levariam à instalação de um número maior de brise-chaminé solar, enquanto menos elementos atenderiam a demanda de renovação de ar por hora considerando-se o fluxo de ar obtido com o Ansys CFX. O número de elementos necessários para renovação de ar no laboratório do térreo obtido com cada programa, embora discrepantes entre si, demonstra que a utilização do sistema brise-chaminé-solar é possível.

Referências bibliográficas

ABNT. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações: parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2003.

ACRED, A.; HUNT, G. R. A simplified mathematical approach for modelling stack ventilation in multi-compartment buildings. **Building and Environment**, v.71, n. 1, p. 121-130, jan. 2014.

AL-KAYIEM, H. H.; SREEJAYA, K. V.; GILANI, S. I. U. Mathematical analysis of the influence of the chimney height and collector area on the performance of a roof top solar chimney. **Energy and Buildings**, v.68, parte A, p. 305-311, jan. 2014.

AMORI, K. E.; MOHAMMED, S. W. Experimental and numerical studies of solar chimney for natural ventilation in Iraq. **Energy and Buildings**, v.47, n. 1, p. 450-457, abr. 2012.

ANSYS, Inc. **CFX Documentation**. Versão 15.0. Ansys Inc., 2013. Documento eletrônico.

ASFOUR, O. S.; GADI, M. B. A comparison between CFD and Network models for predicting wind-driven ventilation in buildings. **Building and Environment**, v.42, n. 12, p. 4079-4085, dez. 2007.

ASHRAE. **Fundamentals Handbook**. Atlanta, Georgia, 2001.

BARBETTA, P. A. **Estatística aplicada às Ciências Sociais**. 7. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2011.

BASTOS, L. E. G.; BARROSO-KRAUSE, C.; BECK, L. Estratégias da ventilação natural em edificações de interesse social e a norma ABNT 15220-3: zoneamento bioclimático x potencial eólico brasileiro. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9.; ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 5., 2007, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: Antac, 2007. p. 172-180.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Eficiência energética em habitações de interesse social**. Brasília, 2005. 113 p. Disponível em: <http://www.capacidades.gov.br/biblioteca/detalhar/id/132/titulo/Cadernos+MCidades+9+-+Eficiencia+Energetica+em+Habitacoes+de+Interesse+Social>. Acesso em: 22 jul. 2014.

CHARVAT, P.; JICHA, M.; STETINA, J. Solar chimneys for ventilation and passive cooling. In: WORLD RENEWABLE ENERGY CONGRESS, 8., 2004, Denver. **Anais...** Denver: NREL, 2004. p. 01-05.

CHEN, W.; QU, M. Analysis of the heat transfer and airflow in solar chimney drying system with porous absorber. **Renewable Energy**, v.63, n. 1, p. 511-518, mar. 2014.

CÓSTOLA, D.; ALUCCI, M. P.; ETHERIDGE, D. Caracterização de janelas no cálculo de vazão por meio de coeficiente de descarga. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10.; ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 6., 2009, Natal. **Anais...** Natal: Antac, 2009. p. 829-836.

ENERGYPLUS. **EnergyPlus Documentation**. Versão 8.0. U. S. Department of Energy, abr. 2013. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus >. Acesso em: 25 nov. 2013.

FOX, R. W.; McDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. Tradução de Ricardo Nicolau Nassar Koury, Geraldo Augusto Campolina França. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

HAJDUKIEWICZ, M.; GERON, M.; KEANE, M. M. Formal calibration methodology for CFD models of naturally ventilated indoor environments. **Building and Environment**, v.59, n. 1, p. 290-302, jan. 2013.

HU, J.; SUN, X.; XU, J.; LI, Z. Numerical analysis of mechanical ventilation solar air collector with internal baffles. **Energy and Buildings**, v.62, n. 1, p. 230-238, jul. 2013.

KASAEIAN, A.; GHALAMCHI, M.; GHALAMCHI, M. Simulation and optimization of geometric parameters of a solar chimney in Tehran. **Energy Conversion and Management**, v.83, n. 1, p. 28-34, jul. 2014.

KHANAL, R.; LEI, C. A scaling investigation of the laminar convective flow in a solar chimney for natural ventilation. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v.45, n. 1, p. 98-108, fev. 2014.

LI, Y.; LIU, S. Numerical study on thermal behaviors of a solar chimney incorporated with PCM. **Energy and Buildings**, v.80, n. 1, p. 406-414, set. 2014.

MEGRI, A. C.; HAGHIGHAT, F. Zonal Modeling for Simulating Indoor Environment of Buildings: Review, Recent Developments, and Applications. **HVAC&R Research,** London, UK, v.13, n.6, p. 887-905, 2007.

MINGOTTI, N.; CHENVIDYAKARN, T.; WOODS, A. W. The fluid mechanics of the natural ventilation of a narrow-cavity double-skin facade. **Building and Environment**, v.46, n. 4, p. 807-823, abr. 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.

PATEL, S. K.; PRASAD, D.; AHMED, M. R. Computational studies on the effect of geometric parameters on the performance of a solar chimney power plant. **Energy Conversion and Management**, v.77, n. 1, p. 424-431, jan. 2014.

SEYTIER, C.; NARAGHI, M. H. Combined convective-radiative thermal analysis of an inclined rooftop solar chimney. **Journal of Solar Energy Engineering**, v.135, n. 1, p. 110081-110088, fev. 2013.

SREBRIC, J. Ventilation performance prediction. In: HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. (Org.). **Building Performance Simulation for Design and Operation**. Abingdon: Spon Press, 2011. cap. 6, p. 143-179.

YUSOFF, W. F. M.; SALLEH, E.; ADAM, N. M.; SAPIAN, A. R.; SULAIMAN, M. Y. Enhancement of stack ventilation in hot and humid climate using a combination of roof solar collector and vertical stack. **Building and Environment**, v.45, n. 10, p. 2296-2308, out. 2010.

ZHAI, X. Q.; SONG, Z. P.; WANG, R. Z. A review for the applications of solar chimneys in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.15, n. 8, p. 3757-3767, out. 2011.

CAPÍTULO III

3 Simulação CFD comparada com dados experimentais para análise de desempenho de chaminé solar

Resumo

A simulação CFD consiste em uma ferramenta poderosa para o estudo de ventilação em edificações. Entretanto, a verificação dos resultados é necessária para certificar que os aspectos físicos relevantes foram abordados pelo modelo. Este artigo tem como objetivo avaliar as diferenças da simulação CFD em comparação com dados reais de fluxo de ar provocado por uma chaminé solar. O protótipo dessa chaminé solar foi construído em escala real e é constituído de uma placa vertical composta de múltiplas camadas: uma superfície envidraçada, uma cavidade por onde o ar flui e uma placa absorvedora. Quando a placa absorvedora aquece, a temperatura do ar no interior da chaminé aumenta, a densidade do ar diminui e ele tende a subir, sendo substituído pelo ar proveniente do interior do ambiente. Para avaliar o funcionamento da chaminé solar sob diferentes condições de contorno, medições foram realizadas em dias ensolarados durante o período da tarde. Foram medidas as temperaturas superficiais no interior da chaminé, a temperatura e velocidade do ar na entrada da chaminé e a radiação solar incidente. A chaminé solar foi simulada por meio do programa Ansys CFX versão 15.0. As condições de contorno foram obtidas com as medições no modelo real. As diferenças da simulação foram avaliadas comparando-se a velocidade do ar medida na entrada da chaminé com o mesmo parâmetro resultado da simulação CFD. Na maioria dos casos, o valor da velocidade do ar simulado encontrou-se dentro do intervalo obtido experimentalmente. O desempenho da chaminé solar foi avaliado por simulação em quatro condições de temperatura superficial e três alturas da chaminé. As taxas de fluxo de ar obtidas chegaram a 0,305 m³/s. Observou-se que o fluxo de ar apresenta um coeficiente de correlação acima de 99% tanto com a altura da chaminé quanto com a temperatura superficial da placa. Dessa forma, pode-se concluir que a chaminé apresenta um potencial de aplicação em edificações desde que sejam previamente dimensionadas, levando em consideração a demanda do ambiente por renovação de ar, suas dimensões e a disponibilidade de radiação solar do local.

3.1 Introdução

Considerando-se as necessidades de conforto ambiental em ambientes de ensino, o Capítulo II propôs um dispositivo de sombreamento em forma de chaminé solar. Tal proposta busca conciliar o sombreamento (diminuição do ganho de calor por radiação solar) aos efeitos da ventilação na redução da carga térmica no interior do ambiente. Além de seus efeitos térmicos, o dispositivo proposto pode contribuir também na qualidade do ar interno, uma vez que proporciona renovação de ar. Soma-se a tais benefícios, o fato que esse dispositivo funciona por meio da captação de radiação solar, ou seja, não consome energia em forma de eletricidade, e ainda contribui na redução do uso de equipamentos elétricos para condicionamento de ar.

A necessidade de sombreamento e o desempenho do sistema de chaminé solar são dependentes da radiação solar. Li e Liu (2014) realizaram um estudo numérico utilizando um modelo de uma chaminé solar no qual avaliaram o desempenho da chaminé sob radiações de 100 a 800 W/m², e mostraram que para radiações inferiores a 500 W/m² o sistema requer o estudo de técnicas mais efetivas para melhorar seu desempenho. Já Al-Kayiem, Sreejaya e Gilani (2014) analisaram um sistema de chaminé solar sobre telhado inclinado e identificaram que o desempenho do sistema é baixo para taxas de radiação até 400 W/m². Com relação à função de proteções solares, Santos e Souza (2012) trabalharam com o sombreamento das aberturas para incidência solar superior a 600 W/m². Esses valores são indicativos do potencial de funcionamento da chaminé solar em situações que necessitam de proteção solar.

Para identificar em que medida o dispositivo proposto contribui nos aspectos citados acima, é fundamental que procedimentos de teste sejam sistematizados. Esse artigo descreve os métodos de simulação CFD (*Computational Fluid Dynamics*) e compara com dados experimentais adotados na avaliação do dispositivo.

A simulação CFD constitui uma abordagem da mecânica dos fluidos que atua ao lado da teoria e experimentação, ajudando a interpretar e entender os resultados teóricos e experimentais, e vice-versa (ANDERSON, 1995). Segundo esse autor, estudos experimentais da dinâmica dos fluidos começaram a ser realizados no século XVII. Nos séculos XVIII e XIX houve um desenvolvimento gradual da dinâmica dos fluidos teórica. Em decorrência, durante a maior parte do século XX, os estudos de

dinâmica dos fluidos envolviam ora a teoria pura, ora a experimentação pura (ANDERSON, 1995). Nesse contexto, Anderson (1995) afirma que a dinâmica dos fluidos computacional revolucionou o modo de estudar e praticar a dinâmica dos fluidos. Entretanto, Anderson (1995) ressalta que embora a dinâmica dos fluidos computacional seja uma abordagem que complementa sinergicamente as outras abordagens (puramente teórica e puramente experimental), a simulação CFD nunca substituirá as outras duas.

Entre os benefícios da simulação CFD, Srebric (2000) destaca o seu baixo custo, pois os computadores modernos podem lidar com problemas relativamente complicados de um ambiente interno e oferecem resultados informativos para qualquer ponto localizado no ambiente. Chen e Srebric (2002) indicam que um dos usos do CFD tem sido na melhoria do projeto de ambientes construídos, com a redução de custos iniciais e operacionais dos sistemas utilizados nas edificações e aumento da produtividade dos ocupantes.

3.2 Objetivo

Este artigo tem como objetivo avaliar as diferenças da simulação CFD em comparação com os dados reais de fluxo de ar provocado por uma chaminé solar.

3.3 Simulação CFD

A simulação da dinâmica de fluidos computacional pode ser feita por meio de códigos comerciais (GAN, 2010; ASFOUR; GADI, 2007; MONTAZERI; BLOCKEN, 2013; HAJDUKIEWICZ; GERON; KEANE, 2013) ou desenvolvidos pelo próprio simulador (GIJÓN-RIVERA *et al.*, 2013). De forma simplificada, a simulação CFD é uma solução numérica de equações de transferência de massa, momento (equações de Navier-Stokes), energia e concentração de partículas (SREBRIC, 2000). Srebric (2000) afirma que o método de simulação CFD mais utilizado é Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) com modelos de turbulência. O modelo de turbulência consiste em uma aproximação dos parâmetros de fluxo que tornam a simulação viável para a velocidade e capacidade dos computadores atuais. Segundo Srebric (2000), essa aproximação pode gerar incertezas para os resultados da simulação e,

portanto, é necessário avaliar cuidadosamente os modelos de turbulência e suas premissas ao utilizá-los na solução de problemas de fluxo de ar.

Diferentes modelos de turbulência são discutidos na literatura, sendo os modelos k-ε recomendados para simulações de fluxos de ar em edificações (ASFOUR; GADI, 2007). Chen (1995) avaliou o desempenho de cinco modelos de turbulência k-ε em um estudo validado com dados experimentais da literatura e identificou que o modelo RNG k-ε apresentou resultados ligeiramente melhores que o modelo Standard k-ε. Os outros três modelos (Low-Reynolds-number k-ε, Two-layer k-ε e Two-scale k-ε) não apresentaram estabilidade. Dessa forma, Chen (1995) recomenda o modelo de turbulência RNG k-ε para simulações de fluxo de ar interno. Rohdin e Moshfegh (2007) também comparam o desempenho dos modelos de turbulência Standard k-ε, RNG k-ε e Realizable k-ε e identificaram que o modelo RNG k-ε apresentou maior proximidade dos dados medidos em um ambiente industrial.

A maioria dos programas computacionais e códigos disponíveis realiza uma sequência de modelagem e simulação. Inicia-se pela modelagem tridimensional da região de interesse, em seguida definem-se quais são as regiões de fluxo de fluidos, quais são as superfícies sólidas e, então, as propriedades da malha são configuradas. Por malha, entende-se o conjunto de elementos em que o fluido é subdividido. Para cada vértice desses elementos as equações são resolvidas iterativamente. Dessa forma, recomenda-se que, nos locais onde o desempenho do fluido apresente maior interesse ou maior complexidade, haja um número maior de elementos. Para alcançar tal objetivo, o tamanho e forma dos elementos podem ser variados. Definidas as características da malha, passa-se então a configurar as propriedades do fluido e as condições de contorno. Em geral, as condições de contorno definem um problema físico em uma situação específica (CHEN; SREBRIC, 2002). A etapa seguinte consiste na solução numérica das equações, que, em geral, é feita pelo método dos volumes finitos. Como as equações governantes não são lineares, o resultado da simulação só converge após algumas iterações da simulação. A convergência é definida por critérios como o balanceamento das equações de conservação e o decréscimo

constante do erro residual (BACHAROUDIS *et al.*, 2007). Por fim, os resultados são disponibilizados para análise.

Asfour e Gadi (2007) afirmam que as etapas que foram mais desafiadoras em seu estudo sobre as características de domos na ventilação por ação de ventos, consistiram na simulação do volume de ar externo ao edifício e na criação de uma malha adequada em termos de qualidade e resolução. Para lidar com esses desafios, eles realizaram um trabalho extensivo antes do estudo de modelagem para demonstrar as diferentes opções que levariam a solução a convergir. Com esse estudo, Asfour e Gadi (2007) obtiveram que o ambiente externo deve ter, minimamente, 3,75 vezes a dimensão do maior lado do edifício analisado. Essa dimensão é válida para incidência normal de ventos. Em caso de incidência de ventos oblíqua, essa dimensão deve ser aumentada para até 6 vezes a maior dimensão do edifício. Com relação à altura, o ambiente externo foi modelado para 4 vezes a altura do edifício. Esse volume de ar externo foi, ainda, subdividido em zonas para permitir a criação de uma hierarquia no tamanho dos elementos da malha.

Com relação ao tipo e tamanho de malha adotados, Asfour e Gadi (2007) estabeleceram um limite máximo de meio milhão de elementos. Como o uso de simetria não foi possível, pois as janelas do edifício analisado por eles estavam dispostas de maneira não uniforme, utilizou-se hierarquia no tamanho da malha. O tipo de malha adotado foi o tetraédrico, sendo que cuidado especial foi dado às aberturas da edificação onde a taxa de fluxo de ar é registrada.

Blocken (2015) afirma que em muitos casos, pouco tempo é dedicado à geração de uma malha de qualidade, o que acarreta em resultados inferiores e/ou problemas de convergência. Segundo Blocken (2015), duas características que definem uma malha de qualidade são o refinamento geral da malha e a qualidade das células.

De acordo com Ortega (2011), a precisão das soluções depende de muitos fatores como o tamanho das células, o número de iterações, as condições de contorno selecionadas, o tamanho do domínio, os modelos selecionados (turbulência, radiação ou materiais), o tipo de discretização usada (primeira ordem, segunda ordem, etc.) e outros fatores. Dessa forma, um método de solução padrão não existe e é necessário

um estudo aprofundado das propriedades e condições de cada problema e em muitos casos uma validação com resultados experimentais é recomendada (ORTEGA, 2011).

3.4 Confiabilidade dos resultados de simulação CFD

Nos últimos anos, a simulação CFD tem se estabelecido como uma ferramenta poderosa e popular de análise de edificações e áreas urbanas. Entretanto, a confiabilidade dos resultados permanece sendo uma preocupação (HAJDUKIEWICZ; GERON; KEANE, 2013; BLOCKEN, 2015).

Chen e Srebric (2002) afirmam que modelos CFD necessitam ser verificados e validados nos seguintes aspectos: transferência de calor, fluxo de ar, modelos de turbulência, métodos numéricos e avaliação das estimativas. A verificação é necessária para certificar que os aspectos físicos relevantes foram abordados. Já a validação é necessária para demonstrar que o simulador pode modelar com sucesso problemas para os quais existem dados experimentais disponíveis (CHEN; SREBRIC, 2002).

Hajdukiewicz, Geron e Keane (2013) explicam que o critério de validação depende do ambiente modelado; por exemplo, escritórios requerem conforto para os ocupantes, enquanto salas de equipamentos demandam condições internas rigorosas. Analogamente, Chen e Srebric (2002) exemplificam que uma simulação de incêndio requer uma precisão da temperatura do ar muito menor do que um estudo de conforto térmico em ambiente interno. Em seu estudo, Hajdukiewicz, Geron e Keane (2013) determinaram diferenças absolutas entre a temperatura e a velocidade do ar medidas e as simuladas como os critérios de validação de uma sala de estudos com um ocupante. Quando o modelo alcança o critério de validação, ele é considerado uma representação verdadeira do ambiente real. Se o critério não é alcançado, uma análise paramétrica deve ser realizada. A análise paramétrica permite identificar qual condição de contorno exerce maior influência nos resultados. Em seguida, passa-se ao processo de melhoria na concordância entre os dados experimentais e simulados por meio do ajuste dos dados de entrada mais relevantes. Essa etapa deve ser

repetida até que o modelo CFD alcance o critério de validação para representar o ambiente real (HAJDUKIEWICZ; GERON; KEANE, 2013).

Segundo Hajdukiewicz, Geron e Keane (2013), um modelo CFD pode ser validado com dados obtidos de três formas: modelos analíticos ou empíricos; medições em modelos controlados em laboratórios em escala reduzida ou em tamanho natural; e medições em ambientes reais.

Blocken (2015) afirma que a principal vantagem das medições de campo é que elas permitem capturar a real complexidade do problema em estudo. Entre as desvantagens, Blocken (2015) aponta o fato de não serem completamente controláveis devido à inerente variabilidade das condições meteorológicas e de que, geralmente, apenas medições pontuais são realizadas. Chen e Srebric (2002) explicam que, frequentemente, os modelos físicos são complicados por questões como fluxos de calor simultâneos (como condução de calor pela envoltória, ganhos de calor de objetos aquecidos no ambiente, radiação solar através das aberturas do ambiente), mudanças de fase (como evaporações ou condensações), reações químicas (como combustões), movimentos mecânicos (como ventiladores ou movimento dos ocupantes).

A validação de simulações com dados reais é complicada pela incerteza nos parâmetros de entrada requeridos para configurar a simulação. Existe apenas um número limitado de dados disponível para inferir as condições de entrada que devem ser especificadas na simulação, e é impossível representar por meio de qualquer modelo numérico o nível de detalhamento presente na realidade (GARCÍA-SÁNCHEZ; PHILIPS; GORLÉ, 2014). Um exemplo da dificuldade de se reproduzir numericamente uma situação real é relatado por Ray *et al.* (2014). Em seu experimento acerca do efeito chaminé em um átrio, observou-se um fluxo descendente inesperado. Esse fluxo decorreu da velocidade do ar no exterior da edificação que gerou alta pressão sobre a abertura e carregou para o átrio ar condicionado artificialmente em uma ala da edificação fora da zona controlada no experimento. Isso fez com que uma taxa de fluxo de ar tivesse que ser especificada como condição de contorno, levando em consideração os fluxos de ar e as temperaturas medidas. Com essa condição de contorno, a distribuição de

temperatura e os níveis de velocidade dentro do átrio puderam ser utilizados para julgar as simulações CFD. Entretanto, a comparação entre as taxas de fluxo de ar previstas e medidas foram impossibilitadas.

Chen e Srebric (2002) explicam que, idealmente, a validação deve ser realizada para o sistema completo do ambiente, o que inclui todos os fluxos de ar, processos de transferência de calor e configuração detalhada da geometria. Entretanto, os processos de medição podem acumular erros, incertezas e conter pouca informação sobre as condições de contorno iniciais. Dessa forma, a adoção de premissas pode ser necessária para tornar possível a simulação CFD (CHEN; SREBRIC, 2002).

A forma de medir a precisão da representação da realidade é a comparação sistemática da simulação CFD com os dados experimentais. Os sistemas de ambientes internos usados em validações são geralmente complicados e os dados experimentais correspondentes podem conter vieses e erros aleatórios. Esses erros devem ser reportados como parte da validação. No caso de erros desconhecidos, um relato dos equipamentos usados nas medições pode ser útil para avaliar a qualidade dos dados. Embora seja desejável, a obtenção de dados experimentais de qualidade para o sistema completo é uma tarefa cara e que demanda tempo (CHEN, SREBRIC, 2002). Dessa forma, Chen e Srebric (2002) afirmam que uma vez que as tendências observadas sejam consistentes, uma precisão menor pode ser aceita.

3.5 Método

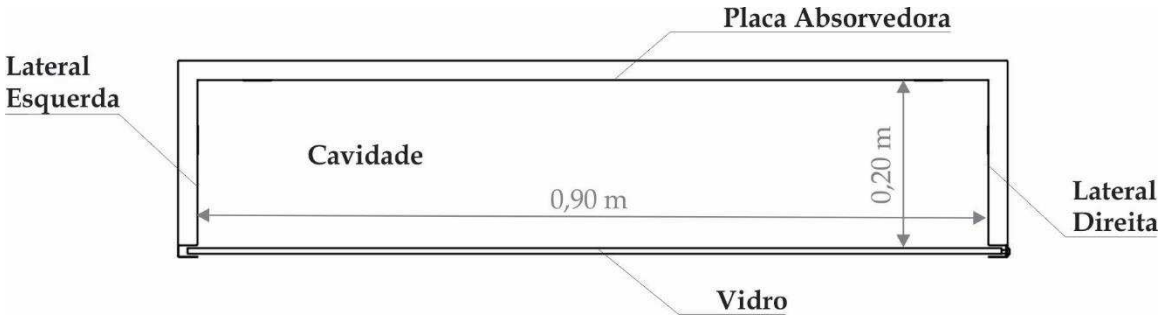
O método adotado neste trabalho inicia-se com medições na chaminé solar construída para analisar as diferenças entre os dados experimentais e os dados obtidos por meio de simulação CFD. Uma vez que os dados simulados sejam considerados coerentes, novas simulações foram realizadas a fim de analisar a influência da altura da chaminé no fluxo de ar provocado pela mesma.

3.5.1 O brise-chaminé-solar

A proteção solar em estudo é constituída de uma placa vertical composta de múltiplas camadas: uma superfície envidraçada, uma cavidade por onde o ar flui e uma placa absorvedora (Figura 3.5.1). 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 baixas absortâncias solar e da luz visível e tem a função de refletir a radiação externa, bem como bloquear a radiação térmica emitida pela placa absorvedora.

Figura 3.5.1 – Seção horizontal da proteção solar



Fonte: elaborado pela autora

Além da função de sombrear as aberturas da edificação, essa proteção solar (Figura 3.5.2) utiliza o conceito de chaminé solar para aumentar a ventilação natural em edificações. A placa aquecida aumenta a temperatura do ar no interior da chaminé. O ar tem sua densidade diminuída e tende a subir, sendo substituído pelo ar proveniente do interior do ambiente.

Figura 3.5.2 – Vista geral da chaminé solar (a) e sombreamento gerado (b)

(a) (b)

Fonte: acervo da autora

A chaminé solar está localizada na fachada oeste e encontra-se conectada aos ambientes de dois pavimentos. O laboratório do pavimento térreo possui área de

107,8 m² e volume de 339,6 m³ enquanto o laboratório do pavimento superior tem área de 91,3 m² e volume de 287,6m³. Ambos os laboratórios possuem janelas tanto na fachada da proteção solar (oeste) quanto na fachada oposta (leste). A cavidade da chaminé solar está conectada ao interior do ambiente por uma abertura composta de oito vãos separados por esquadrias sem vidros, conforme Figura 3.5.3. Na Figura 3.5.3 (a) pode-se observar ainda as fitas que foram fixadas no forro para indicar a direção do vento.

Figura 3.5.3 – Abertura utilizada para medições, onde se vê os oito vãos cujos vidros foram removidos internamente (a) e a conexão externa a estes vãos (b)

(a) (b)

Fonte: acervo da autora

3.5.2 Método de medição

Por se tratar de um protótipo em escala real inserido em uma edificação já existente, há uma série de fatores que não foi possível controlar durante as medições. Entre esses fatores, destacam-se a variação da velocidade do vento e o fluxo de calor nos fechamentos da edificação e da proteção solar. Apesar dessas limitações, que são inerentes à condição real do protótipo, o processo de medição foi planejado para a obtenção de dados com a exatidão necessária para a avaliação do funcionamento do dispositivo de proteção solar e, posteriormente, para a verificação das simulações CFD.

Os instrumentos utilizados para medição são apresentados no Quadro 3.6.1. Além desses instrumentos, foram utilizados como materiais complementares placas para fechamento das aberturas e fita adesiva para lacrar frestas. Utilizou-se, ainda, fitas cassete com 1 m de comprimento presas no forro da sala para indicar o sentido da ventilação. Antes do início da coleta de dados propriamente dita, foram realizados testes para calibração dos termopares (1) e definição dos pontos de

medição de velocidade e temperatura do ar (2). A medição de velocidade de ar em um único ponto de cada abertura consiste em uma limitação do trabalho, uma vez que o perfil de velocidade não é uniforme, entretanto a quantidade de anemômetros disponível não permitiu a realização de medições simultâneas em uma malha de pontos.

Quadro 3.6.1 – Parâmetros medidos e seus respectivos instrumentos

Parâmetro	**Instrumento**	**Incerteza de medição**
Velocidade do ar na entrada da chaminé	Anemômetro de fio quente	±3% do valor medido ±0,05m/s
Temperatura do ar na entrada da chaminé	Anemômetro de fio quente	±0,4% do valor medido ±0,3°C
Temperatura superficial interior da chaminé	Termopares tipo T	±0,75% do valor medido ±1,0°C
	Termopares tipo J	±0,75% do valor medido ±2,2°C
	Termopares tipo E	±0,5% do valor medido ±1,7°C
Temperatura do ar externo (janela)	Anemômetro de fio quente	±0,4% do valor medido ±0,3°C
Radiação Solar	Solarímetro	±5% do valor medido

Fonte: elaborado pela autora

O teste inicial (1) foi realizado com a finalidade de verificar se a variação das temperaturas obtidas pelos termopares sob mesmas condições encontrava-se dentro de limites aceitáveis. Recorreu-se à literatura para identificar a variação aceitável e observou-se que termopares com incerteza de mais ou menos 0,50°C em diferentes condições de temperatura são considerados calibrados (SHAHREZA; INANI, 2015). Foram realizadas medições nas quais os termopares registraram a temperatura da água no interior de um recipiente e a temperatura superficial de uma placa metálica.

Considerando-se que as aberturas de entrada de ar da chaminé possuem esquadrias compostas por oito vãos, um teste (2) foi realizado a fim de verificar a variação da velocidade do ar nesses vãos e definir o vão que melhor representa a abertura como um todo. A quantidade de anemômetros disponível não permitiu a medição simultânea de todos os vãos durantes os testes. Dessa forma, as medições-teste foram realizadas sequencialmente, mantendo-se as seguintes condições de abertura das janelas do ambiente: janelas fechadas (entrada de ar somente através de

frestas), janelas laterais abertas, janelas frontais abertas. A porta foi mantida fechada durante os testes. As medições que se seguiram foram realizadas com o anemômetro fixado de forma que o seu sensor ficasse centralizado nesse vão mais representativo.

Para avaliar o funcionamento da chaminé solar sob diferentes condições de contorno, as medições foram realizadas em dias de sol durante o período da tarde (chaminé recebendo radiação solar) em três situações:

- Situação 01 (T1) – temperatura superficial no interior da saída da chaminé em torno de 10°C acima da temperatura do ar na sala.
- Situação 02 (T2) – temperatura superficial no interior da saída da chaminé em torno de 20°C acima da temperatura do ar na sala.
- Situação 03 (T3) – temperatura do ar na sala reduzida artificialmente (diferença de aproximadamente 15°C entre a temperatura do ar na sala e a temperatura superficial da saída da chaminé).

A partir das três situações descritas, foram estabelecidas as condições de abertura das entradas da chaminé:

- pavimento superior fechado e térreo aberto (0A)
- pavimento superior aberto e térreo fechado (1A)
- pavimento superior e térreo abertos (2A)

As janelas frontais (parede oposta à chaminé solar) foram mantidas abertas durante as medições.

As medições foram realizadas da seguinte maneira:

a) Temperatura e velocidade do ar: foram medidas com o anemômetro fixado no vão que melhor representa a abertura – segundo teste prévio – das entradas da chaminé durante intervalos de 30 segundos, cujos maiores valores foram registrados.

b) Radiação solar: em cada caso medido foi registrada a radiação solar que incide na proteção solar, posicionando o solarímetro na altura da abertura do primeiro pavimento com o sensor apoiado na superfície do vidro.

c) Temperatura superficial: foi registrada por meio de termopares fixados em 10 pontos no interior da chaminé. A localização dos termopares foi definida de acordo com as aberturas da chaminé solar. Na saída da chaminé e na abertura do térreo

foram fixados dois termopares na placa metálica e um no vidro, já na abertura do primeiro pavimento foram fixados três termopares na placa metálica e um no vidro.

A combinação das situações de medição e as condições de abertura resultaram em sete casos, presentes no Quadro 3.6.2. Neste, vê-se também as duas condições de controle, que consistem no uso de uma abertura da janela ao lado da proteção solar para medições idênticas de temperatura e velocidade do ar que por ela passa. Essas medições de controle foram realizadas com a abertura da proteção solar fechada após cada medição na proteção solar. O anemômetro permanece fixado vão correspondente ao que foi fixado na chaminé. As janelas opostas à chaminé solar permanecem abertas.

A ocupação nos locais limitou-se aos pesquisadores:

- Medição em uma sala: 2 pessoas (1 na janela e outra na entrada da chaminé)
- Medição nas duas salas: 3 pessoas para medição simultânea nas duas entradas da chaminé e uma pessoa na janela oposta à chaminé.

Quadro 3.6.2 – Casos medidos e casos correspondentes de controle

Caso	**Situação**	**Condição de abertura**	
		Chaminé	**Janela adjacente (controle)**
T1 – 0A	$T_{CHAMINÉ}$ em torno de 10°C acima de T_{SALA}	pavimento superior fechado e térreo aberto	fechada
T1 – 1A		pavimento superior aberto e térreo fechado	
T1 – 2A		pavimento superior e térreo abertos	
T2 – 0A	$T_{CHAMINÉ}$ em torno de 20°C acima de T_{SALA}	pavimento superior fechado e térreo aberto	
T2 – 1A		pavimento superior aberto e térreo fechado	
T2 – 2A		pavimento superior e térreo abertos	
T3 – 1A	$T_{CHAMINÉ}$ em torno de 15°C acima de T_{SALA}	pavimento superior aberto e térreo fechado	
T1 – 1A*	$T_{CHAMINÉ}$ em torno de 10°C acima de T_{SALA}	pavimento superior aberto e térreo fechado	aberta
T2 – 1A*	$T_{CHAMINÉ}$ em torno de 20°C acima de T_{SALA}	pavimento superior aberto e térreo fechado	

*Medições de controle

Fonte: elaborado pela autora

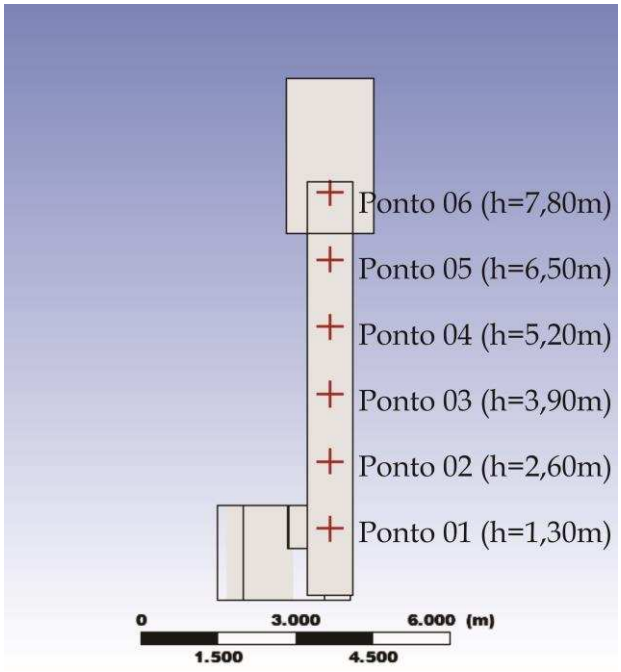
3.5.3 Método de simulação CFD

Os modelos foram simulados por meio do pacote comercial Ansys CFX versão 15.0. Ansys CFX é um código verificado com muitos casos de *benchmark* prevendo o fluxo de ar e transferência de calor nos espaços internos (HAJDUKIEWICZ; GERON; KEANE, 2013). Dessa forma, a verificação do código CFD foi dispensada.

O modelo de simulação inicial foi criado de acordo com a proteção solar construída (Alt 07 do Capítulo II, acrescida dos prolongamentos que conectam a chaminé ao ambiente interno e dos volumes de ar que representam o domínio externo e as salas). As condições de contorno e os dados para verificação das simulações foram obtidos a partir das medições na edificação real em condições de funcionamento normais e exposta às condições ambientais externas. As simulações foram realizadas em regime permanente. O critério adotado para se considerar que a simulação convergiu consiste em um erro residual RMS inferior a 0,0001 para as equações de massa, momento e energia térmica.

Considerando-se que cada elemento a mais na malha acarreta em mais equações para serem resolvidas pelo programa, decidiu-se pela necessidade de reduzir a dimensão dos domínios externos à chaminé e de evitar o refinamento desnecessário da malha. Dessa forma, testes (3) foram realizados a fim de se identificar a influência dos volumes de ar externos e do refinamento da malha nos resultados de fluxo de ar. Três dimensões de domínio externo foram avaliadas. O teste de independência de malha (4) foi realizado utilizando-se 3 refinamentos. A Malha 01 é a que possui o menor refinamento, com 06 elementos na menor dimensão da chaminé, isto é, entre a superfície interna do vidro e a placa absorvedora. A malha 02 apresentou um refinamento médio, com 10 elementos, e a malha 03 foi a mais refinada, com 14 elementos. Os resultados de velocidade do ar simulados com os diferentes refinamentos de malha foram comparados em 6 pontos no interior da chaminé. Esses pontos estão centralizados no eixo da cavidade na largura e na profundidade da chaminé e distribuídos ao longo da sua altura conforme mostrado na Figura 3.5.4. A malha adotada é do tipo hexadominante.

Figura 3.5.4 – Pontos de monitoramento do teste de malha



Fonte: elaborado pela autora

O modelo de turbulência foi escolhido a partir de um teste (5) no qual a chaminé solar foi simulada com os modelos de turbulência RNG k-ε e Standard k-ε utilizando-se condições de contorno que foram medidas. As simulações que se seguiram utilizaram o modelo de turbulência cuja velocidade do ar apresentou maior proximidade dos dados medidos.

Considerando-se que os modelos computacionais são abstrações da chaminé solar construída, algumas aproximações foram adotadas:

- somente a placa absorvedora e o vidro tiveram suas temperaturas superficiais configuradas, com base na média das temperaturas medidas. As demais superfícies foram consideradas adiabáticas;
- a temperatura superficial configurada tanto para a placa absorvedora quanto para o vidro é a média das temperaturas medidas pelos termopares distribuídos no interior da chaminé;
- a entrada de ar foi modelada como um único vão, isto é, as esquadrias que formam os vãos da abertura de entrada da chaminé solar não foram modeladas;
- a velocidade do ar no exterior da edificação e os efeitos de vento foram desconsiderados;

- os casos 1A, quando a abertura do pavimento superior se encontrava aberta e a abertura do térreo estava fechada, foram simulados sem a parte de baixo da chaminé (parte que vai do fundo da chaminé até 0,90m abaixo da abertura do segundo pavimento). Essa simplificação foi feita para facilitar a convergência da simulação, pois se acredita que a massa de ar aquecida no interior da chaminé tendendo a subir, porém sem uma abertura de entrada no térreo para substituição do ar gerou instabilidade na solução numérica.

3.5.4 Comparação entre os dados medidos e simulados

Uma avaliação comparativa foi realizada para demonstrar a habilidade do modelo CFD de prever o desempenho da chaminé solar. Comparou-se a velocidade do ar medida na entrada da chaminé com o mesmo parâmetro obtido por meio de simulação. O critério adotado consiste em identificar se o valor da velocidade do ar simulada se encontrava dentro do intervalo de velocidade do ar obtido durante o período de 30 segundos em que foi realizada a medição. Aceitou-se, ainda, que o valor da velocidade do ar simulada ficasse fora do intervalo medido em até 0,05m/s, uma vez que esta é a precisão do anemômetro utilizado para medição. Quando o modelo alcançou o critério adotado, considerou-se uma representação apurada da realidade.

3.5.5 Avaliação do potencial desempenho de chaminés solares por CFD

Após a identificação de que as simulações CFD encontravam-se coerentes com os dados reais, 15 novas simulações foram realizadas variando-se as temperaturas superficiais da placa absorvedora e do vidro e a altura da chaminé solar. As chaminés foram simuladas com alturas de 2,85m (representando um pavimento), 5,85m (2 pavimentos) e 8,85m (3 pavimentos). Para cada altura, 5 condições de temperatura superficial foram avaliadas (25°C, 45°C, 65°C, 85°C e 105°C).

3.6 Resultados

3.6.1 Verificação dos termopares

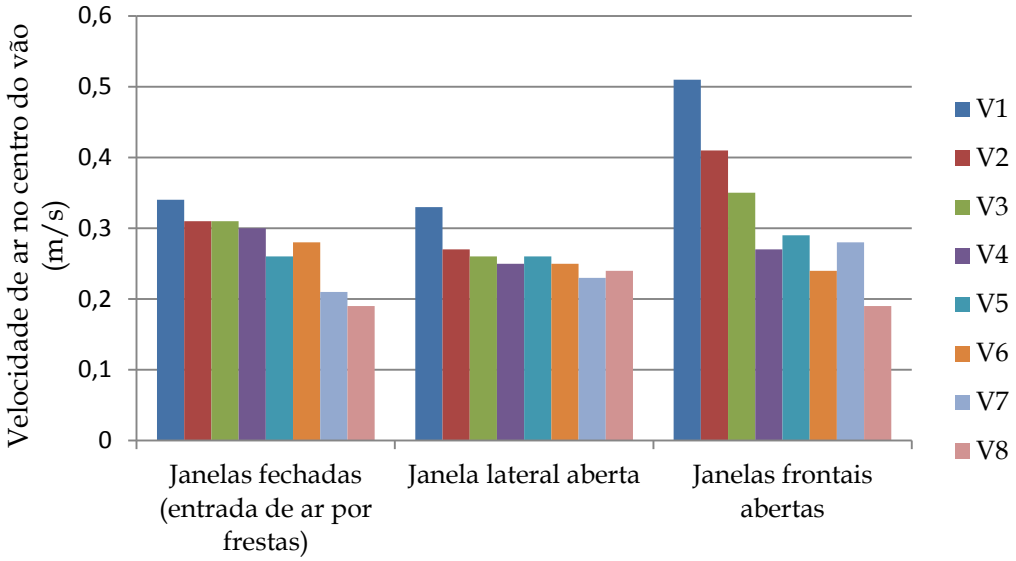
Por meio do teste (1), identificou-se que a diferença máxima entre a maior e a menor temperatura registrada pelos termopares a cada segundo foi de 0,40°C

quando imersos em água e de 0,53°C quando fixados em uma placa metálica. Dessa forma, os termopares foram considerados aptos para serem instalados na chaminé.

3.6.2 Posicionamento do anemômetro e abertura das janelas

Medições-teste nos vãos da esquadria (teste 2) indicaram que a velocidade do ar tende a ser maior nos vãos superiores e da esquerda. Os dados obtidos indicaram que a velocidade do ar no vão V5 (Figura 3.5.3) foi a que mais se aproximou da média da velocidade em todos os vãos nas condições testadas (Figura 3.6.1). Os testes mostraram, ainda, que a velocidade do ar é maior quando as janelas frontais (parede oposta à chaminé solar) encontravam-se abertas. Isso indicava que a vazão da chaminé era limitada quando a área de entrada de ar na sala era pequena, o que acontece quando as janelas estavam fechadas (entrada de ar ocorre através de frestas) e quando somente a janela lateral estava aberta. Dessa forma, as janelas frontais foram mantidas abertas durante as medições que se seguiram.

Figura 3.6.1 – Velocidade do ar nos vãos de entrada da chaminé solar



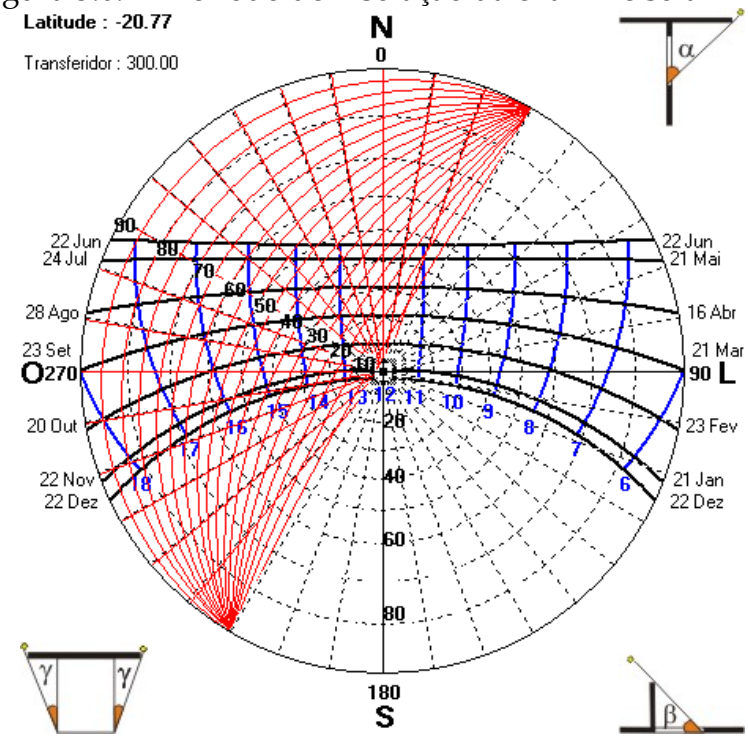
Fonte: elaborado pela autora

3.6.3 Análise preliminar do funcionamento da chaminé solar

A chaminé solar estava voltada para o noroeste (300° N); dessa forma, durante as medições realizadas no mês de abril, o topo da chaminé (onde não há sombreamento da própria edificação) começou a receber a radiação solar direta a partir de aproximadamente 11h da manhã (Figura 3.6.2).

A temperatura superficial no interior do modelo construído foi monitorada durante 3 dias consecutivos em abril de 2015 e foi possível identificar que o período do dia em que a essa temperatura foi mais alta estava compreendido entre as 12h e as 14h (Figura 3.6.3). A partir das 15h, as árvores do entorno começavam a sombrear a proteção solar e a temperatura superficial no interior da chaminé caía rapidamente.

Figura 3.6.2 – Período de insolação da chaminé solar



Fonte: elaborado pela autora

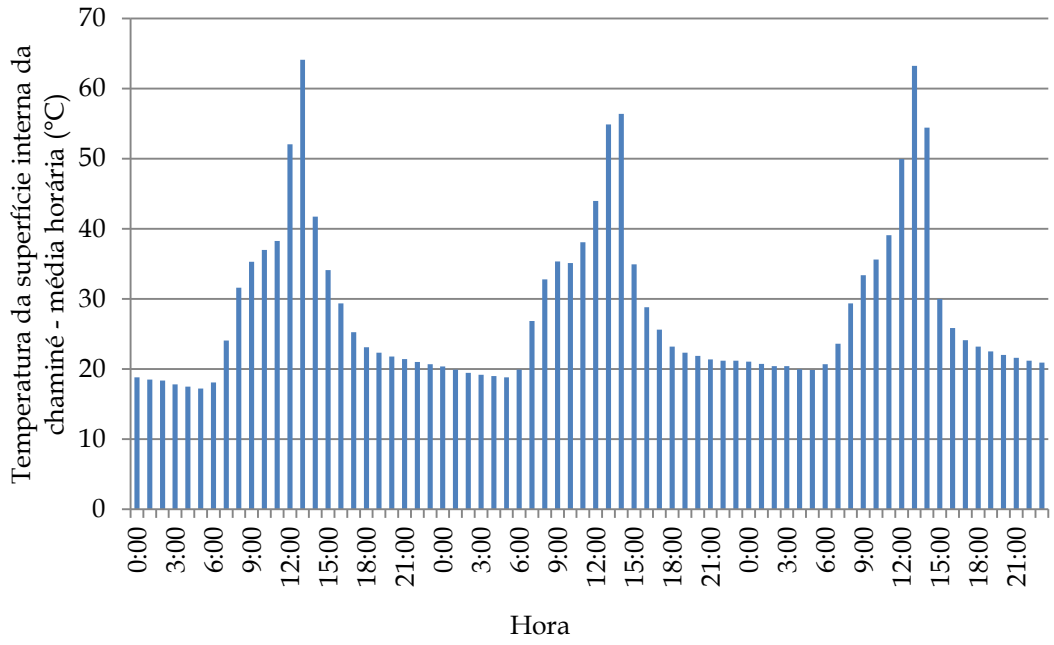
3.6.4 Casos medidos

Durante as medições, na situação T1 e T3, um termopar se desconectou, portanto, a temperatura média da superfície interna da chaminé foi calculada utilizando-se os dados dos 9 termopares restantes. Na situação T2, o termopar foi reconectado e a temperatura média superficial foi calculada como os dados dos 10 termopares.

A condição de aproximadamente 10°C de diferença entre a temperatura da sala e a temperatura superficial na saída da chaminé foi atendida para dar início às medições na situação T1 (no caso T1-2A a temperatura do ar no pavimento térreo era de 24,3°C enquanto a temperatura superficial na saída da chaminé era 34,2°C). Entretanto, a baixa radiação solar observada durante as medições na situação T1 fez

com que a diferença diminuísse para apenas 2,8°C no caso T1-1A e de 6,7°C no caso T1-0A. Além disso, o gradiente de temperatura presente na superfície interna da chaminé, fez com que a média das temperaturas superficiais (dado que foi utilizado como condição de contorno na simulação CFD) ficasse ainda mais baixa (Tabela 3.7.1).

Figura 3.6.3 – Temperatura superficial no interior da chaminé solar



Fonte: elaborado pela autora

Como o fluxo de ar estudado neste trabalho é aquele decorrente do efeito chaminé, que é contínuo, pois as temperaturas na entrada e saída da chaminé não variaram significativamente durante o intervalo de 30 segundos de medição, a velocidade do ar também não deveria sofrer grandes variações. Admitiu-se, portanto, que a velocidade do ar mínima registrada se deveu em função do efeito chaminé e qualquer velocidade de ar que ultrapassasse esse mínimo ocorria em função de algum efeito de vento não controlado.

Dessa forma, embora a velocidade do ar na entrada da chaminé na situação T1 tenha apresentado valores máximos relativamente altos (0,79m/s no caso T1-1A), o valor mínimo se manteve em zero em todos os casos. Isso significou que com as temperaturas superficiais e taxas de radiação solar baixas da situação T1 (Tabela

3.6.1), não se conseguiu caracterizar o efeito da chaminé solar com os instrumentos de medição disponíveis.

Tabela 3.6.1 – Resultado das medições

Caso	Radiação (W/m²)	$T_{SUPERFICIAL}$ no interior da chaminé - média termopares (°C)	$T_{AR\ EXTERNO}$ (°C)	Temperatura do ar na entrada da chaminé (°C)		Velocidade do ar na entrada da chaminé – máximo e mínimo (m/s)	
				Térreo	1° Pvto	Térreo	1° Pvto
T1 – 0A	17	27,1	24,8	24,4	-	0,23 <0,05	-
T1 – 1A	24	27,9	26,9	-	27,3	-	0,79 <0,05
T1 – 2A	10	29,9	26,8	24,3	27,8	0,26 <0,05	0,26 <0,05
T2 – 0A	414	42,9	25,7	25,4	-	0,58 0,31	-
T2 – 1A	500	47,4	26,8	-	27,9	-	0,72 0,33
T2 – 2A	481	46,8	26,8	25,0	27,8	0,45 0,30	0,40 0,21
T3 – 1A	233	34,3	26,9	-	25,7	-	0,48 0,29
T1 –1A*	21	-	26,1	-	25,5	-	0,85* <0,05
T2 –1A*	402	-	26,4	-	26,1	-	0,82* <0,05

*Medições de controle nas quais se observou que o fluxo de ar estava adentrando a sala
Fonte: elaborado pela autora

Na situação T2, a diferença entre a temperatura superficial na saída da chaminé e a temperatura do ar nas entradas da chaminé se manteve acima de 20°C em todos os casos. Observou-se que nessa situação a taxa de radiação solar encontrava-se acima de 400 W/m². Com isso, a velocidade do ar nas entradas da chaminé foi sempre superior a 0,21m/s.

Já na situação T3, quando a sala teve sua temperatura reduzida artificialmente por meio do acionamento do aparelho de ar condicionado, observou-se que a velocidade do ar na entrada da chaminé se manteve superior a 0,29m/s durante o intervalo de medição, mesmo com a taxa de radiação solar relativamente baixa (233 W/m²).

Nas medições de controle realizadas no primeiro pavimento, em uma janela de mesmas dimensões da abertura de entrada da chaminé solar, registrou-se velocidades de ar mínimas iguais a zero e máximas relativamente altas (0,85m/s e 0,82m/s, respectivamente) após as medições das situações T1 e T2. Essa intermitência indicou que a ventilação ocorreu por ação dos ventos. Essa observação foi corroborada pelo fato de que as fitas presas junto ao forro da sala oscilavam no sentido de fora para dentro do ambiente, indicando que o ar estava entrando na sala, ao contrário do que ocorreu na chaminé solar.

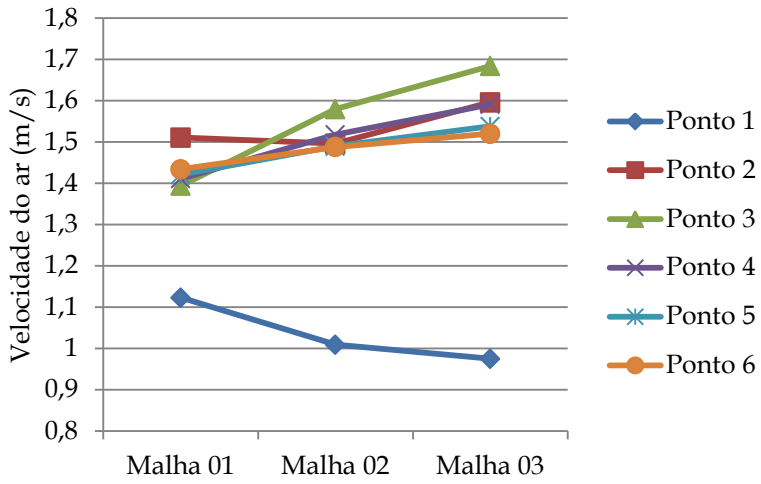
3.6.5 Casos simulados

Para reduzir o custo computacional da simulação, em vez de se modelar o volume real da sala e um domínio externo que envolvesse o conjunto sala-chaminé, foram realizados testes (3) com volumes de ar menores conectados à entrada e à saída da chaminé. As simulações realizadas utilizando o modelo de turbulência RNG k-ε indicaram que a presença do domínio externo gerou um aumento da ordem de 40% na velocidade do ar na entrada da chaminé, quando comparada com a chaminé sem os domínios externos. Entretanto, a partir de um determinado volume, a dimensão dos domínios externos deixou de influenciar nos resultados. Identificou-se que a utilização de um volume de ar de 4,0m³ na entrada da chaminé e um volume de ar de 11,0 m³ na saída da chaminé foi suficiente para representar os fenômenos que ocorrem no interior da chaminé. Quando comparado com volumes maiores, a diferença nos resultados de velocidade do ar não passou de 1%.

O teste (4) de independência de malha foi realizado variando-se o número de elementos da malha e comparando-se os resultados de velocidade do ar em 6 pontos distribuídos no interior da chaminé. Observou-se que da Malha 01 para a Malha 02, a variação máxima na velocidade do ar foi de 11,8% no Ponto 3. Já da Malha 02 para a Malha 03, a variação máxima foi de 6,3% no Ponto 2 (Figura 3.6.4). Entendeu-se, portanto, que a Malha 02 não interfere significativamente nos resultados da simulação, sendo esse o refinamento de malha utilizado nas simulações subsequentes.

Simulações teste (5) indicaram que o modelo de turbulência RNG k-ε apresentou resultados de fluxo de ar mais próximos dos valores medidos do que o Standard k-ε. Dessa forma, o RNG k-ε foi adotado neste trabalho.

Figura 3.6.4 – Velocidade do ar sob diferentes refinamentos de malha



Fonte: elaborado pela autora

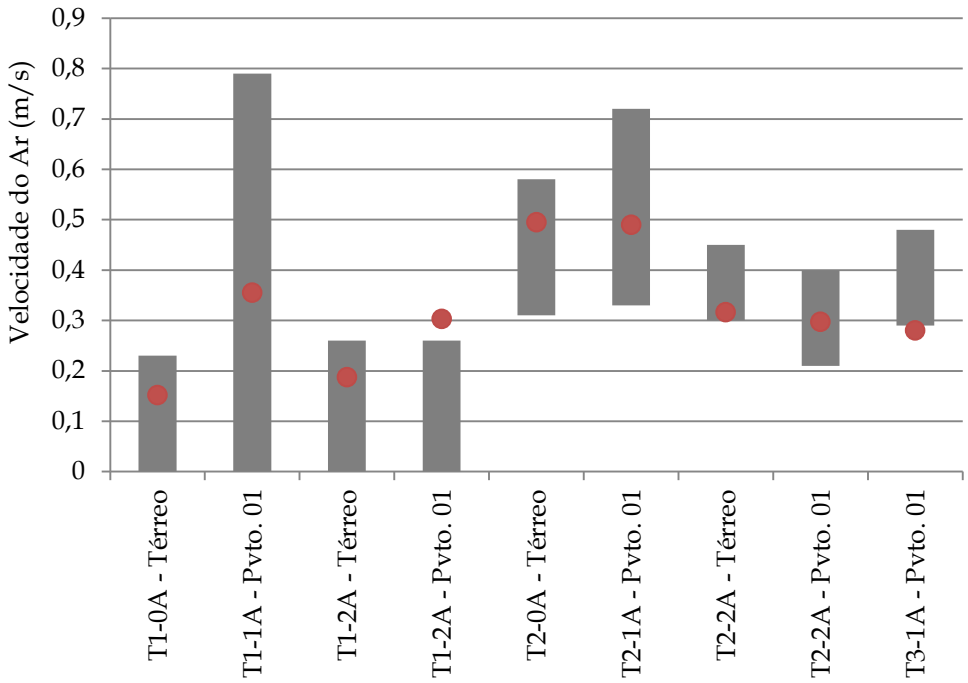
3.6.6 Comparação entre os dados medidos e simulados

Comparando-se os resultados das simulações CFD com os dados de velocidade do ar obtidos experimentalmente, a Figura 3.6.5 mostra que, na maioria dos casos, a velocidade do ar simulada (marcador vermelho) se encontra dentro do intervalo das velocidades máxima e mínima obtida no período de 30 segundos de medição (coluna cinza). Observa-se que o caso em que a velocidade do ar simulada mais se distanciou do intervalo medido ocorreu na abertura do primeiro pavimento na situação de temperatura T1 quando as entradas do térreo e do primeiro pavimento encontravam-se abertas. Nesse caso, a velocidade do ar simulada foi maior que a velocidade máxima medida em 0,043m/s. Considerando que a precisão do anemômetro é de 0,05m/s, pode-se atribuir essa diferença às incertezas do processo de medição.

Avaliando-se comparativamente as condições de temperatura T1, T2 e T3, observa-se que as condições T2 e T3 apresentaram desempenho superior à condição T1. Isso se deve ao fato de que a baixa taxa de radiação solar disponível em T1, manteve a temperatura superficial da placa relativamente baixa, ou seja, a diferença entre a temperatura do ar na sala e no interior da chaminé foi pequena. É interessante notar que na situação de temperatura superficial T2, o desempenho da chaminé foi

menor quando conectada a mais de um pavimento simultaneamente, ou seja, o desempenho da chaminé solar foi superior quando a chaminé encontrava-se conectada a apenas um pavimento. Dessa forma, o ideal é que a chaminé solar seja conectada a apenas um pavimento por vez.

Figura 3.6.5 – Comparação entre os dados medidos (coluna cinza) e simulados (marcador vermelho)



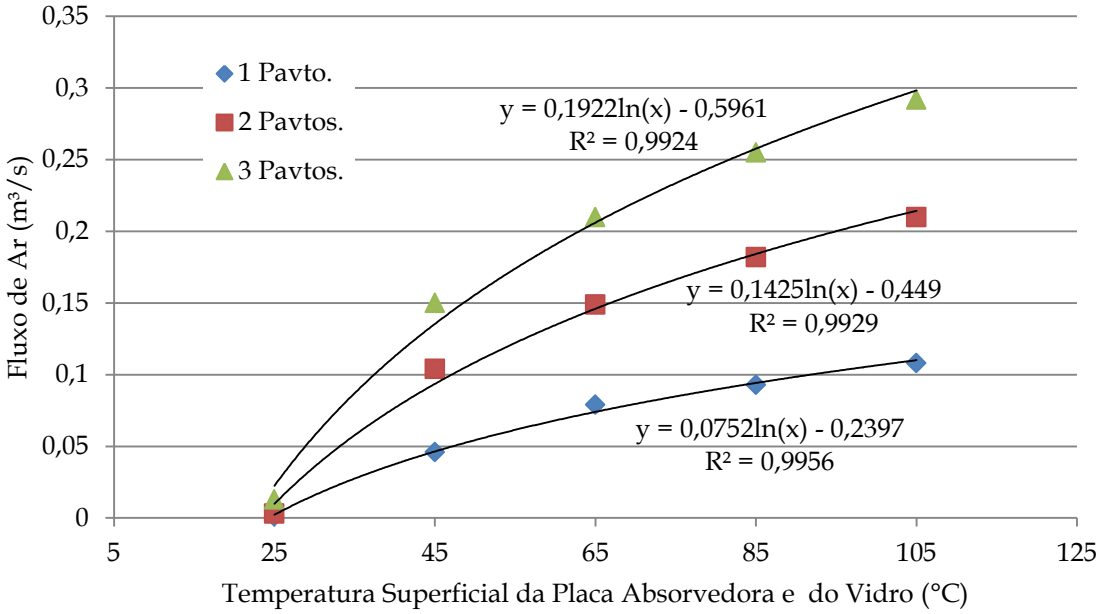
Fonte: elaborado pela autora

3.6.7 Desempenho da chaminé solar

O desempenho da chaminé solar foi avaliado para situações onde o duto tem a altura de um, de dois, e de três pavimentos, além de cinco situações de temperatura superficiais. Observou-se que a taxa de fluxo de ar apresenta correlação tanto com a altura da chaminé quanto com a temperatura superficial das placas, sendo o coeficiente de correlação de Pearson superior a 93% em todos os casos (Figura 3.6.6). Dessa forma, a melhor situação analisada consistiu na chaminé com altura de três pavimentos e temperaturas superficiais de 105°C. Nesse caso, a taxa de fluxo de ar provocada por uma chaminé seria equivalente a 3,65 renovações de ar por hora em um ambiente de 91,3m² ou 287,6m³ (dimensão do laboratório do primeiro pavimento onde o protótipo foi instalado). Embora as taxas de renovação de ar tenham sido menores nas situações onde a chaminé apresentava menor altura e/ou menor

temperatura superficial, entende-se que é possível atender à demanda de renovação de ar de determinados ambientes quando mais de uma chaminé solar for instalada.

Figura 3.6.6 – Fluxo de ar provocado pela chaminé com diferentes alturas e temperaturas superficiais



Fonte: elaborado pela autora

3.7 Conclusão

Esse artigo evidencia que o processo de simulação CFD foi capaz de descrever o desempenho de chaminés solares de acordo com os modelos reais. Entretanto, ressalta-se a importância da realização de testes para calibração da simulação, uma vez que a configuração inadequada dos parâmetros de simulação pode levar a diferenças significativas nos resultados. Um exemplo consiste nas diferenças da ordem de 40% observadas nos resultados de velocidade do ar quando da inserção dos domínios externos na simulação.

A chaminé solar apresentou um potencial de utilização para renovação de ar de ambientes internos, especialmente nas situações onde existem altas taxas de radiação solar, e, consequentemente, consegue-se alcançar elevadas temperaturas superficiais. Uma única chaminé com altura de 3 pavimentos e temperatura superficial de 105°C, alcançou uma taxa de renovação de ar de 3,65 trocas de ar por hora. Quando as chaminés têm altura ou temperatura superficial menores, as taxas de renovação de ar são reduzidas. Nesses casos, pode-se aumentar o número de chaminés solares para

alcançar a renovação de ar necessária. Na situação de temperatura superficial T2 (temperaturas superficiais e taxa de radiação solar elevadas), pode-se notar que o desempenho da chaminé solar foi superior quando a chaminé encontrava-se conectada a apenas um pavimento, com velocidade do ar de 0,495m/s (térreo) e 0,726 m/s (primeiro pavimento). Quando as duas entradas da chaminé encontravam-se abertas houve uma queda na velocidade do ar de cada ambiente, 0,300m/s (térreo) e 0,297m/s (primeiro pavimento). Dessa forma, recomenda-se que, sempre que possível, a chaminé solar seja conectada a apenas um pavimento por vez. Contudo, a especificação de chaminés solares deve ser planejada e dimensionada de acordo com as especificidades do ambiente ao qual ela se destina, levando em consideração as demandas de renovação de ar, as dimensões e tipo de uso do ambiente, além da disponibilidade de radiação solar do local.

Referências bibliográficas

AL-KAYIEM, H. H.; SREEJAYA, K. V.; GILANI, S. I. U. Mathematical analysis of the influence of the chimney height and collector area on the performance of a roof top solar chimney. **Energy and Buildings**, v.68, parte A, p. 305-311, jan. 2014.

ANDERSON, J. D. **Computational fluid dynamics**: the basics with applications. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 1995.

ASFOUR, O. S.; GADI, M. B. A comparison between CFD and Network models for predicting wind-driven ventilation in buildings. **Building and Environment**, v.42, n. 12, p. 4079-4085, dez. 2007.

BLOCKEN, B. Computational Fluid Dynamics for urban physics: importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. **Building and Environment**, v.91, n. 1, p. 219-245, set. 2015.

BACHAROUDIS, E.; VRACHOPOULOS, M. G.; KOUKOU, M. K.; MARGARIS, D.; FILIOS, A. E.; MAVROMMATIS, S. A. Study of the natural convection phenomena inside a wall solar chimney with one wall adiabatic and one wall under a heat flux. **Applied Thermal Engineering**, v.27, n. 13, p. 2266-2275, set. 2007.

CHEN, Q. Comparison of different *k*-ε models for indoor air flow computations. **Numerical Heat Transfer**, v.28, n. 3, p. 353-369, out. 1995.

CHEN, Q.; SREBRIC, J. A procedure for verification, validation, and reporting of indoor environment CFD analyses. **HVAC&R Research**, v.8,n.2, p. 201-216, abr. 2002.

GAN, G. Simulation of buoyancy-driven natural ventilation of buildings—Impact of computational domain. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 8, p. 1290-1300, ago. 2010.

GARCÍA-SÁNCHEZ, C.; PHILIPS, D. A.; GORLÉ, C. Quantifying inflow uncertainties for CFD simulations of the flow in downtown Oklahoma City. **Building and Environment**, v. 78, n. 1, p. 118-129, ago. 2014.

GIJÓN-RIVERA, M.; XAMÁN, J.; ÁLVAREZ, G.; SERRANO-ARELLANO, J. Coupling CFD-BES Simulation of a glazed office with different types of windows in Mexico City. **Building and Environment**, v. 68, n. 1, p. 22-34, out. 2013.

HAJDUKIEWICZ, M.; GERON, M.; KEANE, M. M. Formal calibration methodology for CFD models of naturally ventilated indoor environments. **Building and Environment**, v. 59, n. 1, p. 290-302, jan. 2013.

LI, Y.; LIU, S. Numerical study on thermal behavior of a solar chimney incorporated with PCM. **Energy and Buildings**, v. 80, n. 1, p. 406-414, set. 2014.

MONTAZERI, H.; BLOCKEN, B. CFD simulation of wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: validation and sensitivity analysis. **Building and Environment**, v. 60, n. 1, p. 137-149, fev. 2013.

ORTEGA, E. P. **Analyzes of Solar Chimney Design**. 2011. 82 f. Dissertação (Mestrado em Energy and Process Engineering) – Norwegian University of Science and Technology, Økern, Oslo, 2011.

RAY, S. D.; GONG, N. W.; GLICKSMAN, L. R.; PARADISO, J. A. Experimental characterization of full-scale naturally ventilated atrium and validation of CFD simulations. **Energy and Buildings**, v. 69, n. 1, p. 285-291, fev. 2014.

ROHDIN, P.; MOSHFEGH, B. Numerical predictions of indoor climate in large industrial premises. A comparison between different k–ε models supported by field measurements. **Building and Environment**, v. 42, n. 11, p. 3872-3882, nov. 2007.

SANTOS, I. G.; SOUZA, R. V. G. Proteções solares no Regulamento Brasileiro de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.12, n. 1, p. 227-241, jan./mar. 2012.

SHAHREZA, A. R.; IMANI, H. Experimental and numerical investigation on an innovative solar chimney. **Energy Conversion and Management**, v. 95, n. 1, p. 446-452, abr. 2015.

SREBRIC, J. **Simplified Methodology for Indoor Environment Design**. 2000. 250 f. Tese (Doutorado em Building Technology) - Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2000.

CAPÍTULO IV

4 Avaliação do desempenho térmico e luminoso de uma sala de aula com brise-chaminé-solar

Resumo

A qualidade ambiental de salas de aula contribui para o conforto e o desempenho de estudantes e professores. A presença do brise-chaminé-solar pode contribuir para a redução da temperatura interna de ambientes ao mesmo tempo em que contribui para a redução do consumo de energia para resfriamento. O objetivo deste artigo consiste em avaliar o desempenho térmico e luminoso de uma sala de aula com brise-chaminé-solar. Uma sala de aula teve seu percentual de horas em conforto térmico avaliado, por meio de simulação computacional, em duas condições: com e sem a presença de brise-chaminé-solar. Avaliou-se, ainda, o potencial de renovação de ar da inserção desse elemento na sala de aula. O método UDI (*Useful Daylight Illuminances*) foi aplicado para a avaliação do desempenho luminoso da sala de aula em quatro orientações (norte, sul, leste e oeste) e sob três condições de céu (claro, parcialmente encoberto e encoberto), considerando-se a iluminância útil como aquela compreendida no intervalo de 300lx a 2000lx. Constatou-se que o brise-chaminé-solar foi capaz de reduzir a temperatura operativa da sala de aula, aumentando as horas em desconforto por frio na cidade de Viçosa-MG. Recomenda-se a avaliação e utilização desse dispositivo em salas de aula que apresentem desconforto por calor. O brise-chaminé-solar apresentou taxas de renovação de ar que ultrapassam as recomendações para qualidade do ar interno. Com relação ao desempenho luminoso, o brise-chaminé-solar se mostrou mais vantajoso para céu encoberto, pois foi capaz de eliminar o ofuscamento, sem reduzir o percentual de UDI. Nas situações de céu claro e parcialmente encoberto, os níveis de ofuscamento foram reduzidos pelo *brise* chaminé solar, entretanto, o percentual de UDI também reduziu, aumentando a necessidade de iluminação complementar.

4.1 Introdução

No ano de 2012, o setor educacional nordestino foi responsável por consumir 372 GWh, o equivalente a 3,2% do consumo de energia elétrica da classe comercial na região Nordeste do Brasil. Na região Centro-oeste esse consumo foi de 179 GWh, equivalente a 2,8% do consumo da classe comercial nessa região, e na região Norte 83 GWh, o que corresponde a 2,0% do consumo da classe comercial (BRASIL, 2013). O Anuário Estatístico de Energia Elétrica (BRASIL, 2013) não apresenta dados do consumo de energia do setor educacional das regiões Sul e Sudeste, pois são elencados apenas os 10 setores comerciais que mais consomem energia em cada região, e nessas regiões as instituições de ensino não ficam entre os 10 maiores consumidores da classe comercial[5].

Esse consumo de energia relativamente baixo se deve ao fato de que o uso de sistemas de ar condicionado não é comum em escolas, principalmente naquelas da rede pública (CARLO, 2008).

Uma análise precipitada da Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso, que se insere dentro dos trabalhos de avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil (BRASIL, 2008) pode levar a conclusões errôneas sobre o consumo de energia de edificações escolares. Essa publicação mostra que sistemas de ar condicionado de parede e/ou do tipo *split* foram encontrados em 94% das edificações escolares amostradas. Entretanto, a amostra utilizada nessa pesquisa limitou-se a edificações atendidas em alta tensão (BRASIL, 2008). Sabe-se, contudo, que escolas e faculdades representam um importante ramo de atividade também na classe de consumo de energia de baixa tensão. Souza (2007) apresenta a posse média de equipamentos de ar condicionado e ventiladores em escolas e faculdades de baixa

[5] De acordo com Brasil (2013) os 10 setores comerciais que mais consumem energia nas regiões Sul e Sudeste são: **Região Sul**: Comércio Varejista; Comércio por Atacado, Exceto Veículos Automotores e Motocicletas; Alimentação; Telecomunicações; Comércio e Reparação de Veículos Automotores e Motocicletas; Armazenamento e Atividades Auxiliares dos Transportes; Atividades de Atenção à Saúde Humana; Atividades de Organizações Associativas; Atividades Imobiliárias; Atividades de Serviços Financeiros. **Região Sudeste**: Comércio Varejista; Comércio por Atacado, Exceto Veículos Automotores e Motocicletas; Serviços para Edifícios e Atividades Paisagísticas; Alimentação; Atividades de Serviços Financeiros; Telecomunicações; Atividades de Atenção à Saúde Humana; Armazenamento e Atividades Auxiliares dos Transportes; Atividades de Organizações Associativas; Serviços de Escritório, de Apoio Administrativo.

tensão energética em cada região do Brasil (Tabela 2.1.1). Por se tratar de dados médios, não é possível estabelecer o percentual de instituições que possuem tais equipamentos para comparar com as instituições de alta tensão.

Tabela 4.1.1 – Posse média de equipamentos em escolas e faculdades de baixa tensão

Região/País	Ar condicionado	Ventilador
Brasil	4,56	12,6
Sudeste	4,10	6,54
Sul	1,30	25,86
Nordeste	8,56	10,38
Norte	3,62	10,21
Centro Oeste	4,45	9,48

Fonte: elaborado a partir de dados extraídos de Souza (2007)

Além da preocupação com o consumo energético, vale ressaltar que as condições de conforto influenciam diretamente no desempenho dos estudantes. Nesse sentido, o uso de estratégias bioclimáticas em edificações escolares se justifica tanto pelo seu potencial de adequação ambiental quanto pela redução do consumo de energia. Uma estratégia interessante que pode ser adotada visando a melhoria do desempenho térmico e luminoso de salas de aula consiste no uso de chaminés solares.

4.2 Objetivo

O objetivo deste artigo consiste em avaliar o desempenho térmico e luminoso de uma sala de aula com brise-chaminé-solar.

4.3 Bioclimatologia em salas de aula

O conforto ambiental tem um efeito significativo no usuário de edificações, sendo importante no bem-estar e na produtividade. Níveis de conforto adequados podem ser alcançados tanto com o uso de sistemas artificiais (aparelhos de condicionamento de ar, ventiladores e exaustores, por exemplo), quanto naturalmente.

A arquitetura desempenha, portanto, um papel fundamental nas condições de conforto e eficiência energética de edificações. Para os climas brasileiros, é possível se alcançar conforto ambiental em grande parte do ano com o uso de estratégias

bioclimáticas, embora o uso de sistemas mecânicos seja recomendado como sistema complementar para situações extremas, como a ausência de vento.

Barbhuiya e Barbhuiya (2013) afirmam que o desconforto em edificações educacionais pode criar condições insatisfatórias que podem reduzir a produtividade e o desempenho acadêmico e/ou didático. Nesse sentido, Cui *et al.* (2013) acrescentam que a aprendizagem e a motivação dos estudantes são afetadas pelas condições de temperatura. Segundo eles, as altas temperaturas causam danos maiores que o desconforto por frio; assim, são recomendadas temperaturas neutras a levemente frias. Já Paes e Bastos (2014) vão além das condições de temperatura e afirmam que o conforto ambiental, incluindo as condições higrotérmicas, visuais e acústicas, merece destaque entre os múltiplos critérios a serem considerados na concepção do projeto por apresentar relação direta com a eficácia do processo educativo.

Vecchi, Cândido e Lamberts (2013) realizaram um estudo acerca do efeito de ventiladores de teto em salas de aula condicionadas em um local de clima quente e úmido e identificaram demandas por parte dos usuários de velocidades de ar maiores, inclusive superiores às recomendações das normas brasileiras em vigor (ABNT, 1990; ABNT, 2008) e da norma internacional ISO 7730 (ISO, 2005). Esses autores discutem que os limites de temperatura recomendados por essas normas tendem a ser baixos, resultando em consumo energético desnecessário e ressaltam que na última atualização da Standard 55 (ASHRAE, 2010), esses valores foram expandidos em situações nas quais os usuários podem controlar a temperatura e a velocidade do ar.

Ainda com relação aos limites de temperatura estabelecidos pela Standard 55 (ASHRAE, 2010), Liang, Lin e Hwang (2012) investigaram a percepção térmica de crianças e adolescentes em salas de aulas em Taiwan e identificaram que, segundo a preferência dos estudantes que participaram da pesquisa, a temperatura neutra no mês mais quente foi 2,3°C mais alta que o nível sugerido pela norma. Já no mês mais frio, a preferência dos alunos ficou ligeiramente mais baixa que a recomendação da Standard 55 (ASHRAE, 2010).

Mas não só as condições térmicas são relevantes nos ambientes educacionais. Bellia, Pedace e Barbato (2013) mostram a importância da luz natural nos ambientes nos quais as pessoas passam muitas horas, especialmente nos espaços educacionais, por sua contribuição no desempenho e na atenção dos alunos.

Entre as estratégias bioclimáticas mais utilizadas em salas de aula brasileiras podemos destacar o sombreamento, a utilização da luz natural e a ventilação natural. Vale ressaltar que dispositivos de proteção solar influenciam simultaneamente diferentes aspectos de conforto, como observado por Ochoa, Araújo e Sattler (2012). Esses autores realizaram uma análise do conforto ambiental em salas de aula comparando dados medidos e a percepção dos usuários e verificaram que elementos arquitetônicos podem influenciar de forma positiva em uma modalidade de conforto e negativa em outra. A principal deficiência observada foi do ponto de vista luminoso, devido à influência de elementos de sombreamento planejados visando o conforto térmico. Oliveira, Maciel e Carlo (2014) investigaram condições térmicas e luminosas em salas de aula com proteções solares e a relação dos usuários com tais proteções. Em relação à iluminação, os usuários se mostraram mais satisfeitos com a proteção solar fixa do que com as proteções móveis que tendem a permanecer fechadas durante a maior parte do tempo, por falta de interação dos primeiros com o ambiente. A percepção dos usuários foi coerente com os dados medidos que mostraram melhor desempenho térmico e luminoso no edifício que contém maior massa térmica e proteção solar fixa. Os edifícios de paredes leves e proteções solares móveis apresentaram temperaturas mais altas e iluminação natural insuficiente.

Gao, Wargocki e Wang (2014) analisaram como os sistemas de ventilação influenciam as condições de salas de aula, o comportamento de alunos e professores na abertura das janelas, na percepção ambiental dos alunos e suas condições de saúde. Quatro salas de aula de uma escola dinamarquesa com diferentes sistemas de ventilação foram monitoradas. Os sistemas de ventilação utilizados em cada sala foram os seguintes: sistema de ventilação mecânico, sistema automático de abertura de janelas, sistema de automático de abertura de janelas com ventilador de exaustão, e sistema manual de abertura de janelas. A ventilação mecânica apresentou as mais

altas taxas de renovação de ar, embora a qualidade do ar não tenha sido a melhor na percepção dos usuários. O sistema manual de abertura de janelas apresentou as maiores temperatura e concentração de CO_2 e as menores taxas de troca de ar, em conformidade com a percepção dos alunos que avaliaram a sala como muito quente. A percepção dos usuários foi mais positiva na sala de aula com sistema automático de abertura de janelas e ventilador de exaustão em funcionamento. Gao, Wargocki e Wang (2014) também observaram que a abertura das janelas independe do sistema de ventilação, sendo mais um hábito que uma resposta às condições do ambiente interno. Já as condições externas foram determinantes no comportamento dos usuários com relação à abertura das janelas, que foi frequente no verão e rara no inverno.

A ventilação natural também é importante para a qualidade do ar no interior das edificações. Segundo Li (2013), um método efetivo de reduzir a concentração de poluentes é a diluição dos mesmos por meio da entrada de ar externo relativamente limpo. Ferreira e Cardoso (2014) investigaram a qualidade do ar interno em 51 escolas da cidade de Coimbra, em Portugal, e identificaram uma correlação estatisticamente significativa entre a falta de concentração das crianças e a exposição a valores elevados de CO_2. Além disso, Mendell e Heath (2005) realizaram uma extensa revisão de literatura e identificaram que, embora a maioria dos trabalhos não tenham apresentado associações estatísticas consistentes, as pesquisas sugerem que uma alta concentração de NO_2 reduz a frequência escolar e que baixas taxas de renovação de ar estão associadas a uma queda no desempenho escolar dos alunos.

4.4 Métricas de conforto ambiental

Trabalhos que avaliam o conforto ambiental do espaço construído são comuns na literatura. Nesse contexto, há uma diversidade de métodos e parâmetros utilizados para mensurar o desempenho ambiental de edificações e o nível de satisfação do usuário. A seguir é feita uma compilação e uma breve discussão de alguns desses métodos e parâmetros que apresentam contribuições para o presente trabalho, cujo foco é o condicionamento natural.

4.4.1 Conforto térmico

De acordo com Lamberts, Dutra e Pereira (2014), as variáveis ambientais que influenciam no conforto térmico e podem ser medidas diretamente são: temperatura do ar (T_{ar} - °C), temperatura radiante (TRM - °C), umidade relativa (UR - %) e velocidade do ar (V_{ar} – m/s), além da atividade física (MET – met ou W/m²) e da vestimenta (Iclo – clo ou m² °C/W). Embora as variáveis envolvidas sejam de fácil compreensão, pode-se dizer que o conceito de conforto térmico é subjetivo. Segundo a *ASHRAE Fundamentals*, conforto térmico é um estado de espírito que reflete a satisfação do usuário com relação ao ambiente térmico que o envolve (ASHRAE, 2001). Lamberts, Dutra e Pereira (2014) afirmam que existe uma forte correlação entre o conforto e o consumo de energia. Nesse sentido, pode-se considerar que as edificações projetadas visando o conforto térmico tendem a apresentar consumo energético menor que aquelas que são projetadas sem essa preocupação. A avaliação de conforto possui, portanto, relevância não somente na promoção do bem-estar do usuário, mas também econômica e ambientalmente. Dessa forma, surgiram alguns indicadores que buscavam simplificar ou predizer as condições de conforto térmico.

Um dos métodos mais difundidos é o Voto Médio Predito (PMV, do inglês *Predicted Mean Vote*). O PMV foi apresentado por Fanger, em 1972, como uma equação geral de conforto que combinava as variáveis ambientais que influenciam nas condições de conforto. Essa equação foi definida com base em um trabalho experimental no qual pessoas de diferentes nacionalidades, idade e sexo expressavam seu grau de satisfação para determinadas condições ambientais. O PMV consiste em um valor numérico que indica a sensibilidade humana ao frio (-3) e ao calor (+3), sendo a condição de conforto neutra (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Outro indicador associado ao PMV é o Percentual de Pessoas Insatisfeitas (PPD, do inglês *Predicted Percentage of Dissatisfied*). A norma ISO 7730 (2005) recomenda que o PPD seja inferior a 10% para um ambiente termicamente moderado, o que corresponde a um PMV entre -0,5 e +0,5.

Lamberts, Dutra e Pereira (2014) citam, ainda, um método que foi desenvolvido por Humphreys em 1975 e trabalha com o conceito de Temperatura Neutra, ou seja, estuda o fator de aclimatização das pessoas frente a determinado clima, relacionando

a temperatura de conforto com a temperatura média do local em estudo. A norma ASHRAE Standard 55 (ASHRAE, 2010) utiliza um modelo adaptativo semelhante ao modelo de Humphreys para determinar as condições aceitáveis de conforto térmico em ambientes naturalmente ventilados.

Outro método que considera a adaptação é apresentado na norma EN 15251 (CEN, 2007). Nesse método a temperatura confortável no ambiente interno é função da temperatura do ambiente externo para edificações naturalmente condicionadas nas quais o usuário exerce atividade sedentária, tem fácil acesso às aberturas operáveis e tem liberdade para adequar suas vestimentas. Esse método foi elaborado com base em estudos em edifícios de escritórios, mas também pode ser aplicado a outros edifícios com atividades sedentárias, nos quais não haja aquecimento ou resfriamento artificial (CEN, 2007).

4.4.2 Qualidade do ar no ambiente interno

Considerando-se que a qualidade do ar do ambiente externo, em geral, é superior à qualidade do ar interno, é comum que a renovação de ar seja utilizada visando à salubridade dos ambientes internos. Essa renovação de ar pode ser realizada por meio de equipamentos mecânicos ou naturalmente. A adoção de métodos naturais, como o brise-chaminé-solar, mostra-se vantajosa por não consumir recursos energéticos.

A Anvisa recomenda uma taxa de renovação de ar mínima de 17m³/pessoa/hora (ANVISA, 2000) para ambientes condicionados artificialmente. Recomendações de taxas de renovação de ar para ambientes naturalmente ventilados não foram encontradas em normas em vigor.

4.4.3 Conforto visual

Para que se tenha conforto na execução de tarefas visuais, tanto a norma EN 15251 (CEN, 2007) quanto a NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013) recomendam níveis de iluminação mínimos de 300lx para salas de aula e de 500lx para salas de aula usadas na educação de adultos, na altura do plano de trabalho a 0,80m. No caso de iluminação natural, a NBR ISO/CIE 8995-1 recomenda que uma iluminação suplementar seja fornecida para garantir a iluminância requerida no local de trabalho

e a distribuição balanceada da luminância no interior da sala. A integração apropriada entre a luz artificial e natural pode ser feita utilizando acionamento automático ou manual e/ou sistemas de dimerização. Essa norma recomenda, ainda, que condições de ofuscamento sejam evitadas para prevenir erros, fadiga e acidentes.

O ofuscamento pode ser causado tanto por iluminância excessivas quanto por contrastes no campo de visão e pode ser evitado por meio da proteção contra a visão direta das lâmpadas ou por um escurecimento nas janelas por anteparos como *brises* e persianas (ABNT, 2013).

Os níveis de iluminação natural dependem da condição de céu. A CIE (*Commission Internacionale de L'Eclairage*) estabelece 15 tipos de céu, incluindo padrões de céu claro, parcialmente encoberto e encoberto.

Reinhart e Weissman (2012) afirmam que os métodos mais comuns de avaliação da luz natural baseadas em simulação consistem em uma malha de pontos em um plano de trabalho afastado do piso (geralmente na altura de uma mesa) onde os níveis de iluminação serão mensurados e avaliados segundo vários critérios ou métricas. A métrica mais antiga de avaliação da iluminação natural, segundo Reinhart e Weissman (2012), é o Coeficiente da Luz Diurna (DF, do inglês *Daylight Fator*) definido como a razão entre a iluminância num determinado ponto num plano de trabalho horizontal e a iluminância em um ponto de referência externo que não seja sombreado, sob um céu encoberto padrão CIE.

Desde 2001, estudos têm sido realizados a fim de desenvolver métricas de avaliação da iluminação natural que considere dados climáticos. De forma semelhante ao DF, essas métricas utilizam uma malha de ponto sobre um plano de trabalho. Entretanto, a avaliação da disponibilidade de luz natural é feita com base nos valores absolutos de iluminância horária para o período de um ano sob diversos tipos de céu (REINHART; WEISSMAN, 2012; NABIL; MARDALJEVIC, 2005).

Um método de avaliação da iluminação natural que considera o período de um ano climático e diferentes condições de céu (método dinâmico) são as Iluminâncias Úteis de Luz Natural (UDI, do inglês *Useful Daylight Illuminances*), apresentado por Nabil e Mardaljevic (2005). Esse método trabalha com um intervalo de níveis de iluminância considerados úteis. Se a iluminância de luz natural é muito baixa, não

contribui de forma útil para a percepção visual do ambiente ou para o desenvolvimento de tarefas. Se, ao contrário, o nível de iluminância é muito alto pode provocar desconforto térmico e/ou visual. As iluminâncias que se encontram entre os limites máximo e mínimo são as chamadas UDI (NABIL; MARDALJEVIC, 2005). O intervalo de UDI considerado por Nabil e Mardaljevic (2005) tem como limite inferior 100lx e superior 2000lx.

4.5 Método

O método utilizado consiste em uma avaliação comparativa entre duas salas de aula. Uma possui uma série de chaminés solares para sombreamento. A outra não apresenta nenhum mecanismo para sombreamento ou ventilação, exceto as aberturas tradicionais. A comparação é realizada por simulação, cujos critérios avaliados são o desempenho térmico do ambiente naturalmente ventilado e desempenho luminoso de uma sala de aula.

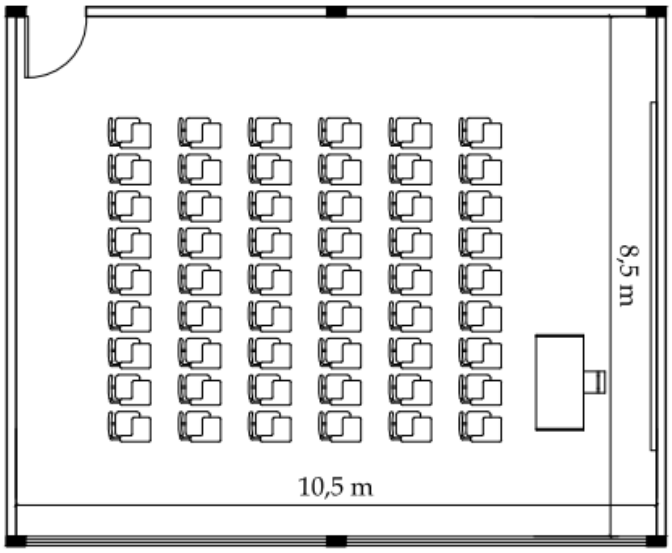
A sala de aula adotada neste trabalho possui as dimensões apresentadas por Alves (2011) e reproduzidas na Figura 4.5.1. Essa sala possui uma área útil de 89,25m² e capacidade para 54 alunos. O pé-direito adotado foi de 3,00m e a janela adotada foi uma janela em fita na maior dimensão da sala, com peitoril de 1,0m e altura de 1,5m. As avaliações foram realizadas considerando as aberturas voltadas para 4 orientações (Norte, Sul, Leste e Oeste) com o clima e localização geográfica da cidade de Viçosa (latitude: -20°46', longitude: -42°52' e meridiano de referência: -45°).

4.5.1 Avaliação do desempenho da chaminé em um ambiente

Investigou-se a distribuição das chaminés solares ao longo do ambiente e ao longo da fachada, tendo em vista sua função de sombreamento e ventilação. Nos Capítulos 02 e 03 foi visto que o desempenho da chaminé solar é menor quando ela está conectada simultaneamente a dois pavimentos. Portanto, é desejável que cada chaminé se conecte a apenas uma abertura de entrada de ar. Nesse sentido, três possibilidades de aplicação (composições) foram avaliadas, conforme apresentado na Figura 4.5.2. A Composição 01 considera que as chaminés têm a altura de um pavimento e todas estão conectadas aos ambientes do mesmo pavimento. Na Composição 02, as chaminés têm a altura de dois pavimentos e estão conectadas

alternadamente aos ambientes, de modo uma chaminé esteja conectada ao ambiente de um pavimento e a chaminé seguinte esteja conectada ao ambiente do pavimento imediatamente superior. Isso aumenta a vazão por chaminé, mas reduz a quantidade de chaminés por ambiente à metade. Já na Composição 03, as chaminés têm altura de três pavimentos e cada ambiente está conectado a uma chaminé a cada três. Na Figura 4.6.1, vê-se as interrupções ao longo da altura das chaminés, o que indica a cavidade superior da chaminé através do qual o ar será expurgado. A base de cada chaminé está conectada à abertura representada como janelas em fita. Há 1 ambiente por pavimento, cuja abertura oposta está ligada a uma circulação horizontal, cujas extremidades são abertas para o exterior, com coeficiente de descarga igual a 1,0.

Figura 4.5.1 – Sala de aula estudada



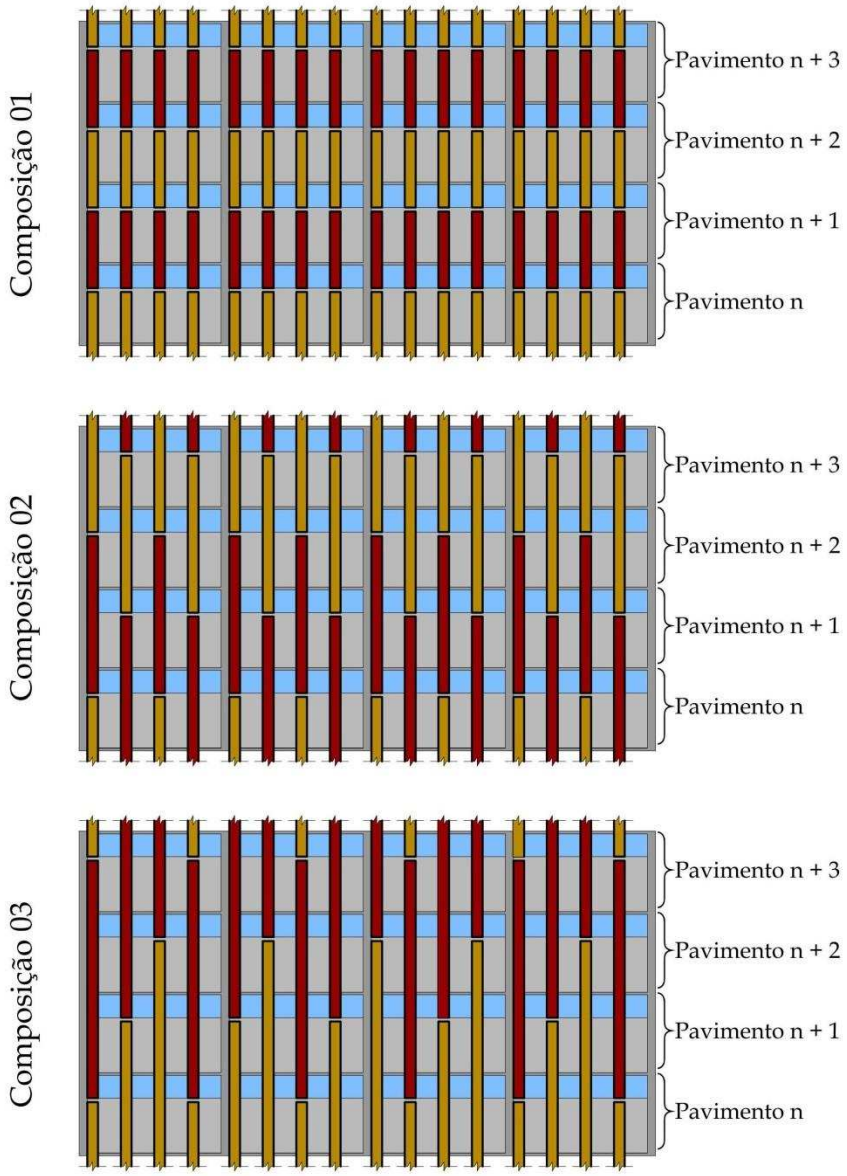
Fonte: Alves (2011), adaptado pela autora

Para analisar o desempenho das diferentes composições, a chaminé solar foi simulada com as alturas de 2,85m, 5,85m e 8,85m – composições 01, 02 e 03 respectivamente - considerando pavimentos com pé-direito estrutural de 3,00m e uma distância de 0,15m para saída de ar entre uma chaminé e a chaminé imediatamente superior.

A avaliação de desempenho térmico foi feita utilizando-se o EnergyPlus (versão 8.1), para o clima de Viçosa - MG. Como caso base, simulou-se a sala de aula da Figura 4.5.1 sem nenhum dispositivo de proteção solar e/ou ventilação, apenas

infiltração. Em seguida, novas simulações foram realizadas para representar as três situações apresentadas na Figura 4.5.2.

Figura 4.5.2 – Distribuições de chaminés solares ao longo da edificação



Fonte: elaborado pela autora

Como o desempenho do modelo de chaminé térmica do EnergyPlus mostrou-se discrepante dos resultados de CFD (Capítulo 02), optou-se por utilizar os resultados de vazão volumétrica obtidos no Capítulo 03 como estimativa da vazão nas simulações da sala. Essa taxa de ventilação foi inserida no modelo como se fosse ocasionada por exaustores. Entende-se que este método apresenta uma limitação ao adotar vazões de ar obtidas para uma única chaminé, em que se desconsideram as influências na distribuição do ar de uma chaminé sobre a outra. Essa limitação se

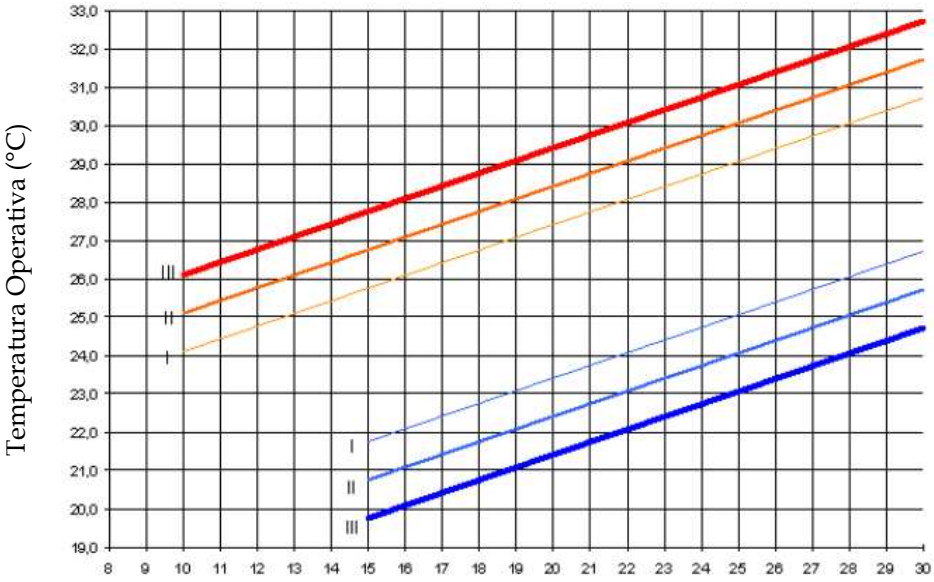
justifica, uma vez que o tempo de simulação e o recurso computacional necessários para descrever o efeito integrado de diversas chaminés em um ambiente se tornam tão inviáveis quanto a construção de mais de um protótipo em escala real.

A simulação foi realizada considerando duas zonas térmicas: a sala de aula e um corredor que foi modelado com 3 portas, uma conectada à sala e as outras duas nas extremidades. As portas das extremidades foram consideradas expostas ao vento para promover as trocas com o ambiente externo. Considerou-se uma ocupação de 40 alunos (74% da ocupação máxima da sala) e um professor. Adotou-se que o metabolismo dos alunos gera uma carga térmica de 60W/m² e do professor de 100W/m² (ASHRAE, 2001). A iluminação foi modelada com uma carga térmica de 10,2 W/m², sendo esse o limite para o nível A de eficiência energética do RTQ-R (INMETRO, 2012). Foram incluídas cargas de equipamentos equivalentes a 302 W, sendo 239W de um projetor e 63W de um computador (PROCEL, 2006). Considerou-se que a sala de aula é utilizada das 8h às 22h. Uma simulação inicial foi realizada, utilizando-se o modelo de chaminé térmica do EnergyPlus para obter as temperaturas superficiais na chaminé solar ao longo das 8760 horas do ano. Essas temperaturas foram utilizadas nas simulações seguintes para calcular o padrão horário das vazões do exaustor que representa a chaminé, considerando-se as equações obtidas no Capítulo 03 (Figura 3.7.6). Para reproduzir o efeito de proteção solar da chaminé, a simulação com o exaustor contou com dispositivos de sombreamento que foram modelados com as dimensões da chaminé solar.

A avaliação de conforto térmico foi feita considerando-se o método da norma EN 15251 (CEN, 2007) para as quatro situações simuladas (caso base e três situações da Figura 4.6.1). A norma EN 15251 (CEN, 2007) apresenta quatro categorias de conforto, sendo que a Categoria I representa um nível alto de conforto e é recomendada para espaços ocupados por pessoas sensíveis ou frágeis com necessidades especiais como pessoas com deficiências, doentes, crianças e pessoas idosas. A Categoria II representa um nível normal de conforto e pode ser usada para edifícios novos e reformas. A Categoria III consiste em um nível moderado de conforto e pode ser aceito para edificações existentes. Já a Categoria IV representa os valores fora das categorias de conforto anteriores e só pode ser aceita para uma parte

limitada do ano. A Figura 4.5.3 mostra os limites de temperatura operativa das categorias de conforto de acordo com a temperatura externa. Por simplificação, neste trabalho, as Categorias I e II foram agrupadas e consideradas como condições de conforto térmico. Já as Categorias III e IV foram consideradas como desconforto, sendo que a análise separou o desconforto por frio (temperaturas operativas abaixo do limite da Categoria II) do desconforto por calor (temperaturas acima do limite da Categoria II).

Figura 4.5.3 – Limites de conforto térmico segundo a norma EN 15251



Fonte: CEN (2007)

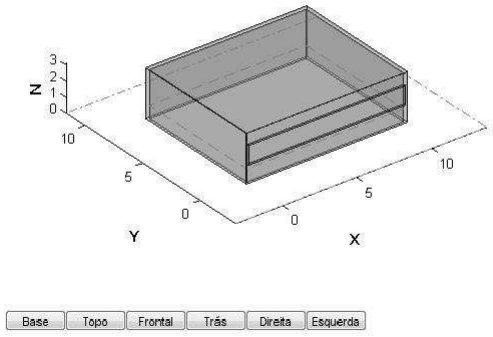
Com relação à qualidade do ar no ambiente interno, avaliou-se a taxa de renovação de ar do ambiente, considerando-se a recomendação da Anvisa de 17m³/pessoa/hora (ANVISA, 2000). Essa taxa de renovação de ar é recomendada para ambientes condicionados artificialmente, entretanto, na ausência de diretrizes normativas com relação aos ambientes naturalmente ventilados adotou-se esse valor como referência.

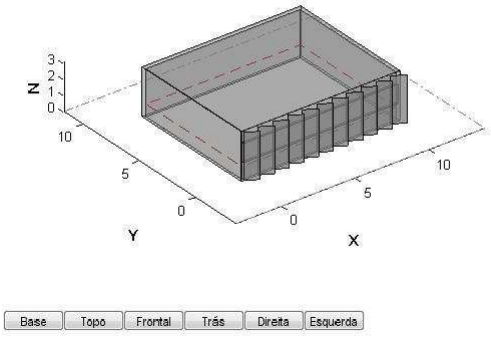
Considerando-se o volume de 267,75m³ da sala de aula apresentada na Figura 4.5.1, e uma ocupação de 55 pessoas (54 alunos e 1 professor), é necessário 3,5 renovações de ar por hora para que se atenda à recomendação da Anvisa (2000). A taxa de renovação de ar foi calculada utilizando-se os fluxos de ar obtidos no Capítulo III (Figura 3.7.6).

A avaliação do desempenho luminoso foi realizada comparando-se a sala sem nenhum dispositivo de sombreamento (Caso Base) com a sala com a chaminé solar funcionando como *brise* (Figura 4.5.4). Os *brises* verticais foram modelados como um plano vertical com profundidade de 0,90m, porém, por simplificação, a altura do *brise* se limitou à altura da sala (3,00m). Os *brises* têm uma distância de 1m entre si e foram modelados formando um ângulo horizontal de 30° com o plano da fachada quando a janela estava voltada para leste (Figura 4.5.4-b), 150° quando a janela estava voltada para oeste (Figura 4.5.4-c) e de 90° para norte e para sul (Figura 4.5.4-d).

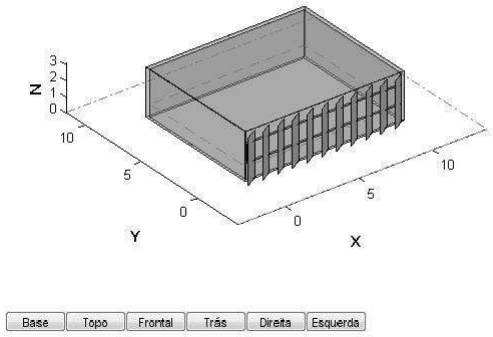
Figura 4.5.4 – Modelos utilizados na simulação com o TropLux

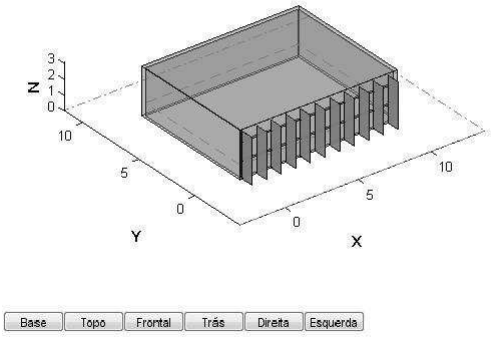
(a) (b)





(c) (d)





Fonte: elaborado pela autora

O programa utilizado para simulação do desempenho luminoso foi o TropLux (versão 7.2). Foram determinados os níveis de iluminância médio disponível em 25

pontos (malha 5 x 5) distribuídos no interior da sala na altura do plano de trabalho (0,80m de altura). Com esse dado, foram plotadas isocurvas contendo o percentual de iluminância útil de luz natural (UDI) e foi realizada uma análise das situações onde a iluminação natural é insuficiente ou onde há possibilidade de ofuscamento. Por se tratar de salas de aula, o intervalo de iluminância útil de luz natural considerado neste trabalho foi de 300 lx a 2000 lx.

As simulações foram realizadas para três tipos de céu: CIE 1 (encoberto), CIE 10 (parcialmente encoberto) e CIE 14 (claro). Os dados de saída foram obtidos para 12 dias ao longo do ano (dia 22 de cada mês) no intervalo da 8h às 18h.

Os parâmetros de simulação adotados incluem o tempo solar verdadeiro e o método de cálculo da iluminância horizontal difusa da IES (*Illuminating Engineering Society*). Utilizou-se a margem de erro estatístico padrão do TropLux de 5%.

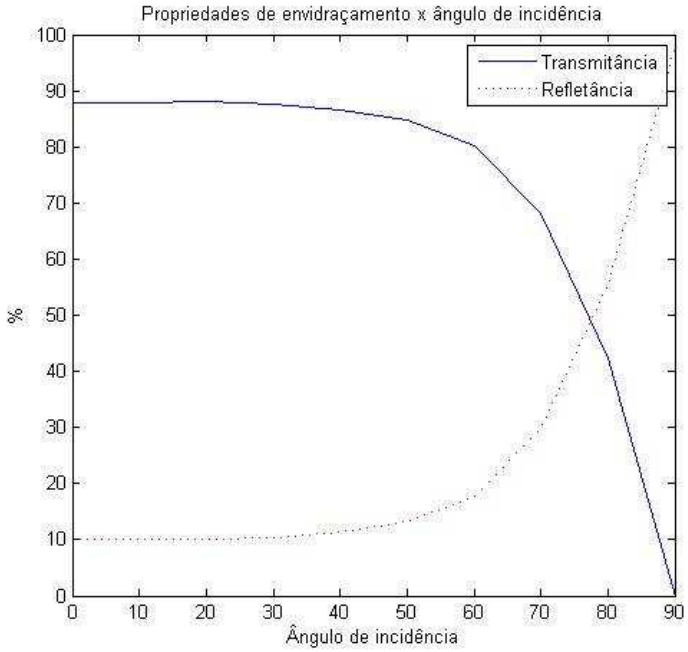
A porta da sala não foi modelada, o que equivale às situações onde a porta possui refletância semelhante à da parede e é mantida fechada durante o uso da sala. Com relação aos materiais, utilizou-se as propriedades do vidro comum adotadas pelo TropLux e apresentadas na Figura 4.5.5. Já os componentes opacos tiveram suas características determinadas por meio da definição de tintas comerciais, cujas refletâncias foram obtidas em Dornelles (2008) e são apresentadas na Tabela 4.5.1.

Tabela 4.5.1 – Cores e refletâncias dos elementos opacos da sala de aula

Componente	**Cor**	**Refletância** (%)
Paredes internas	Pérola	58,4
Teto	Branco	81,3
Piso	Concreto	20,9
Telhado	Terracota	35,0
Paredes externas	Pêssego	49,5
Brises	Branco	81,3

Fonte: elaborado a partir de dados extraídos de Dornelles (2008)

Figura 4.5.5 – Características do vidro utilizado na simulação em função do ângulo de incidência da radiação



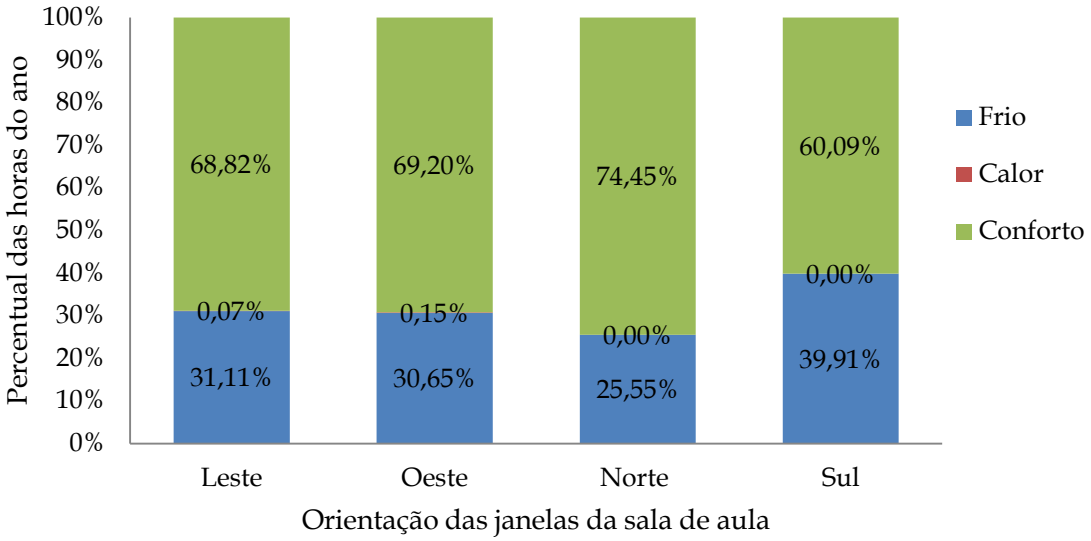
Fonte: TropLux Versão 7.2

4.6 Resultado

A sala de aula foi simulada utilizando-se o arquivo climático da cidade de Viçosa-MG, localizada na ZB3. Dessa forma, a avaliação da sala de aula sem o brise-chaminé-solar, indicou que o desconforto por calor ocorre em no máximo 0,15% das horas do ano, enquanto o desconforto por frio chega a aproximadamente 40,0% das horas do ano (Figura 4.6.1).

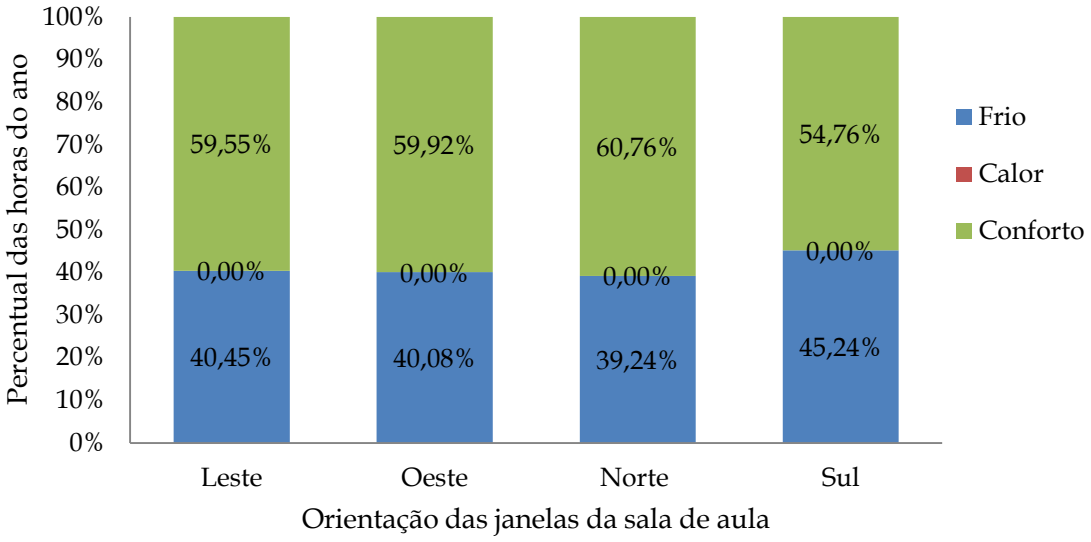
Era esperado que o brise-chaminé-solar, ao aumentar a taxa de ventilação do ambiente, reduzisse a temperatura do ambiente interno. Com isso, ao ser inserido em uma sala de aula em que o desconforto por calor pode ser desprezado, a avaliação de conforto térmico mostrou que houve um aumento das horas em desconforto por frio. As Figuras 4.6.2, 4.6.3 e 4.6.4 mostram os percentuais de horas de conforto e desconforto da sala de aula com, respectivamente, 8 elementos do brise-chaminé-solar com altura de 1 pavimento, 4 elementos com altura de 2 pavimentos e 3 elementos com altura de 3 pavimentos. Observou-se que nessas três situações não houve variação significativa nos percentuais de horas em conforto.

Figura 4.6.1 – Percentual de horas do ano em que a sala de aula sem brise-chaminé-solar encontra-se em conforto, em desconforto por frio e em desconforto por calor



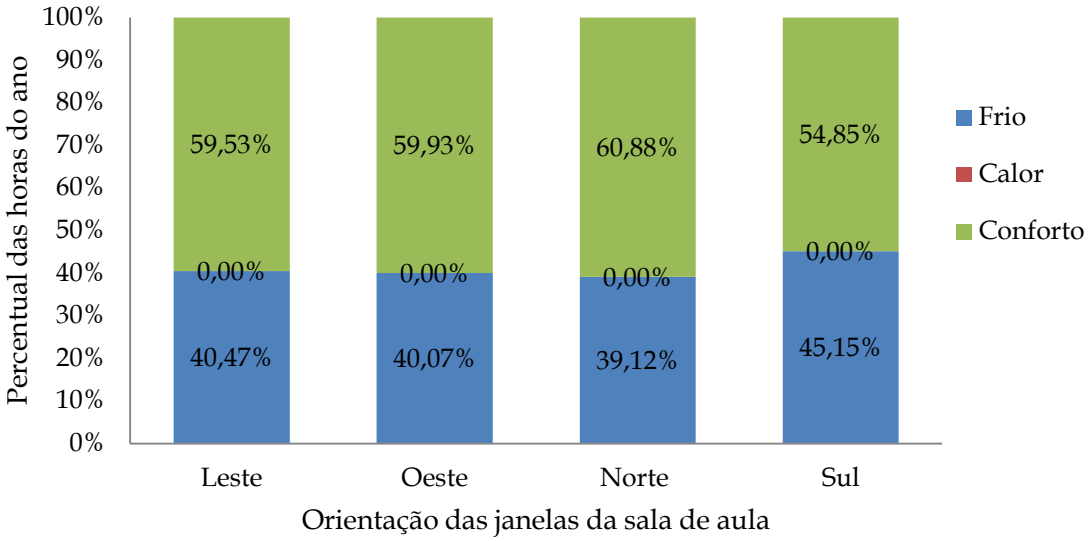
Fonte: elaborado pela autora

Figura 4.6.2 – Percentual de horas do ano em que a sala de aula com brise-chaminé-solar (8 elementos com altura de 1 pavimento) encontra-se em conforto, em desconforto por frio e em desconforto por calor



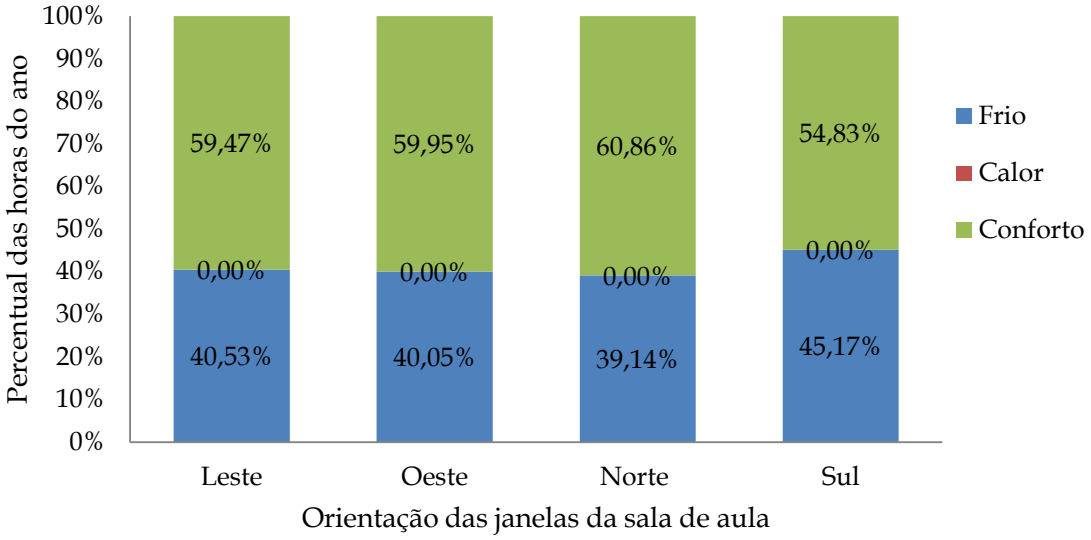
Fonte: elaborado pela autora

Figura 4.6.3 – Percentual de horas do ano em que a sala de aula com brise-chaminé-solar (4 elementos com altura de 2 pavimento) encontra-se em conforto, em desconforto por frio e em desconforto por calor



Fonte: elaborado pela autora

Figura 4.6.4 – Percentual de horas do ano em que a sala de aula com brise-chaminé-solar (3 elementos com altura de 3 pavimento) encontra-se em conforto, em desconforto por frio e em desconforto por calor

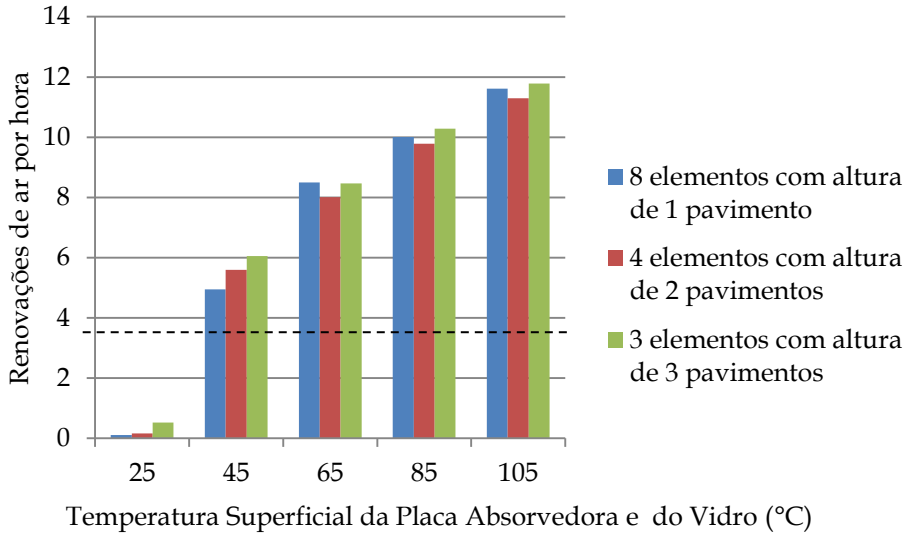


Fonte: elaborado pela autora

A inserção do brise-chaminé-solar resultou em taxas de renovação de ar que atendem à recomendação 3,5 renovações por hora (17m³/pessoa/hora) sempre que a temperatura superficial da placa absorvedora e do vidro é igual ou superior a 45°C. A Figura 4.6.5 mostra o número de renovações de ar por hora da sala de aula com brise-chaminé-solar para as três composições em estudo (8 elementos com altura de

um pavimento, 4 elementos com altura de 2 pavimentos e 3 elementos com altura de 3 pavimentos) para as temperaturas superficiais de 25°C, 45°C, 65°C, 85°C e 105°C. A linha tracejada indica a taxa de renovação de ar mínima recomendada pela Anvisa para uma sala com volume de 267,75 m³ e ocupação de 55 pessoas (ANVISA, 2010).

Figura 4.6.5 – Renovações de ar por hora da sala de aula com brise-chaminé-solar para diferentes temperaturas superficiais da placa absorvedora e do vidro

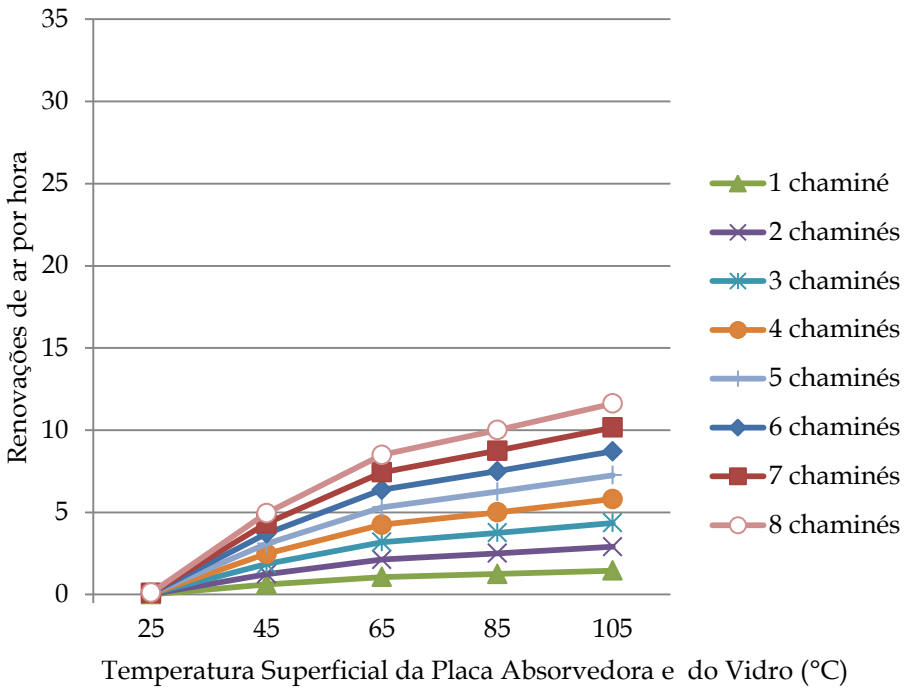


Fonte: elaborado pela autora

Ao expandir-se a avaliação da taxa de renovação da sala de aula para incluir outras quantidades de brise-chaminé-solar, observou-se que, quando os elementos têm altura de um pavimento, é necessário que haja um mínimo de 3 elementos com temperatura superficial da placa absorvedora e do vidro igual ou superior a 85°C para atender a recomendação da Anvisa. Quando houver 4 ou 5 elementos com altura de um pavimento, a recomendação é atendida quando as temperaturas superficiais forem maiores ou iguais a 65°C. Se o número de elementos for 6, 7 ou 8, temperaturas superficiais de 45°C são suficientes para atender às recomendações. No caso de brise-chaminé-solar com altura de dois pavimentos, é necessário um mínimo de 2 elementos com temperaturas superficiais maiores ou iguais a 65°C para atender a recomendação. A partir de 3 chaminés solares com altura de dois pavimentos, a recomendação é satisfeita para temperaturas superficiais iguais ou superiores a 45°C. Já quando os elementos têm altura de 3 pavimentos, basta um único brise-chaminé-solar com temperaturas superficiais maiores ou iguais a 105°C para se alcançar a taxa

de renovação de ar recomendada. Para 2 ou mais elementos com altura de três pavimentos, a taxa de recomendação é satisfeita para temperaturas superficiais a partir de 45°C. As Figuras 4.6.6, 4.6.7 e 4.6.8 apresentam o número de renovações de ar por hora da sala de aula com brise-chaminé-solar com altura de, respectivamente, um pavimento, dois pavimentos e três pavimentos. Pode-se observar que é possível alcançar taxas de renovação de ar que ultrapassam as recomendações da Anvisa, chegando a quase 10 vezes mais no caso da colocação de 8 elementos com altura de 3 pavimentos (Figura 4.6.8).

Figura 4.6.6 – Renovações de ar por hora da sala de aula com brise-chaminé-solar com altura de um pavimento para diferentes temperaturas superficiais da placa absorvedora e do vidro

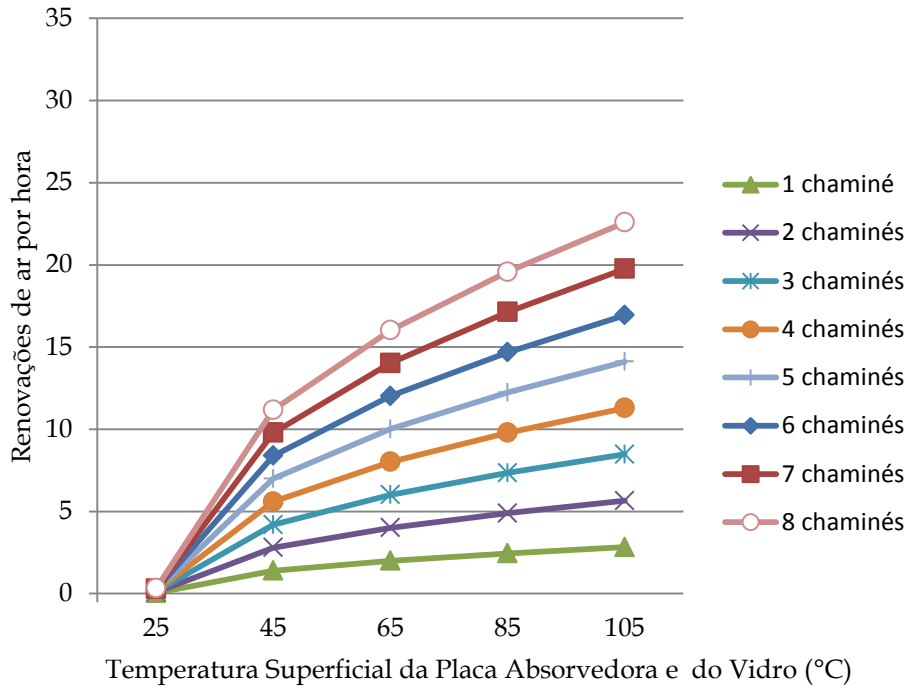


Fonte: elaborado pela autora

O desempenho luminoso da sala de aula foi avaliado por meio de isocurvas contendo os percentuais de iluminância dentro do intervalo de 300 lx a 2000 lx. Esses percentuais foram calculados com base nos 12 dias simulados ao longo do ano (dia 22 de cada mês), no período compreendido entre as 8h e as 18h. Nas imagens de isocurvas apresentadas nos Quadros 4.6.1 a 4.6.4 e no Apêndice I, o eixo X representa o comprimento da sala e o eixo Y a sua profundidade, sendo os valores apresentados em metros. Para facilitar a compreensão, todas as isocurvas estão posicionadas da

mesma forma que a planta baixa da Figura 4.5.1. Assim, a abertura da janela está posicionada sobre o eixo X.

Figura 4.6.7 – Renovações de ar por hora da sala de aula com brise-chaminé-solar com altura de dois pavimentos para diferentes temperaturas superficiais da placa absorvedora e do vidro



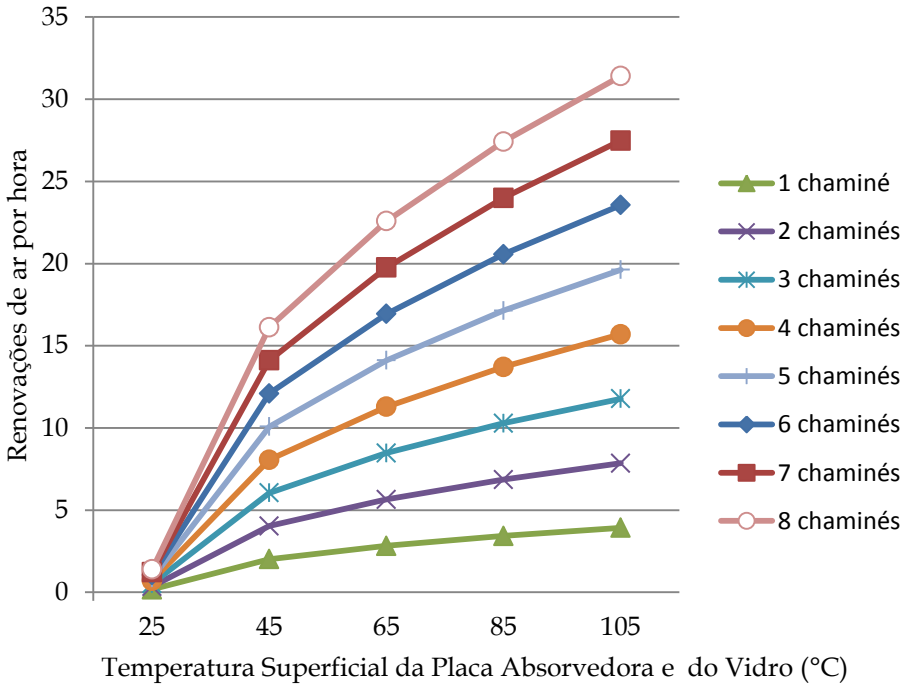
Fonte: elaborado pela autora

Para as condições de céu encoberto (CIE 01) com a janela sem *brises* voltada para norte (Quadro 4.6.1), observa-se que apenas uma faixa de 1m que se estende de 2m até 3m de profundidade (eixo Y) apresenta iluminância útil (entre 300lx e 2000lx) em mais de 70% das horas calculadas. A presença dos *brises*, na sala de aula sob mesmas condições, fez com que a faixa de iluminâncias com mais de 70% das horas dentro do intervalo útil aumentasse para aproximadamente 2m a partir da janela. Os *brises* contribuíram, ainda, para que não houvesse pontos com iluminação em excesso (Quadro 4.6.2). Os resultados das demais orientações sob condição de céu encoberto são apresentados no Apêndice I e seguem essa tendência de aumentar ligeiramente a faixa de iluminâncias úteis e eliminar as situações de ofuscamento quando os *brises* são inseridos.

O Quadro 4.6.3 mostra que sob condições de céu claro (CIE 14), a sala com a abertura sem *brises* e voltada para norte apresenta iluminância úteis a partir de 2m de

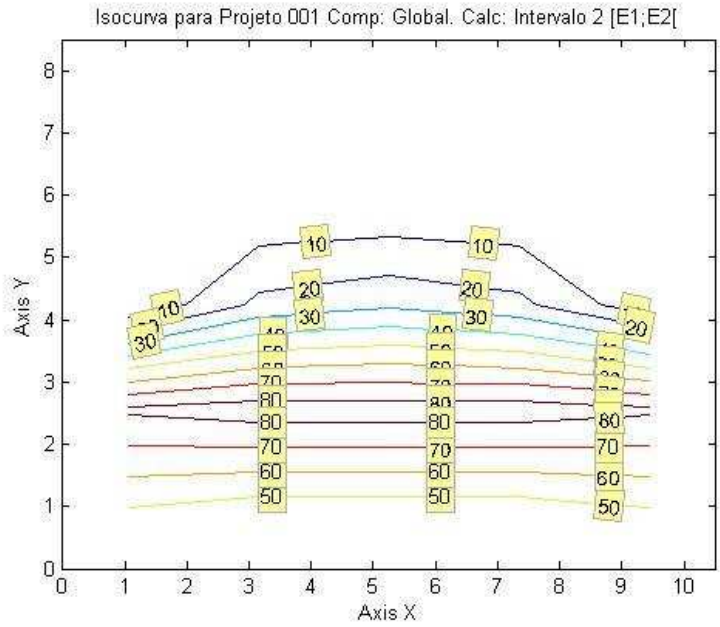
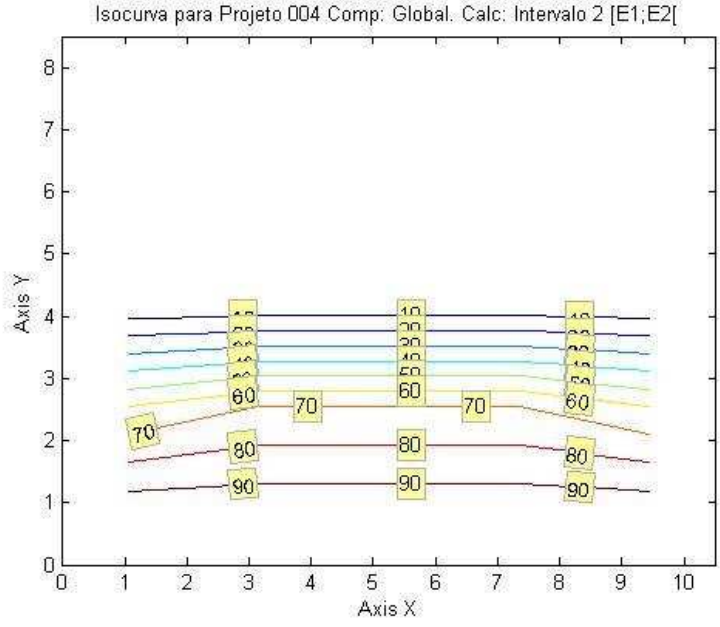
profundidade em mais de 70% das horas analisadas. Quando os *brises* são inseridos, a área com esse percentual de iluminância útil é reduzida. Com relação ao ofuscamento, a presença dos *brises* diminuiu a área e o percentual de horas em que as iluminâncias ultrapassavem o limite de 2000lx (Quadro 4.6.4), o que representa uma vantagem sobre a situação sem *brises*, pois embora a insuficiência da luz natural seja maior, esta pode ser facilmente complementada com iluminação artificial, enquanto o excesso de luz natural pode causar ofuscamento e/ou acarretar em soluções alternativas por parte do usuário como a colocação de cortinas que anulam a contribuição da luz natural. Os resultados das demais orientações sob condição de céu claro e parcialmente encoberto são apresentados no Apêndice I e seguem essa tendência de diminuir tanto a faixa de iluminâncias úteis quanto de ofuscamento quando os *brises* são inseridos.

Figura 4.6.8 – Renovações de ar por hora da sala de aula com brise-chaminé-solar com altura de três pavimentos para diferentes temperaturas superficiais da placa absorvedora e do vidro



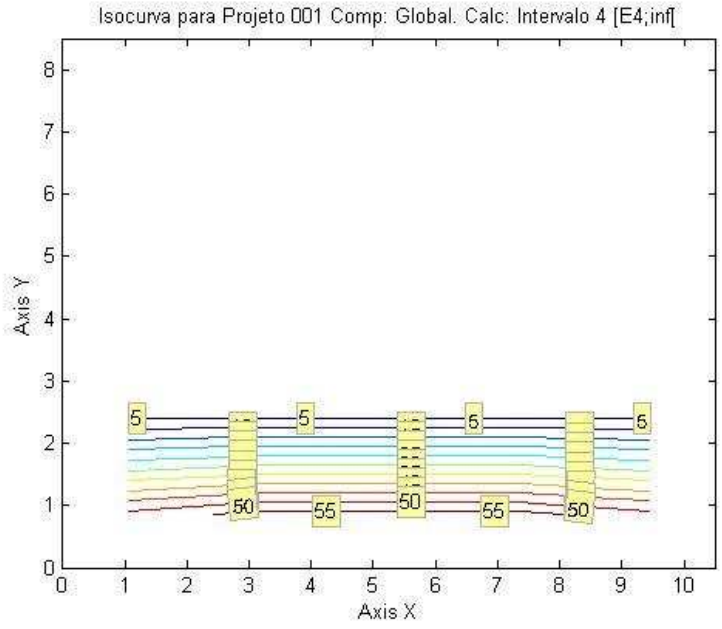
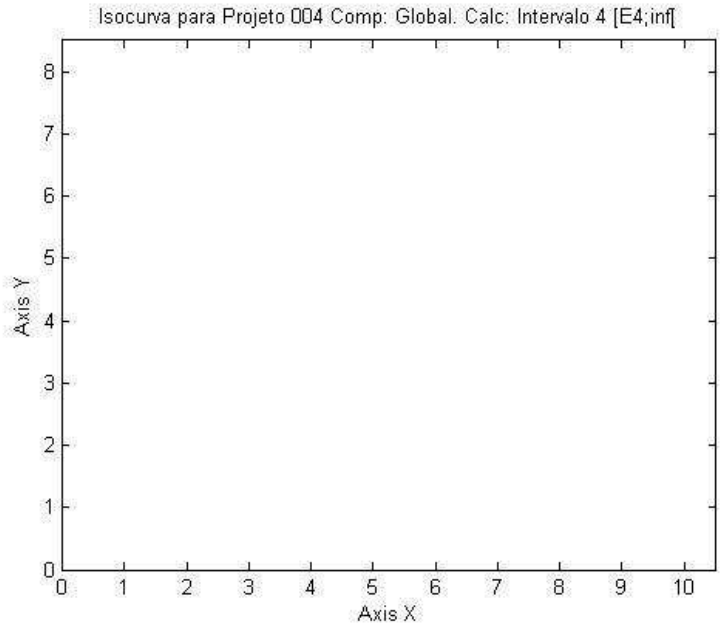
Fonte: elaborado pela autora

Quadro 4.6.1 – Isocurvas dos percentuais de horas do ano com UDI (300lx a 2000lx) - janela voltada para norte sob condição de céu encoberto

Céu encoberto - CIE 01	Caso Base (sem brise) (%)	
	Com brise (%)	

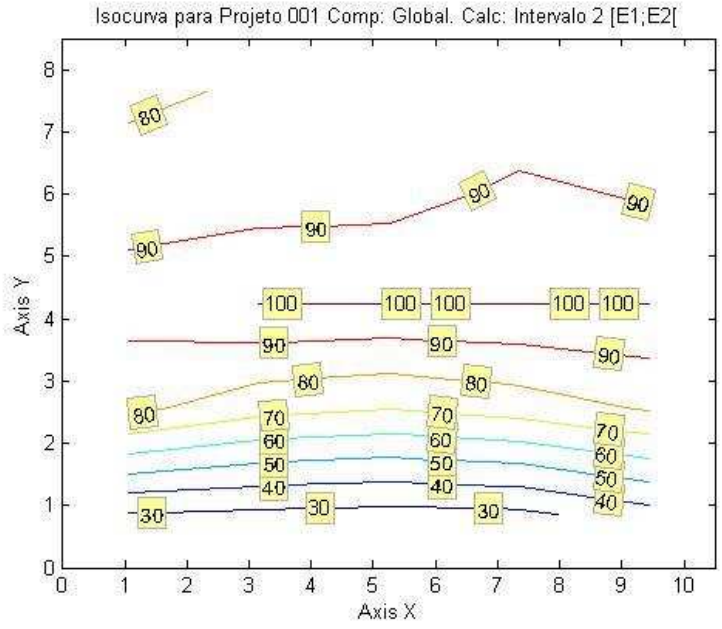
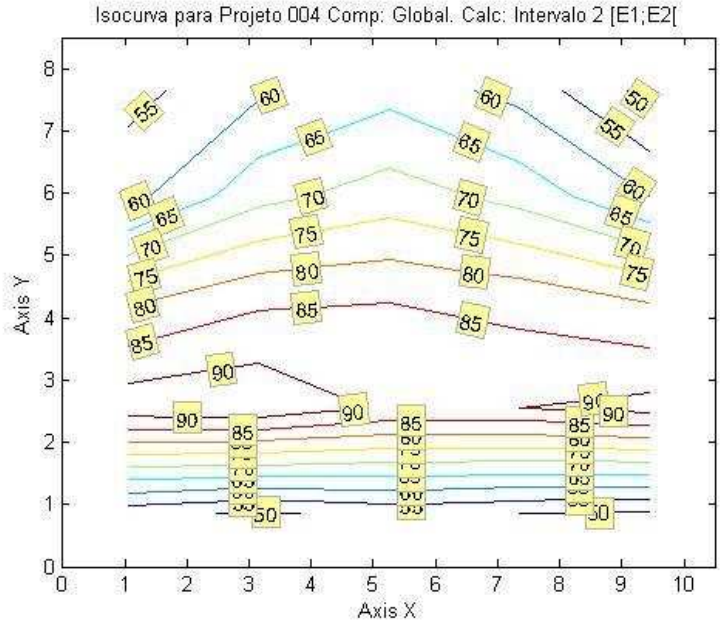
Fonte: elaborado pela autora

Quadro 4.6.2 – Isocurvas dos percentuais de horas do ano com iluminância acima de 2000lx – janela voltada para norte sob condição de céu encoberto

Céu encoberto - CIE 01	Caso Base (sem brise) (%)	
	Com brise (%)	

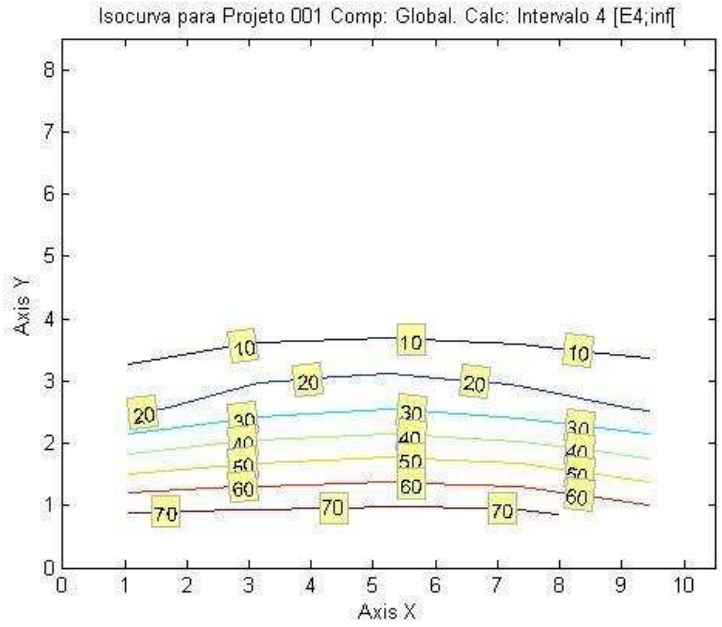
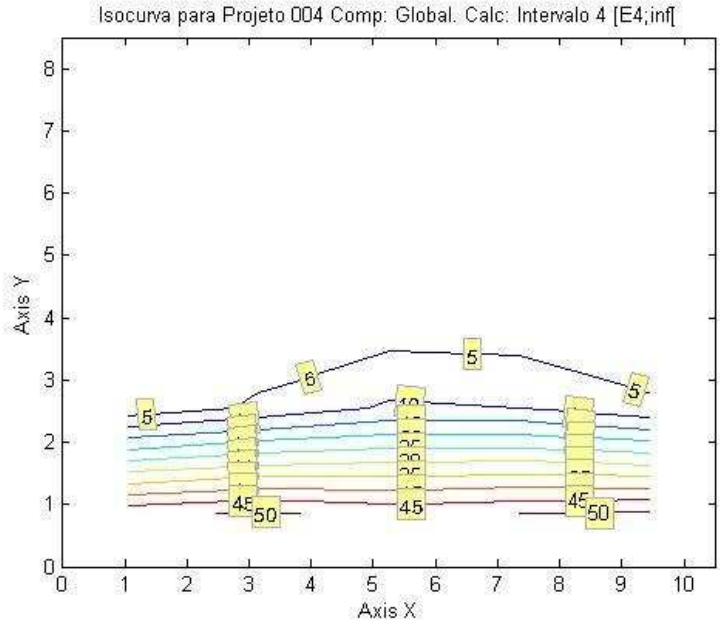
Fonte: elaborado pela autora

Quadro 4.6.3 – Isocurvas dos percentuais de horas do ano com UDI (300lx a 2000lx) - janela voltada para norte sob condição de céu claro

Céu claro - CIE 14	Caso Base (sem brise) (%)	
	Com brise (%)	

Fonte: elaborado pela autora

Quadro 4.6.4 – Isocurvas dos percentuais de horas do ano com iluminância acima de 2000lx – janela voltada para norte sob condição de céu claro

Céu claro - CIE 14	Caso Base (sem brise) (%)	
	Com brise (%)	

Fonte: elaborado pela autora

4.7 Conclusão

O *brise* chaminé solar, desenvolvido e avaliado com relação à indução da ventilação nos Capítulos II e III, mostrou um potencial de redução da temperatura operativa da sala de aula nas quatro orientações analisadas. No caso da cidade de Viçosa, onde a sala de aula não apresentava um percentual significativo de horas em desconforto por calor, a redução da temperatura fez com que aumentasse o percentual de horas em desconforto por frio. Recomenda-se que novos estudos sejam realizados no sentido de avaliar o desempenho do brise-chaminé-solar em cidades onde haja desconforto por calor em um percentual maior de horas do ano.

Ainda com base na avaliação de conforto térmico, foi possível constatar que as situações com quantidades e alturas diferentes de brise-chaminé-solar não influenciou no percentual de horas de conforto, ou seja, as simulações com um número maior de brise-chaminé-solar com altura menor apresentaram resultados muito próximos das simulações com poucos elementos com altura maior.

Ao analisar o número de renovações de ar por hora na sala de aula, constatou-se que o brise-chaminé-solar atendeu as recomendações de renovação de ar da Anvisa, para as três composições em estudo (8 elementos com altura de um pavimento, 4 elementos com altura de 2 pavimentos e 3 elementos com altura de 3 pavimentos) sempre que as temperaturas superficiais da placa absorvedora e do vidro são iguais ou superiores a 45°C.

Com relação ao conforto luminoso, o brise-chaminé-solar apresentou uma capacidade de reduzir os níveis de desconforto por excesso de iluminação em salas de aula. A avaliação de seu desempenho luminoso foi realizada para três condições de céu, sendo mais vantajoso para céu encoberto, pois foi capaz de eliminar o ofuscamento nas quatro orientações avaliadas, sem, contudo, reduzir a área do plano de trabalho com um percentual superior a 70% de horas em que a iluminância de luz natural ficou no intervalo útil de 300lx a 2000lx. Nas situações de céu claro e parcialmente encoberto, apesar dos níveis de ofuscamento terem sido reduzidos pela presença do *brise* chaminé solar, constatou-se que o percentual de UDI na faixa de conforto também reduziu, aumentando, assim, a necessidade de iluminação complementar.

Referências Bibliográficas

ABNT. **NBR 16401-2**: instalações de ar-condicionado: sistemas centrais e unitários: parte 2: parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT. **NR 17**: ergonomia. Rio de Janeiro, 1990.

ABNT. **NBR ISSO/CIE 8995-1**: iluminação de ambientes de trabalho: parte 1: interior. Rio de Janeiro, 2013.

ALVES, M. R. **Manual de ambientes didáticos para graduação**. 1. ed. São Carlos: Suprema, 2011.

ANVISA. **RESOLUÇÃO - RE N° 176**: determina a publicação de orientação técnica elaborada por grupo técnico assessor, sobre padrões referenciais de qualidade do ar interior, em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo. Brasília, DF, 2000.

ASHRAE. Standard 55: thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, Georgia, 2010.

ASHRAE. **Fundamentals Handbook**. Atlanta, Georgia, 2001.

BARBHUIYA, S.; BARBHUIYA, S. Thermal comfort and energy consumption in a UK educational building. **Building and Environment**, v.68, n. 1, p. 1-11, out. 2013.

BELLIA, L.; PEDACE, A.; BARBATO, G. Lighting in educational environments: an example of a complete analysis of the effects of daylight and electric light on occupants. **Building and Environment**, Oxford, v.68, n. 1, p. 50-66, out. 2013.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Eletrobrás. Procel Edifica. **Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso (Ano-Base 2005): Classe Comercial Alta Tensão: Relatório Brasil**. Rio de Janeiro, 2008. 160 p. Disponível em: < http://www.procelinfo.com.br/data/Pages/LUMIS2C33E0C2PTBRIE.htm>. Acesso em: 18 jul. 2014.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário estatístico de energia elétrica 2013**. Rio de Janeiro, 2013. 251 p. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Forms/Anurio.aspx >. Acesso em: 16 jul. 2014.

CARLO, J. C. **Desenvolvimento de metodologia de avaliação da eficiência energética do envoltório de edificações não-residenciais**. 2008. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

CEN. **EN 15251**: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. 2007.

CUI, W.; CAO, G.; PARK, J. H.; OUYANG, Q.; ZHU, Y. Influence of indoor air temperature on human thermal comfort, motivation and performance. **Building and Environment**, v.68, n. 1, p. 114-122, out. 2013.

DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA**. 2008. 160 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campinas, Campinas, 2008.

FERREIRA, A. M. C.; CARDOSO, M. Qualidade do ar interno e saúde em escolas. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, São Paulo, v.40, n. 3, p. 259-268, maio/jun. 2014.

GAO, J.; WARGOCKI, P.; WANG, Y. Ventilation system type, classroom environmental quality and pupils' perceptions and symptoms. **Building and Environment**, v.75, n. 1, p. 46-57, maio. 2014.

ISO. **ISO 7730**: ergonomics of the thermal environment: analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Geneva, 2005.

INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. Portaria n°18, de 16 de janeiro de 2012. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. Rio de Janeiro, 2012.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: [s. n.], 2014. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/apostilas/eficiencia_energetica_na_arquitetura.pdf>. Acesso em: 09 jun. 2014.

LI, Y. **Ventilation**. In: Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier, 2013. p. 01-11. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124095489020029>. Acesso em: 25 mar. 2015.

LIANG, H. H.; LIN, T. P.; HWANG, R. L. Linking occupants' thermal perception and building thermal performance in naturally ventilated school buildings. **Applied Energy**, v.94, n. 1, p. 355-363, jun. 2012.

MENDELL, M. J.; HEATH, G. A. Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. **International Journal of Indoor Environment and Health**, v. 15, n. 1, p. 27-52, jan. 2005.

NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings. **Lighting Research and Technology**, v. 37, n. 1, p. 41-59, fev. 2005.

OCHOA, J. H.; ARAÚJO, D. L.; SATTLER, M. A. Análise do conforto ambiental em salas de aula: comparação entre dados técnicos e a percepção do usuário. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.12, n. 1, p. 91-114, jan./mar. 2012.

OLIVEIRA, M.; MACIEL, L.; CARLO, J. Percepção ambiental e avaliação de desempenho de dispositivos de proteção solar. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., 2014, Maceió. **Anais...** Maceió: Antac, 2014. p. 303-312.

PAES, R. F. S.; BASTOS, L. E. G. Qualidade ambiental na edificação: o caso das escolas públicas da cidade do Rio de Janeiro. **Paranoá**, Brasília, v.1, n. 12, p. 131-140, jan./mar. 2014.

PROCEL. **Dicas de economia de energia: equipamentos**. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7BE6BC2A5F-E787-48AF-B485-439862B17000%7D>. Acesso em: 18 outubro de 2015.

REINHART, C. F.; WEISSMAN, D. A. The daylit area – Correlating architectural student assessments with current and emerging daylight availability metrics. **Building and Environment**, v.50, n. 1, p. 155-164, abr. 2012.

SOUZA, R. C. **Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil: Pesquisa na Classe Comércio e Indústria: Baixa Tensão**. 2007. 27 slides. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B5A08CAF0-06D1-4FFE-B335-95D83F8DFB98%7D&Team=&params=itemID=%7B726E91D1-882A-47C5-9358-F32598E99851%7D;&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>. Acesso em: 19 jan. 2014.

VECCHI, R.; CÂNDIDO, C.; LAMBERTS, R. O efeito da utilização de ventiladores de teto no conforto térmico em salas de aulas com condicionamento híbrido em um local de clima quente e úmido. **Ambiente Construído**, v.13, n. 4, p. 189-202, jul./set. 2013.

CAPÍTULO V

5 Conclusão

Os resultados deste estudo constatam que os programas de simulação EnergyPlus e Ansys CFX apresentaram discrepâncias relevantes, de modo que se torna arriscada a tomada decisões projetuais com base em resultados de simulação não validados. Observou-se que o EnergyPlus não consegue caracterizar o fluxo de ar no interior da chaminé quando as temperaturas superficiais são baixas e o fluxo de ar tende a ser descendente. O processo de simulação CFD foi capaz de descrever o desempenho de chaminés solares de acordo com os modelos reais. Entretanto, ressalta-se a importância da realização de testes para calibração da simulação, uma vez que a configuração inadequada dos parâmetros de simulação pode levar a diferenças significativas nos resultados.

A chaminé solar apresentou um potencial de redução da temperatura operativa de salas de aula. Na cidade de Viçosa-MG, caracterizada por temperaturas amenas, a redução da temperatura fez com que aumentasse o percentual o desconforto por frio. Entende-se que em cidades onde haja desconforto por calor, o brise-chaminé-solar tem potencial para aumentar o percentual de horas em conforto.

O brise-chaminé-solar apresentou taxas de renovação de ar que atendem às recomendações para qualidade do ar interno, especialmente nas situações onde se consegue alcançar temperaturas superficiais acima de 45°C.

Com relação ao seu desempenho na iluminação de salas de aula, o brise-chaminé-solar se mostrou capaz de reduzir os níveis de desconforto por excesso de

iluminação em salas de aula. A avaliação de seu desempenho luminoso foi realizada para três condições de céu, sendo mais vantajoso para céu encoberto. Nas situações de céu claro e parcialmente encoberto, apesar dos níveis de ofuscamento terem sido reduzidos pela presença do brise-chaminé-solar, a faixa de conforto também reduziu, aumentando, assim, a necessidade de iluminação complementar.

5.1 Limitações do trabalho

Além das simplificações realizadas durante as simulações e a impossibilidade de controlar todos os fenômenos que estavam ocorrendo durante as medições, destaca-se como limitação do trabalho o fato de que apenas um elemento foi construído como protótipo, o que inviabilizou a análise do funcionamento de mais de uma chaminé solar trabalhando concomitantemente em um mesmo ambiente.

O relevo do entorno da edificação também pode ser considerado uma limitação, pois reduziu o período do dia em que a chaminé solar receberia radiação solar.

A quantidade de anemômetros disponíveis constitui outra limitação do trabalho, uma vez que inviabilizou a elaboração de perfis de velocidade do ar e a medição simultânea em mais de três pontos.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Novas alternativas de projeto do *brise* chaminé solar podem ser investigadas futuramente. Sugere-se o estudo da inserção de painéis fotovoltaicos na placa absorvedora. Recomenda-se ainda investigações sobre o uso de PCM para evitar quedas bruscas de temperatura decorrentes das trocas de calor sensível. Além disso, sugere-se a avaliação de chaminés com alturas maiores, para que se investigue a possibilidade de uma mesma chaminé solar atender a mais de um ambiente.

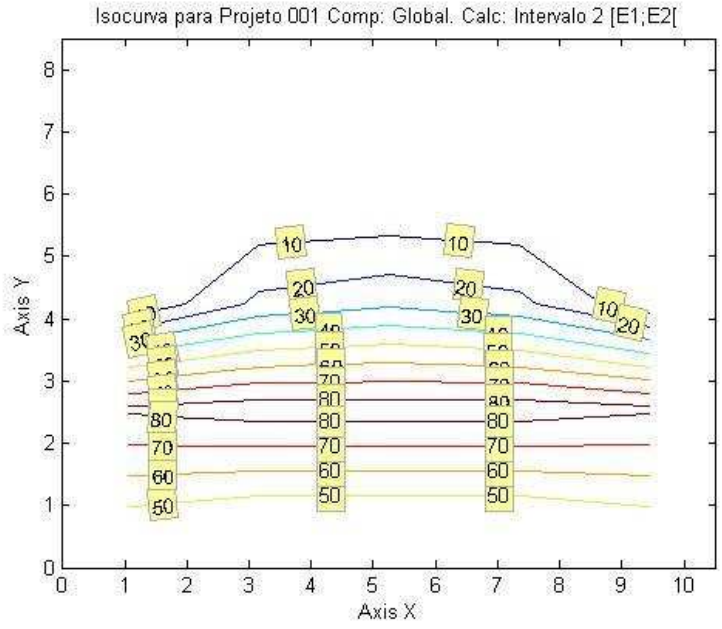
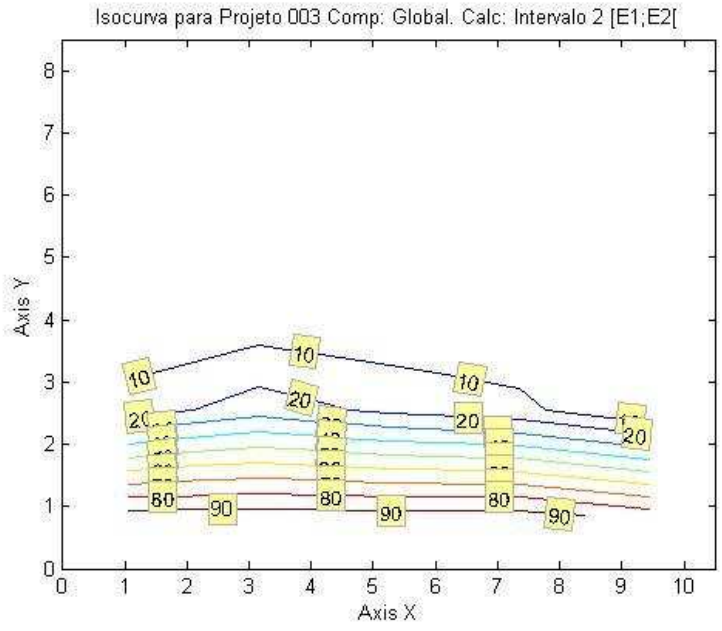
Com relação à iluminação natural de salas de aula, sugere-se a realização de estudos que investiguem o limite de iluminância que causa desconforto aos usuários, uma vez que o limite de 2000lx estabelecido pelas normas vigentes pode estar sendo subestimado.

Sugere-se também a avaliação do desempenho térmico da chaminé solar em outras Zonas Bioclimáticas, especialmente aquelas de climas mais quentes.

APÊNDICE I

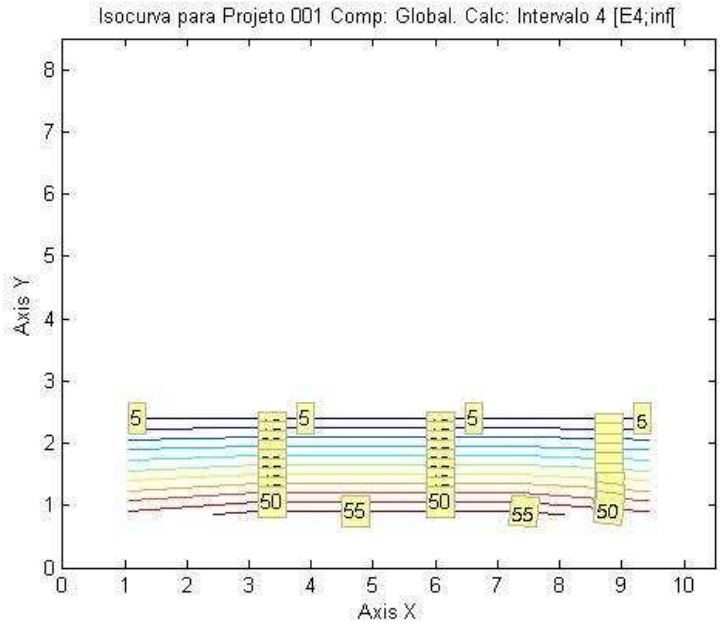
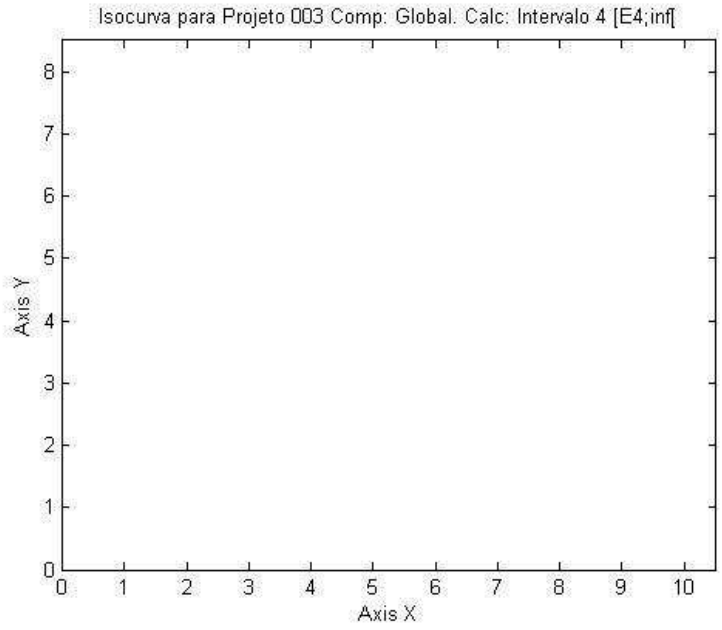
Apêndice I: desempenho luminoso de uma sala de aula com brise-chaminé-solar

Quadro A.I.1 – Isocurvas dos percentuais de UDI (300lx a 2000lx) - janela voltada para leste sob condição de céu encoberto

Céu encoberto - CIE 01	Caso Base (sem brise) (%)	
	Com brise (%)	

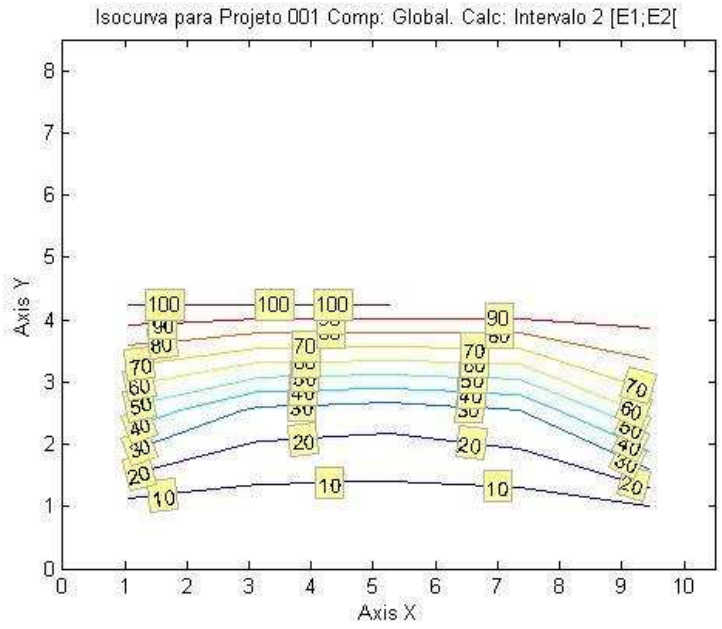
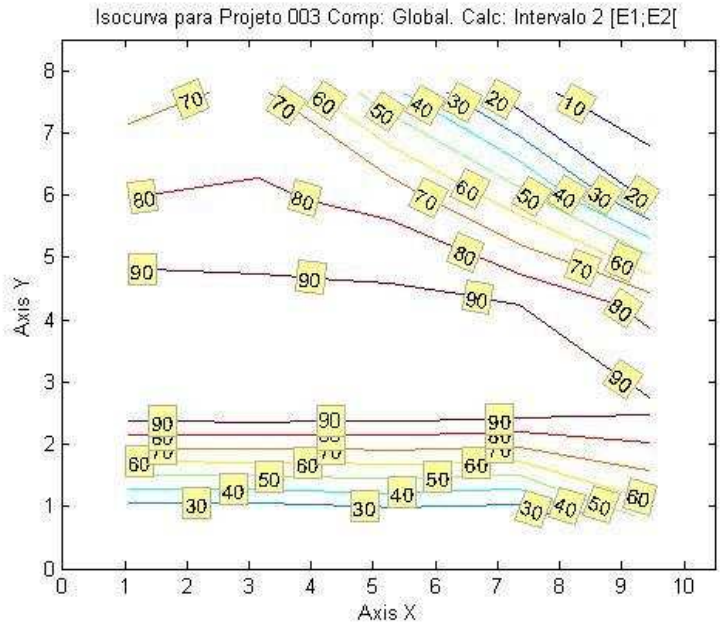
Fonte: elaborado pela autora

Quadro A.I.2 – Isocurvas dos percentuais de iluminância acima de 2000lx - janela voltada para leste sob condição de céu encoberto

Céu encoberto - CIE 01	Caso Base (sem brise) (%)	
	Com brise (%)	

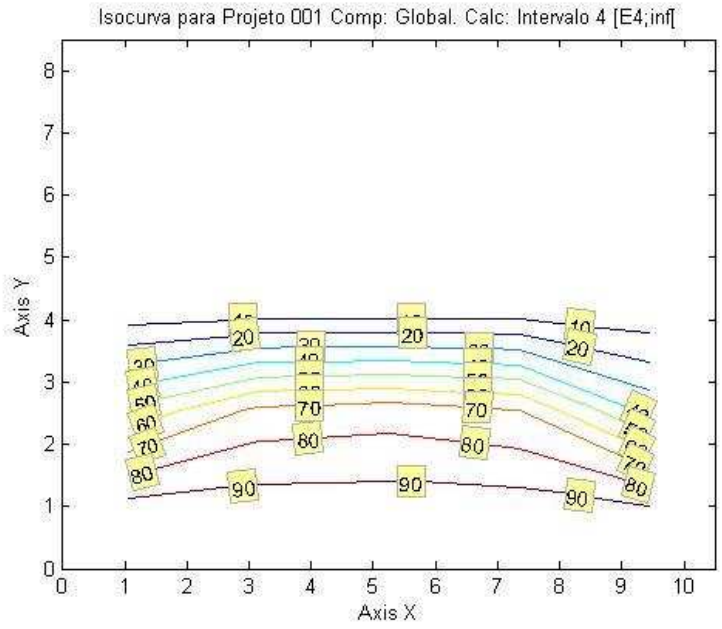
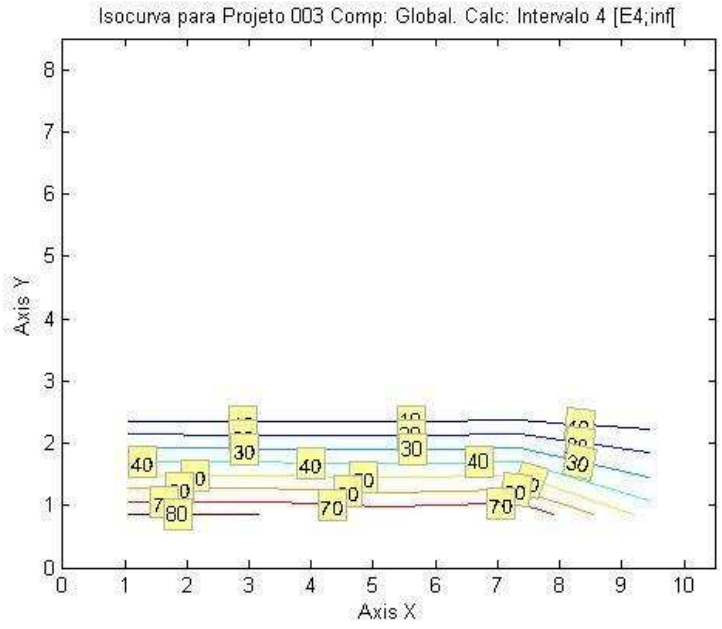
Fonte: elaborado pela autora

Quadro A.I.3 – Isocurvas dos percentuais de UDI (300lx a 2000lx) - janela voltada para leste sob condição de céu parcialmente encoberto

Céu parcialmente encoberto - CIE 10	Caso Base (sem brise) (%)	
	Com brise (%)	

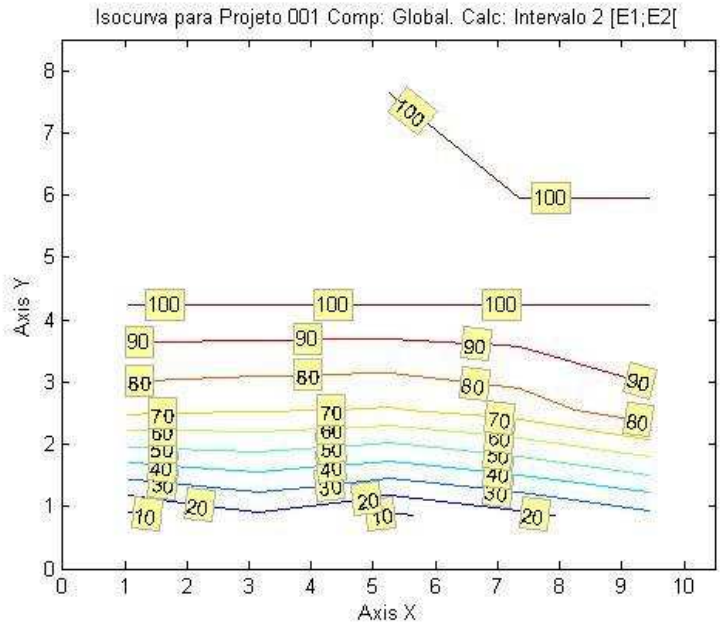
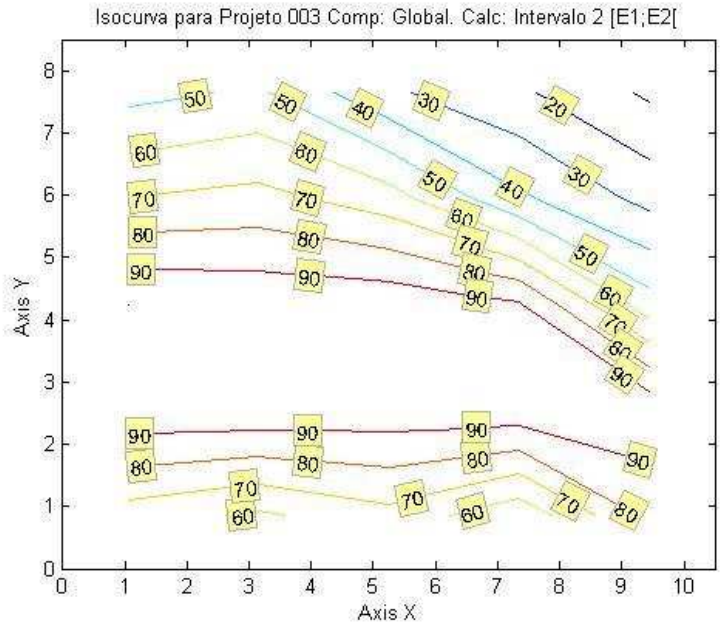
Fonte: elaborado pela autora

Quadro A.I.4 – Isocurvas dos percentuais de iluminância acima de 2000lx - janela voltada para leste sob condição de céu parcialmente encoberto

Céu parcialmente encoberto - CIE 10	Caso Base (sem brise) (%)	
	Com brise (%)	

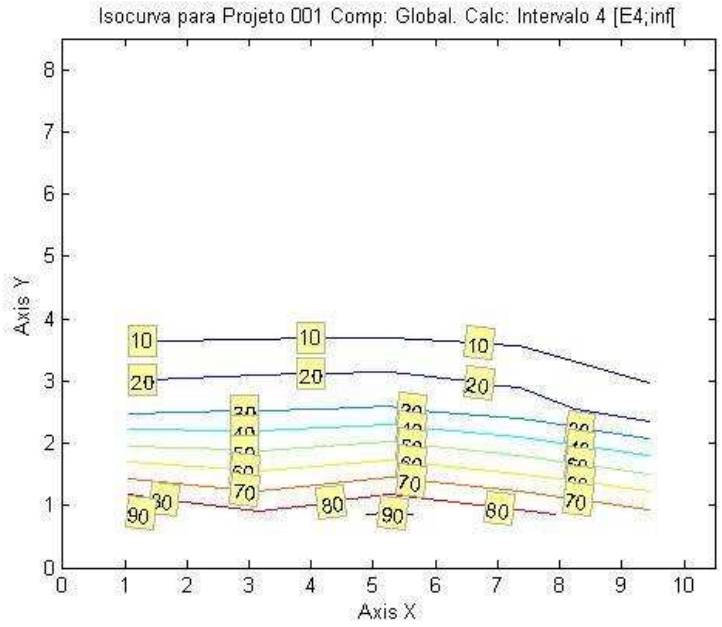
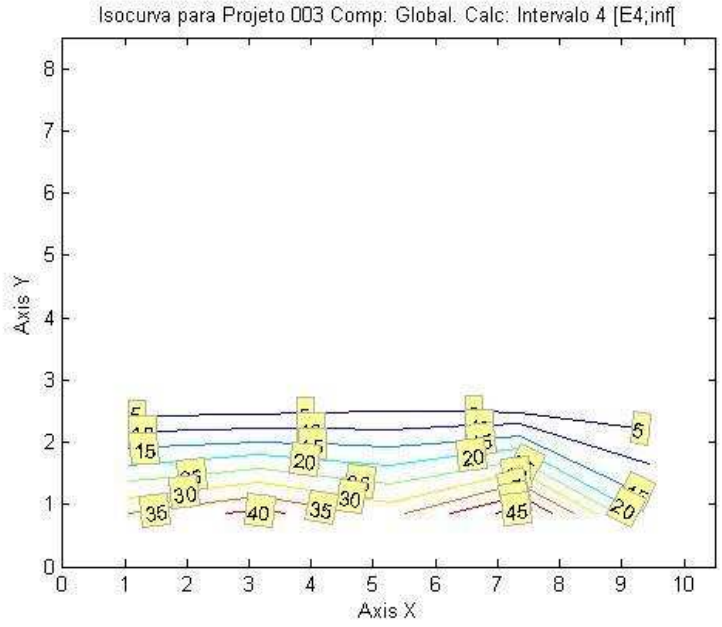
Fonte: elaborado pela autora

Quadro A.I.5 – Isocurvas dos percentuais de UDI (300lx a 2000lx) - janela voltada para leste sob condição de céu claro

Céu claro - CIE 14	Caso Base (sem brise) (%)	
	Com brise (%)	

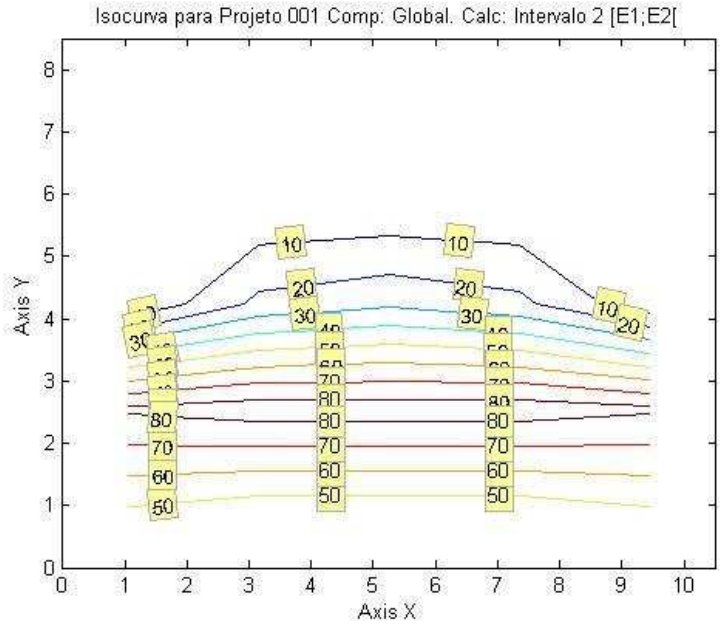
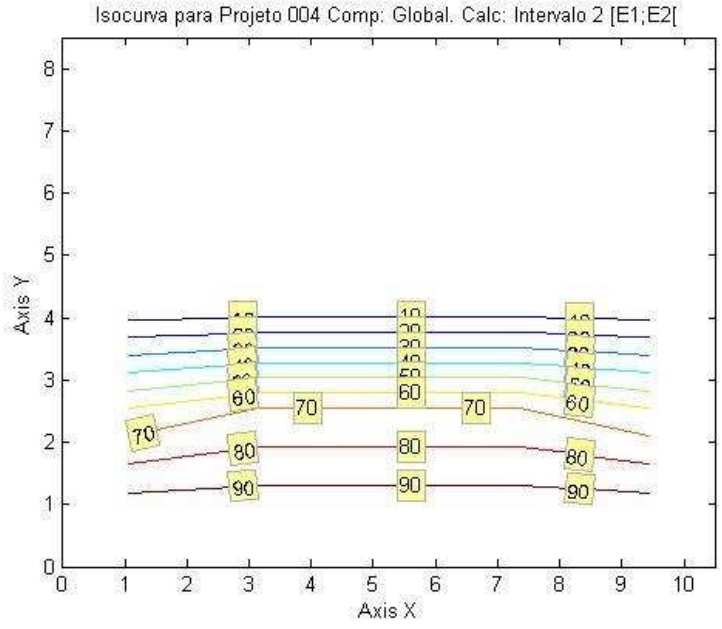
Fonte: elaborado pela autora

Quadro A.I.6 – Isocurvas dos percentuais de iluminância acima de 2000lx - janela voltada para leste sob condição de céu claro

Céu claro - CIE 14	Caso Base (sem brise) (%)	
	Com brise (%)	

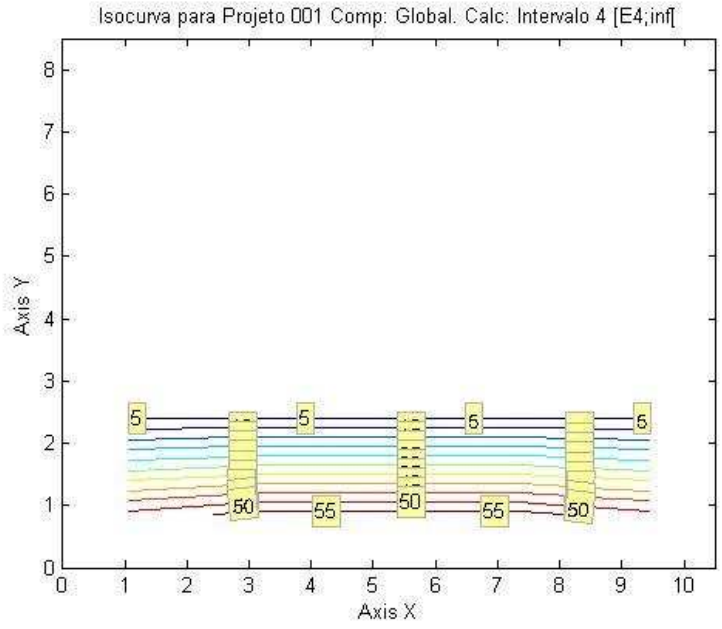
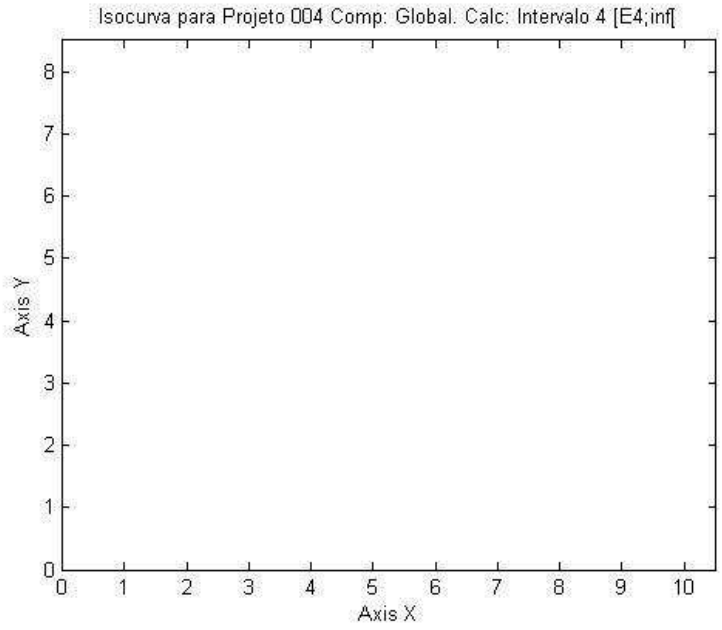
Fonte: elaborado pela autora

Quadro A.I.7 – Isocurvas dos percentuais de UDI (300lx a 2000lx) - janela voltada para sul sob condição de céu encoberto

Céu encoberto - CIE 01	Caso Base (sem brise) (%)	
	Com brise (%)	

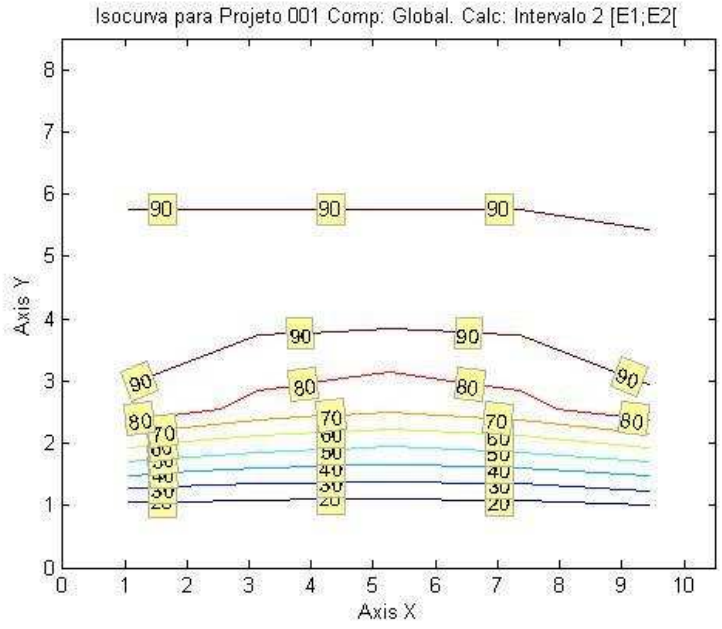
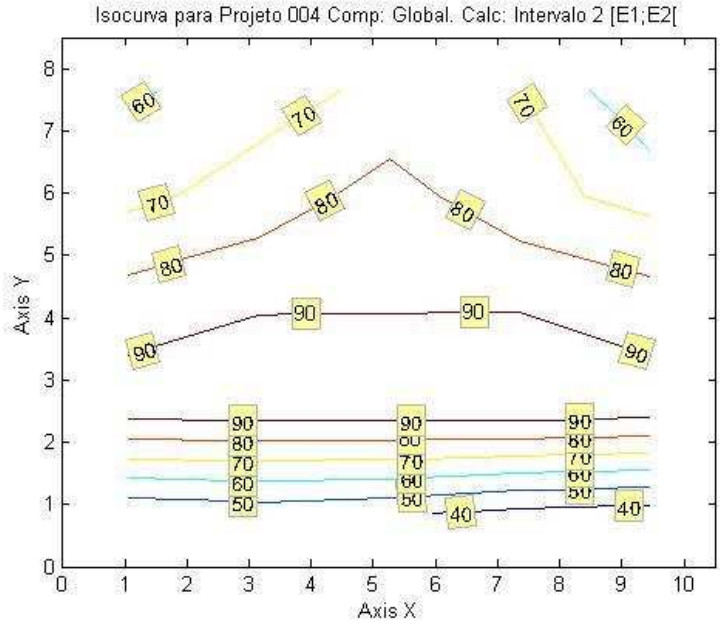
Fonte: elaborado pela autora

Quadro A.I.8 – Isocurvas dos percentuais de iluminância acima de 2000lx - janela voltada para sul sob condição de céu encoberto

Céu encoberto - CIE 01	Caso Base (sem brise) (%)	
	Com brise (%)	

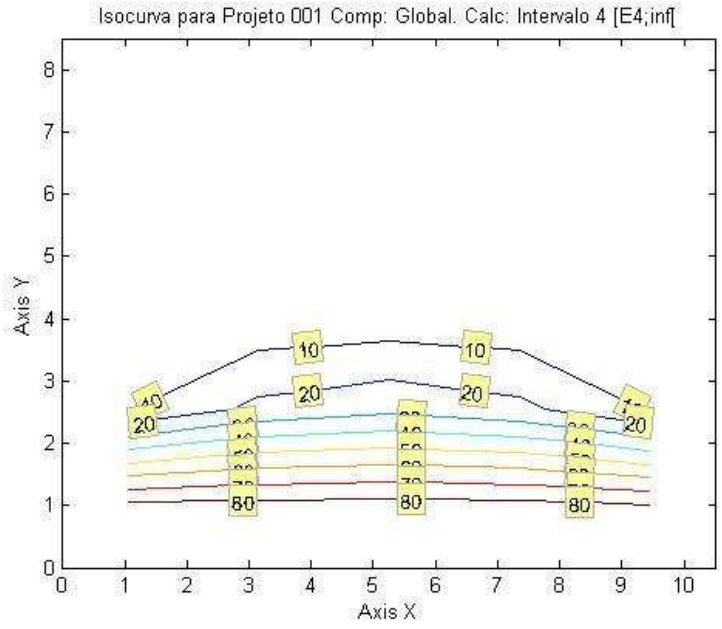
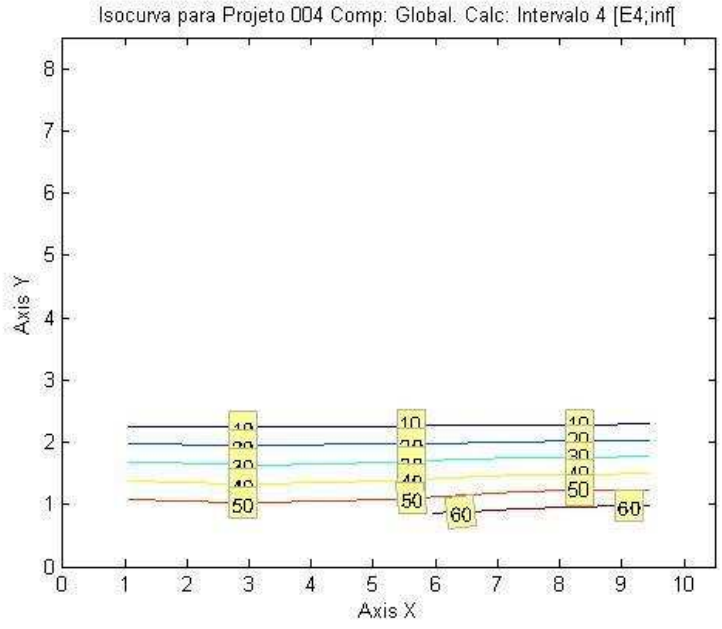
Fonte: elaborado pela autora

Quadro A.I.9 – Isocurvas dos percentuais de UDI (300lx a 2000lx) - janela voltada para sul sob condição de céu parcialmente encoberto

Céu parcialmente encoberto - CIE 10	Caso Base (sem brise) (%)	
	Com brise (%)	

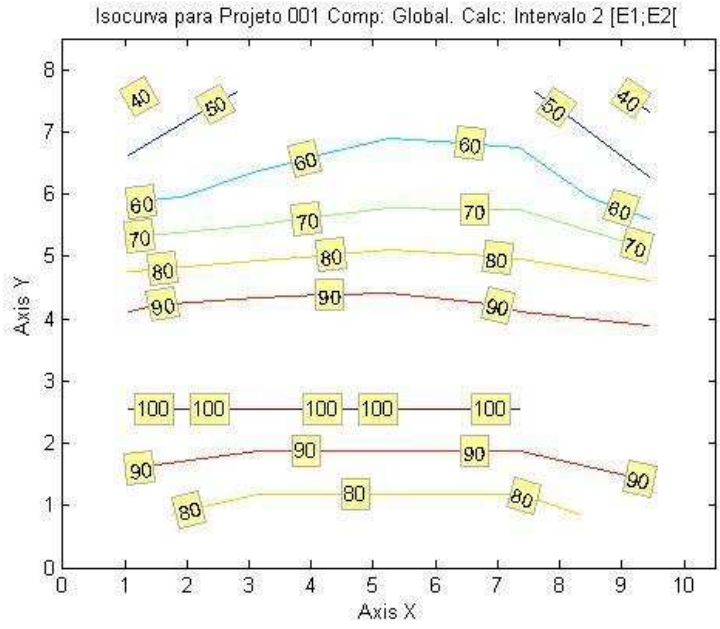
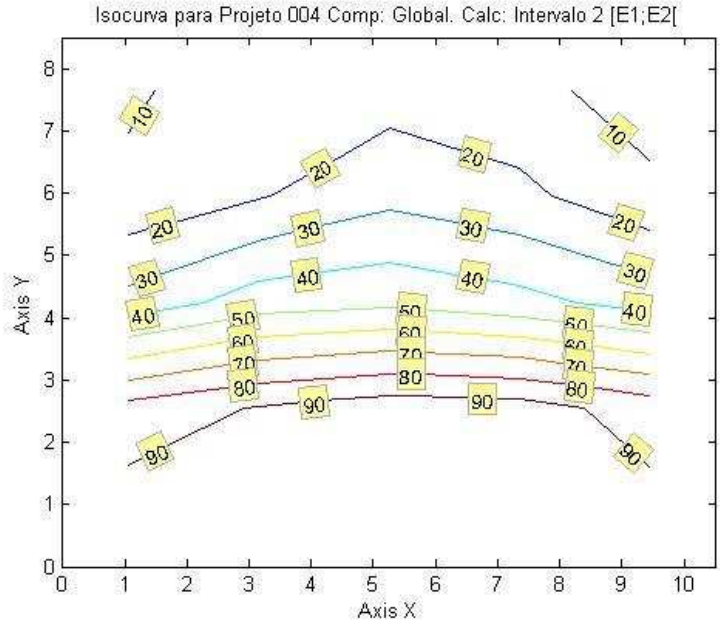
Fonte: elaborado pela autora

Quadro A.I.10 – Isocurvas dos percentuais de iluminância acima de 2000lx - janela voltada para sul sob condição de céu parcialmente encoberto

Céu parcialmente encoberto - CIE 10	Caso Base (sem brise) (%)	
	Com brise (%)	

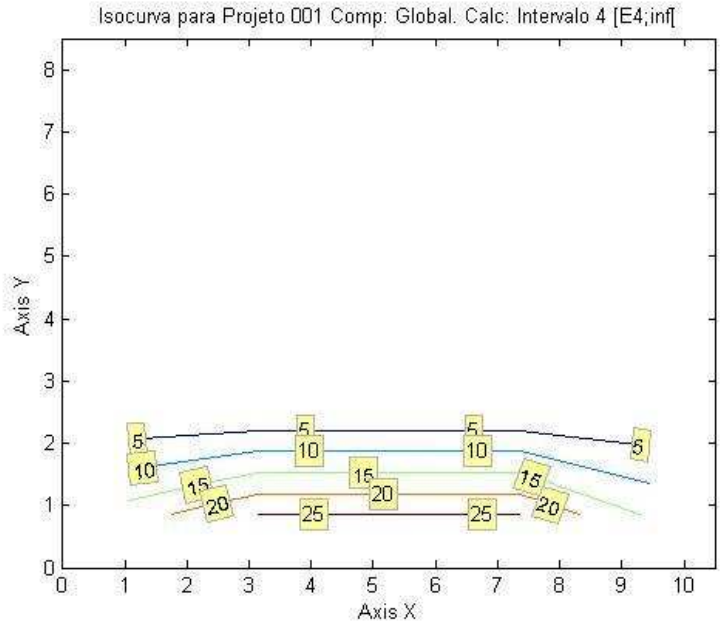
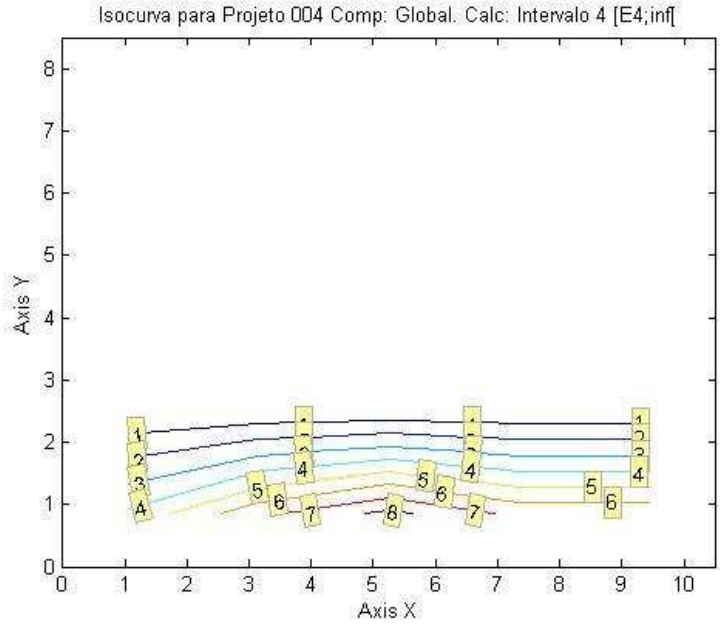
Fonte: elaborado pela autora

Quadro A.I.11 – Isocurvas dos percentuais de UDI (300lx a 2000lx) - janela voltada para sul sob condição de céu claro

Céu claro - CIE 14	Caso Base (sem brise) (%)	
	Com brise (%)	

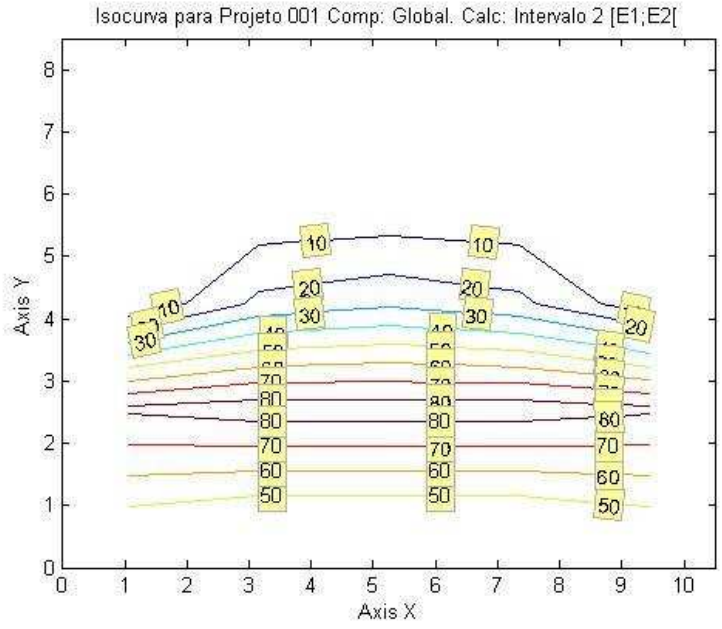
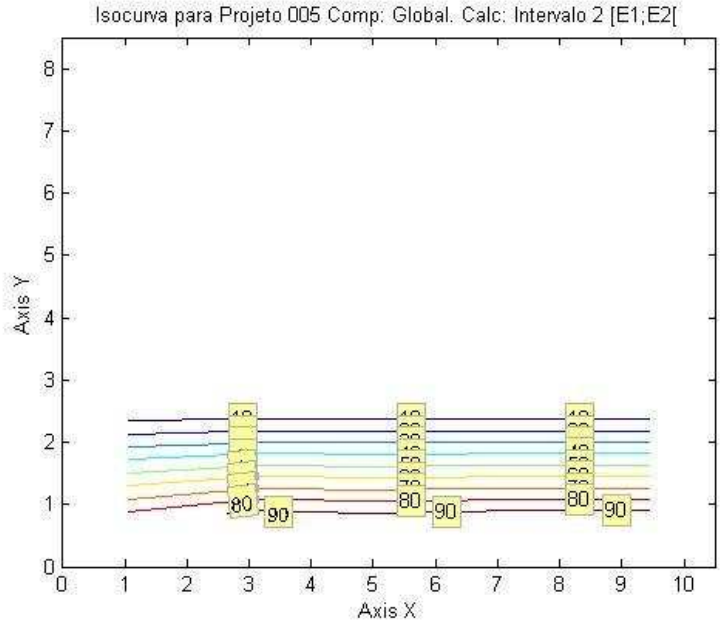
Fonte: elaborado pela autora

Quadro A.I.12 – Isocurvas dos percentuais de iluminância acima de 2000lx - janela voltada para sul sob condição de céu claro

Céu claro - CIE 14	Caso Base (sem brise) (%)	
	Com brise (%)	

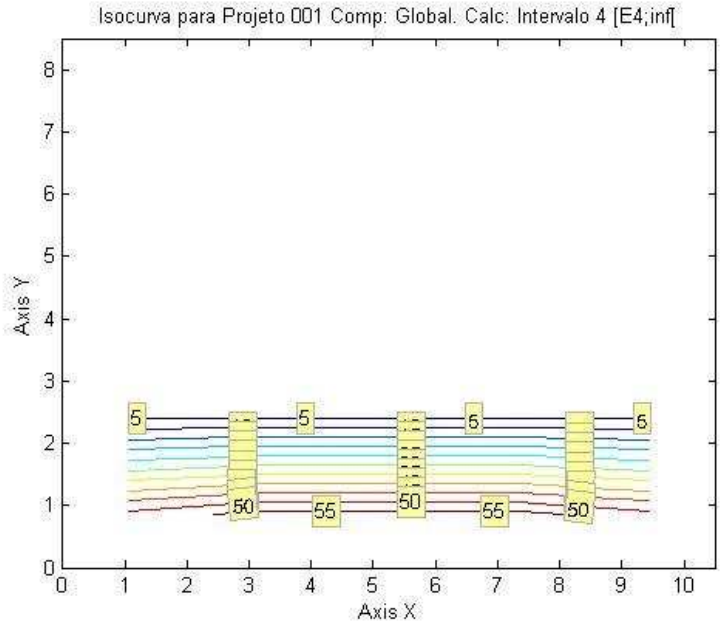
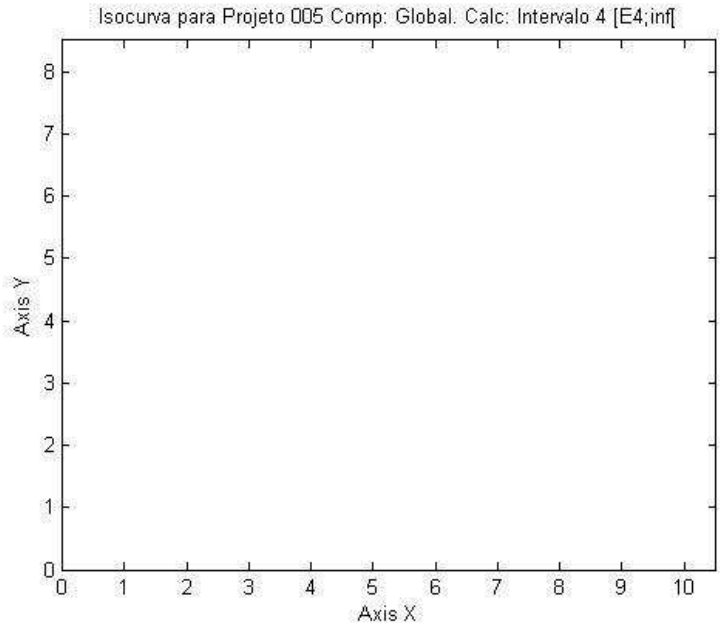
Fonte: elaborado pela autora

Quadro A.I.13 – Isocurvas dos percentuais de UDI (300lx a 2000lx) - janela voltada para oeste sob condição de céu encoberto

Céu encoberto - CIE 01	Caso Base (sem brise) (%)	
	Com brise (%)	

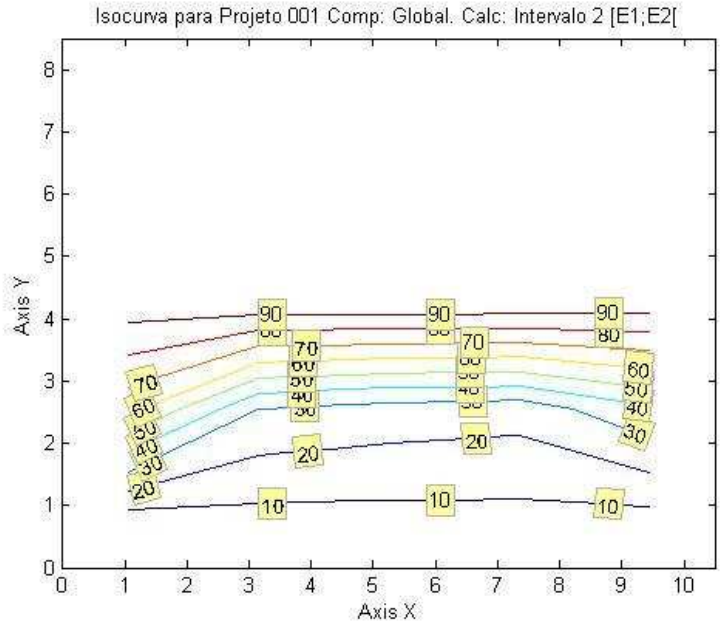
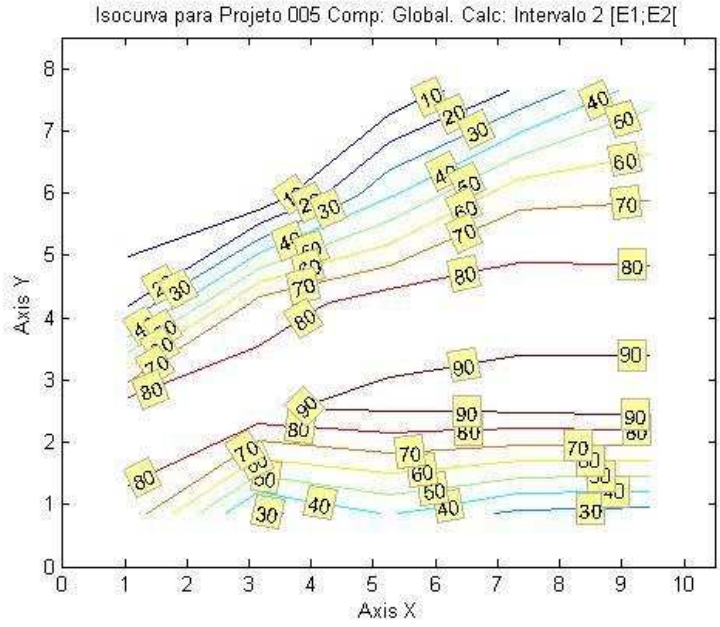
Fonte: elaborado pela autora

Quadro A.I.14 – Isocurvas dos percentuais de iluminância acima de 2000lx - janela voltada para oeste sob condição de céu encoberto

Céu encoberto - CIE 01	Caso Base (sem brise) (%)	
	Com brise (%)	

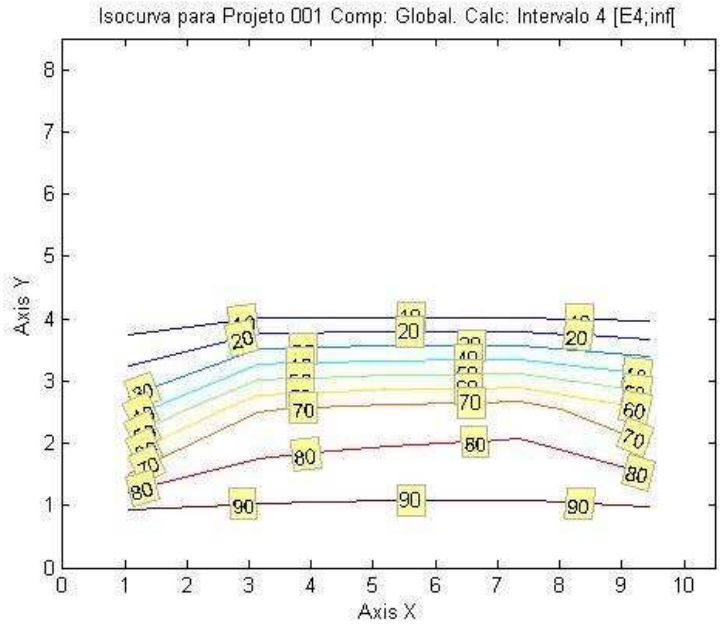
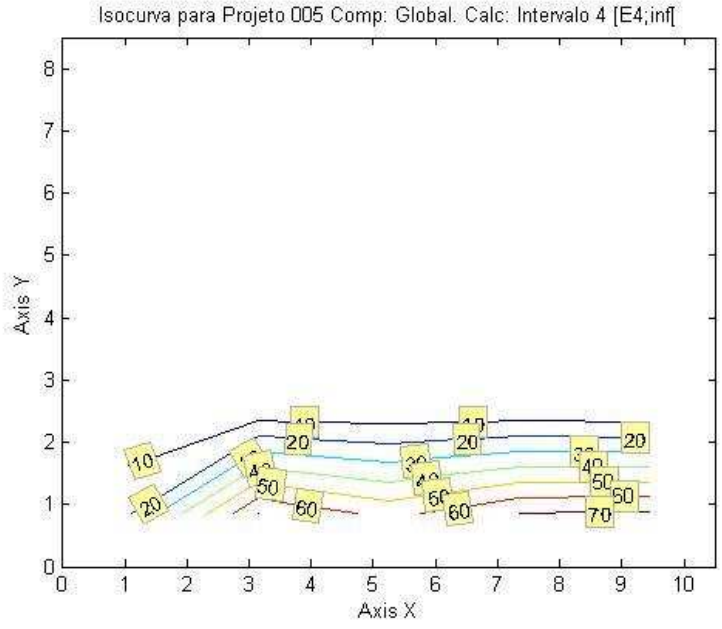
Fonte: elaborado pela autora

Quadro A.I.15 – Isocurvas dos percentuais de UDI (300lx a 2000lx) - janela voltada para oeste sob condição de céu parcialmente encoberto

Céu parcialmente encoberto - CIE 10	Caso Base (sem brise) (%)	
	Com brise (%)	

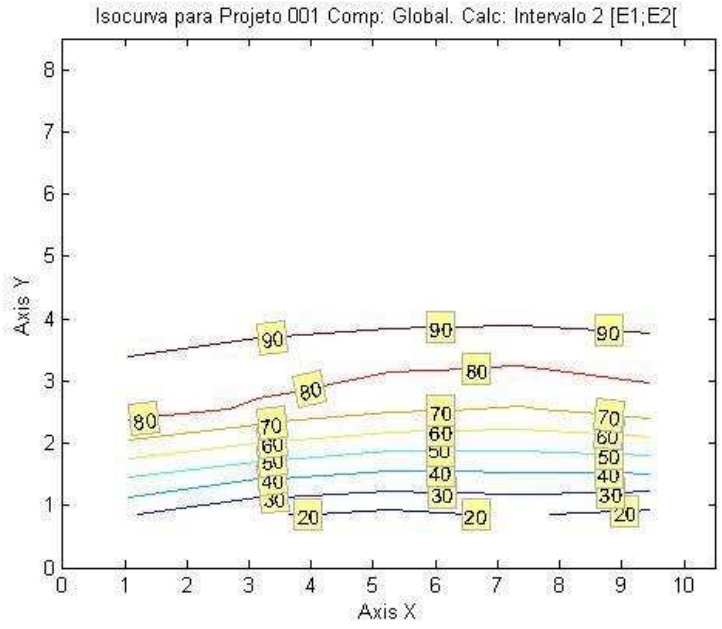
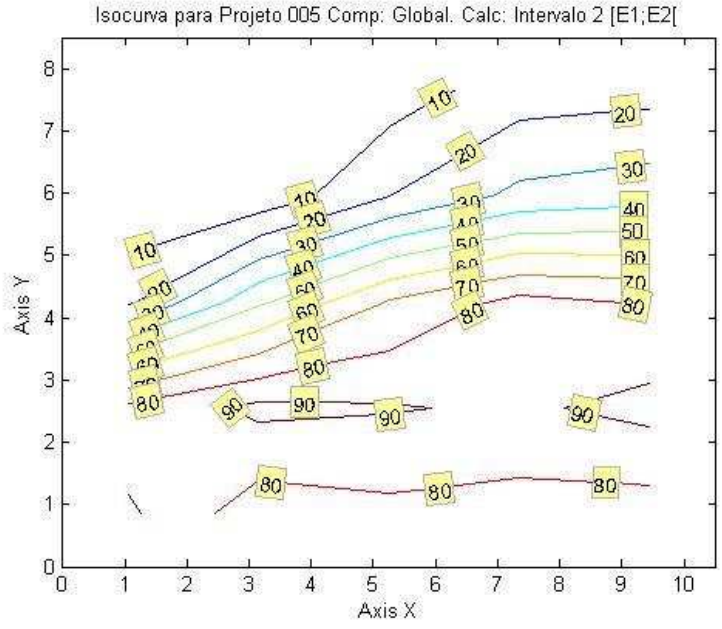
Fonte: elaborado pela autora

Quadro A.I.16 – Isocurvas dos percentuais de iluminância acima de 2000lx - janela voltada para oeste sob condição de céu parcialmente encoberto

Céu parcialmente encoberto - CIE 10	Caso Base (sem brise) (%)	
	Com brise (%)	

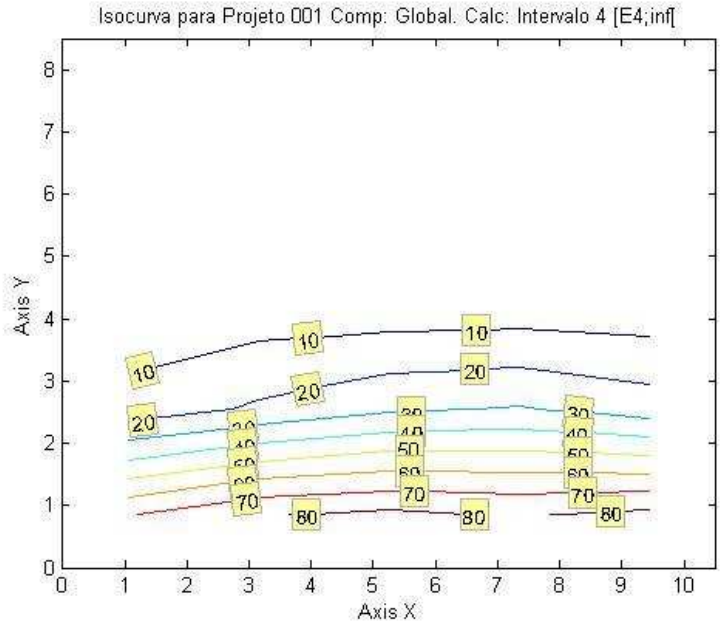
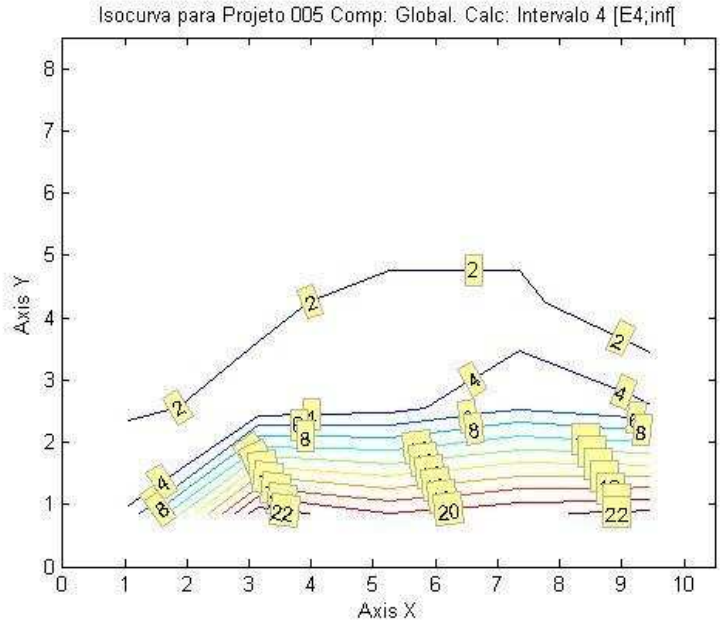
Fonte: elaborado pela autora

Quadro A.I.17 – Isocurvas dos percentuais de UDI (300lx a 2000lx) - janela voltada para oeste sob condição de céu claro

Céu claro - CIE 14	Caso Base (sem brise) (%)	
	Com brise (%)	

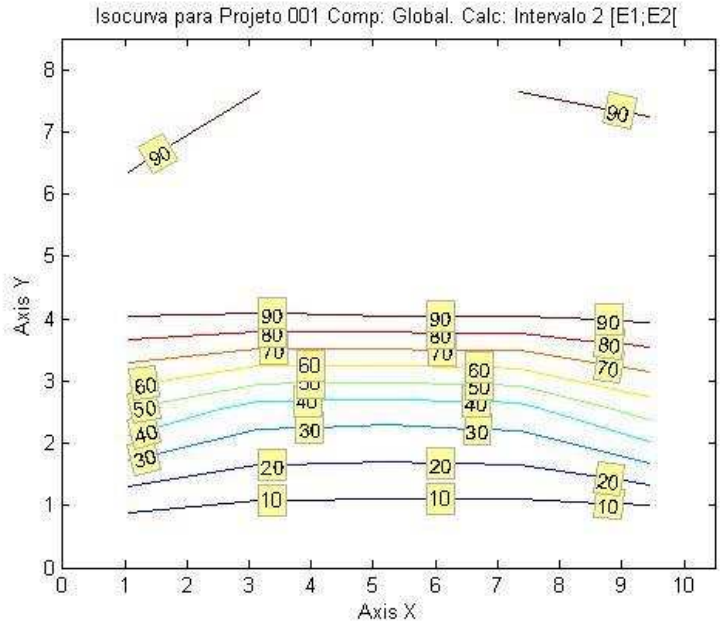
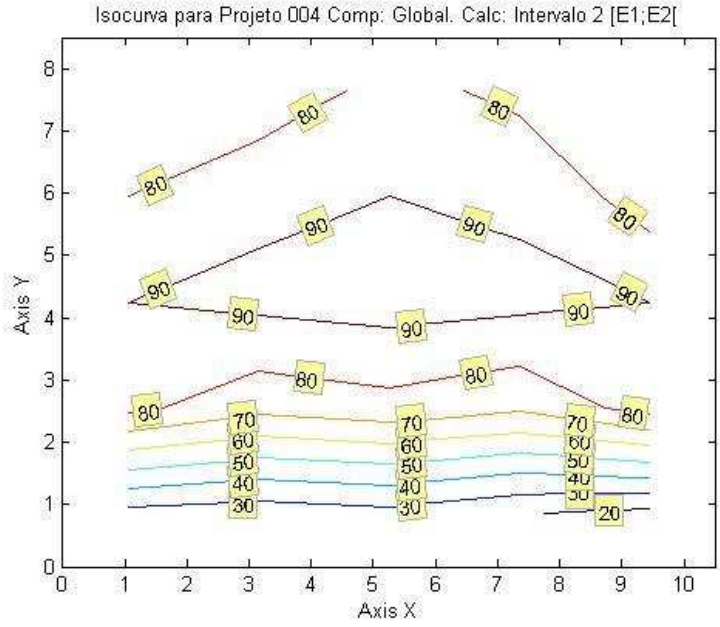
Fonte: elaborado pela autora

Quadro A.I.18 – Isocurvas dos percentuais de iluminância acima de 2000lx – janela voltada para oeste sob condição de céu claro

Céu claro - CIE 14	Caso Base (sem brise) (%)	
	Com brise (%)	

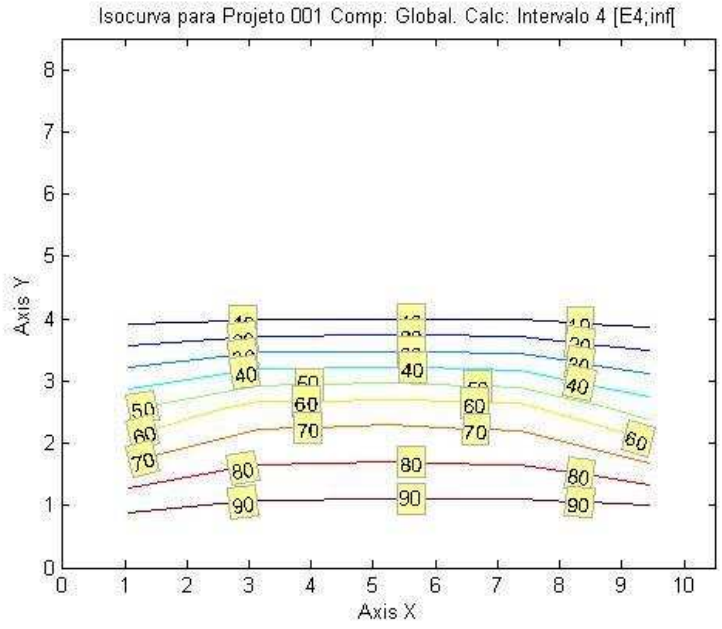
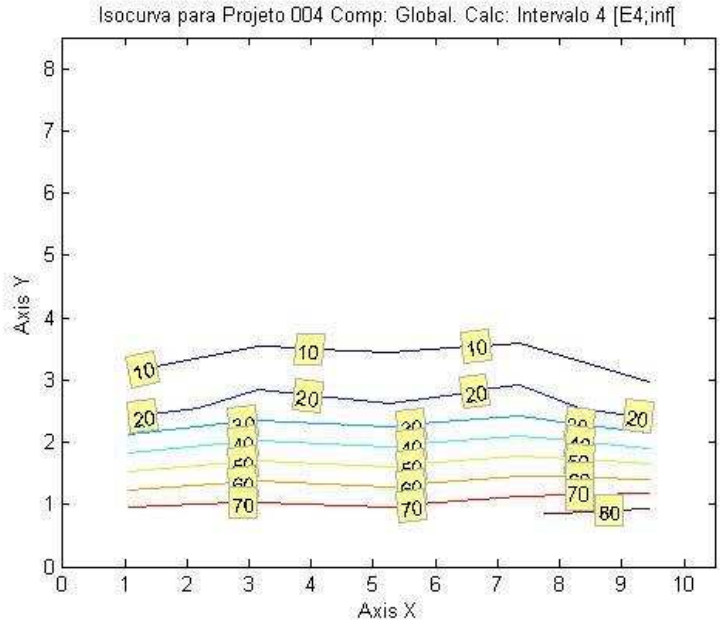
Fonte: elaborado pela autora

Quadro A.I.19 – Isocurvas dos percentuais de UDI (300lx a 2000lx) - janela voltada para norte sob condição de céu parcialmente encoberto

Céu parcialmente encoberto - CIE 10	Caso Base (sem brise) (%)	
	Com brise (%)	

Fonte: elaborado pela autora

Quadro A.I.20 – Isocurvas dos percentuais de iluminância acima de 2000lx – janela voltada para norte sob condição de céu parcialmente encoberto

Céu parcialmente encoberto - CIE 10	Caso Base (sem brise) (%)	
	Com brise (%)	

Fonte: elaborado pela autora