CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
THALES DE FREITAS VILLAS BÔAS

DESENVOLVIMENTO DE UMA CHAMINÉ SOLAR COM DUPLA ENTRADA PARA REMOÇÃO DE AR DA ZONA SUPERIOR E INFERIOR DE AMBIENTES INTERNOS

São Bernardo do Campo
2019

THALES DE FREITAS VILLAS BÔAS

DESENVOLVIMENTO DE UMA CHAMINÉ SOLAR COM DUPLA ENTRADA PARA REMOÇÃO DE AR DA ZONA SUPERIOR E INFERIOR DE AMBIENTES INTERNOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro Universitário FEI para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Orientado pelo Prof. Dr. Cyro Albuquerque Neto.

São Bernardo do Campo

2019

Villas Bôas, Thales de Freitas.
Desenvolvimento de uma Chaminé Solar com Dupla Entrada para Remoção de Ar da Zona Superior e Inferior de Ambientes Internos / Thales de Freitas Villas Bôas. São Bernardo do Campo, 2019.
186 f. : il.

Dissertação - Centro Universitário FEI.
Orientador: Prof. Dr. Cyro Albuquerque Neto.

1. Chaminé Solar. 2. Convecção Natural. 3. Conforto Térmico. I. Albuquerque Neto, Cyro, orient. II. Título.

Elaborada pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da FEI com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

centro universitário FEI

APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO
ATA DA BANCA EXAMINADORA

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Mecânica

Mestrado

PGM-10

Aluno: Thales de Freitas Villas Bôas **Matrícula:** 216129-7

Título do Trabalho: Desenvolvimento de uma chaminé solar com dupla entrada para remoção de ar da zona superior e inferior de ambientes internos.

Área de Concentração: Sistemas Mecânicos

Orientador: Prof. Dr. Cyro Albuquerque Neto

Data da realização da defesa: 25/02/2019

ORIGINAL ASSINADA

Avaliação da Banca Examinadora:

São Bernardo do Campo, / / .

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA	
Prof. Dr. Cyro Albuquerque Neto	Ass.:
Prof. Dr. Alfredo José Alvim de Castro	Ass.:
Prof. Dr. Bruno Souza Carmo	Ass.:

A Banca Julgadora acima-assinada atribuiu ao aluno o seguinte resultado:

APROVADO ☒ REPROVADO ☐

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

APROVO A VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO EM QUE FORAM INCLUÍDAS AS RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco

Dedico este trabalho à Deus, minha família e meus amigos pelo apoio e compreensão em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Cyro Albuquerque Neto, por todos estes anos de ensinamentos, críticas e incentivos, bem como pela incrível dedicação e profissionalismo para com este trabalho.

Ao meu amigo e integrante do grupo de pesquisa, Me. Felipe Person Malta, pelo auxílio em diversas fases do trabalho.

Aos técnicos do Centro de Laboratórios Mecânicos (CLM), Maurício, Valdir e Adriano, por todo o empenho e ajuda que forneceram durante os experimentos.

Ao Centro Universitário FEI, pela bolsa de estudos, por toda infraestrutura, materiais e livros cedidos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Aos meus familiares e amigos pela compreensão e apoio nas minhas decisões, bem como pelos diversos elogios e críticas construtivas realizadas.

RESUMO

O consumo energético atual é decorrente de diversos fatores, dentre eles, a utilização em massa de sistemas de refrigeração e ar condicionado, que sofrem aumento de demanda devido ao aumento de temperatura global ao longo dos anos. Diversas formas de energia alternativa estão sendo estudadas, assim como sistemas passivos e sustentáveis, neste contexto, surgem diversos dispositivos solares, que embora possuam geralmente baixa eficiência de conversão, possuem enorme potencial devido a abundância da energia solar. Uma chaminé solar vertical de dupla entrada é proposta neste trabalho, visando promover a ventilação simultânea da parte superior e inferior de ambientes e desta forma promover o conforto térmico. Para tal, um procedimento experimental foi elaborado e um aparato fora construído, sendo posteriormente instrumentado com termopares e um anemômetro calibrado a fim de se levantar os perfis de temperatura e de velocidade no escoamento. Diversas variações geométricas foram testadas, sendo que os experimentos ainda contemplaram imagens térmicas de algumas superfícies, bem como uma visualização do escoamento através de imagens coletadas com auxílio de uma máquina de fumaça. Os resultados puderam ser correlacionados com diversos fenômenos encontrados na literatura e evidenciaram a capacidade da chaminé solar proposta, indicando que não somente a chaminé é capaz de ventilar ambas as zonas do ambiente, mas seu desempenho foi aprimorado, possibilitando um aumento de vazão de até 23% em relação à uma chaminé solar convencional, ou seja, com apenas uma entrada e uma saída. Foi demonstrado também que, a chaminé solar proposta é capaz de atingir vazões comparáveis com chaminés convencionais de maiores dimensões, mesmo ocupando um volume menor.

Palavras-chave: Chaminé solar. Convecção natural. Conforto térmico.

ABSTRACT

Energy consumption nowadays is related to many factors, among them is the massive usage of air conditioning and refrigeration systems, which suffers from an increase in demand due to the increase of worldwide temperature along the years. Plenty types of alternative energy are being study, as well as passive and sustainable systems, in this context are many solar devices that despite its low conversion efficiency, have great potential due to solar energy abundance. A double inlet vertical solar chimney is here proposed, with the intention to promote simultaneous ventilation to both top and bottom portions of an internal environment, while increasing thermal comfort. By assuming this, an experimental procedure was developed, and an apparatus was built, later receiving an instrumentation with thermocouples and a calibrated anemometer to acquire both temperature and speed profiles on airflow. Many geometric variations were tested and the experiments also covered some surface's thermal images as well as a flow visualization by taking pictures with the help of a smoke machine. The results were correlated with many flow behaviors found on the literature and showed the chimney's potential, indicating that not only the chimney is capable of ventilating both portions of the environment, but its performance was also increased, allowing an increase on airflow by up to 23% in relation to a solar conventional chimney, in other words, with only one inlet and one outlet. It was also found that this proposed solar chimney can reach an airflow output similar to what is obtained with larger conventional solar chimneys, but still occupying a smaller volume.

Keywords: Solar chimney. Natural convection. Thermal comfort.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Funcionamento da chaminé solar no verão ou inverno 19
Figura 2 - Chaminé proposta neste trabalho 20
Figura 3 – Associação das vestimentas (índice CLO), do metabolismo (índice MET), temperatura do ambiente e atividade desenvolvida no conforto térmico) 23
Figura 4 - Carta Bioclimática de Givoni para São Paulo 24
Figura 5 – Processos de transmissão de calor entre o ambiente e o ser humano e suas variáveis 25
Figura 6 – Aumento do consumo de energia primária, emissão de CO_2 e aumento populacional global ao longo do período de 1984 e 2004 27
Figura 7 – Diagrama azimute para São Paulo 29
Figura 8 –Concepção de uma célula fotovoltaica 30
Figura 9 – Concentradores dos tipos calha parabólica (a), torre solar (b), disco parabólico (c) e linear Fresnel (d) 31
Figura 10 – Usina solar por ciclo termodinâmico 32
Figura 11 – Lagoa solar para geração de energia elétrica 33
Figura 12 - Chaminé solar voltada para geração de energia elétrica 35
Figura 13 – Coletor solar para aquecimento doméstico de água 36
Figura 14 – Fornos solares do tipo painel, caixa e parabólico 37
Figura 15 – Secador solar 38
Figura 16 – Destilador solar 39
Figura 17 – Patente registrada para Edward S. Morse 41
Figura 18 - Casa Trombe 42
Figura 19 - Parede Trombe clássica 42
Figura 20 - Parede Trombe modificada 43
Figura 21 – Órbita do planeta terra 45
Figura 22 – Irradiação extraterrestre e irradiação para massa atmosférica unitária 46
Figura 23 – Irradiação para massa atmosférica equivalente à 2 46
Figura 24 – Distribuição espectral da emissão de radiação para um corpo negro no vácuo 47
Figura 25 - Minimização da refletância por camadas anti-reflexivas 48
Figura 26 – Placas de circuito impresso com geração interna de calor 50
Figura 27 - Gradientes de velocidade e temperatura típicos de escoamentos naturais 50
Figura 28 – Variação da massa específica do ar atmosférico em função da temperatura 54

Figura 29 – Comportamento das camadas limites viscosa e térmica para baixos números de Prandtl....56
Figura 30 – Comportamento das camadas limites viscosa e térmica para altos números de Prandtl....56
Figura 31 – Diferença no número de Prandtl para escoamentos forçados....57
Figura 32 - Variação do regime ao longo da coordenada....58
Figura 33 - Correlação entre número de Nusselt e número de Grashof....59
Figura 34 – Abordagens de temperatura superficial constante (a) e fluxo de calor constante (b)....60
Figura 35 – Gradientes de velocidade e temperatura para diversas relações entre temperatura da superfície e temperatura do meio....62
Figura 36 – nomenclaturas para uma cavidade genérica sujeita à escoamento natural....64
Figura 37 – Chaminé solar estudada por Bouchair em 1994, planta (a) e vista lateral (b)....65
Figura 38 - Escoamento reverso....66
Figura 39 – Chaminé solar de telhado estudada em 1993....67
Figura 40 – Chaminé solar estudada em 2005....68
Figura 41 – Chaminé solar estudada em 2006....69
Figura 42 – Ambiente com parede Trombe estudado em 1998....70
Figura 43 - Gradiente de temperatura ao longo da altura da chaminé estudada em 1999....71
Figura 44 – Chaminé solar proposta em 2006....73
Figura 45 – Cenários estudados em 2009....74
Figura 46 – Chaminé solar estudada em 2017....75
Figura 47 – Conceitos estudados em 2017....76
Figura 48 – Configurações estudadas em 2006....77
Figura 49 – Domínios e configurações estudadas em 2010....78
Figura 50 – Chaminé solar com variações geométricas estudada em 2003....79
Figura 51 – Chaminé solar estudada pelo grupo em 2015....81
Figura 52 -Configuração para aquecimento do ambiente (a) ou ventilação (b)....82
Figura 53 - Aparato experimental utilizado em 2005....82
Figura 54 - Configuração para aquecimento do ambiente (a) ou ventilação (b) utilizando passagens duplas....84
Figura 55 – Combinação com outros sistemas naturais....85
Figura 56 – Comportamento da vazão mássica em função do número de Rayleigh....86
Figura 57 – Surgimento de escoamento reverso observado nas regiões demarcadas em 2014 87

Figura 58 – Variação da velocidade média em função do calor imposto para a condição de saída vertical ou saída com proteção de chuva 88
Figura 59 – Comparação entre chaminé solar e chaminé de alvenaria no ano de 2000 89
Figura 60 - Chaminé solar testada ao longo do dia em 2009 90
Figura 61 – Aparato experimental utilizado em 2015 91
Figura 62 - Distribuição dos trabalhos citados na sessão 2.4 92
Figura 63 – Chaminé proposta indicando a acentuação do gradiente de velocidade próximo à placa absorvedora 95
Figura 64 – Dimensões principais da chaminé solar proposta em milímetros 96
Figura 65 – Chaminé solar proposta e sua lateral com uma janela de PMMA 97
Figura 66 – Variação da abertura através da placa de obstrução 98
Figura 67 – Materiais da chaminé solar proposta 99
Figura 68 – Aquecedor construído direcionado para a chaminé solar 100
Figura 69 - Associação das resistências para a construção do aquecedor 100
Figura 70 – Padrão de enrolamento do conjunto de aquecimento, dimensões em milímetros 101
Figura 71 – Montagem do conjunto de aquecimento na chaminé solar 101
Figura 72 - Máquina de fumaça de 600W utilizada para a visualização do escoamento 102
Figura 73 – Laser e lente cilíndrica posicionados na chaminé solar proposta 103
Figura 74 – Chaminé proposta e seus auxiliares (CAD e modelo real) 104
Figura 75 -Diagrama de blocos desenvolvido no ambiente do LabView 105
Figura 76 – Transdutor de velocidade OMEGA FMA-904-I 106
Figura 77 – Reservatório utilizado na calibração do transdutor de velocidade 107
Figura 78 - Oblongo na lateral da chaminé para translação do transdutor de velocidade 107
Figura 79 - Pontos de aquisição dos gradientes, dimensões em milímetros 108
Figura 80 - Pontos utilizados para varredura dos gradientes do escoamento 109
Figura 81 – Conjunto de mesas coordenadas com seus controladores Arduino UNO 109
Figura 82 - Junção do Termopar desenvolvida sem adição de outros materiais 110
Figura 83 - Termopares na parte frontal e traseira da chaminé solar, dimensões em milímetros 111
Figura 84 - Distribuição dos termopares que compõem o arranjo de termopilha 111
Figura 85 - Curva de tendência para o transdutor de velocidade OMEGA 113
Figura 86 – Cenários propostos neste trabalho 115
Figura 87 – Resposta dos termopares tipo K até o regime permanente 116

Figura 88 – Perfil de temperatura na superfície absorvedora para chaminé com profundidade de 50 mm e abertura na obstrução de 50 mm (a), 40 mm (b), 30 mm (c), 20 mm (d), 10 mm (e) e 0 mm (f), bem como configuração convencional (g) 117
Figura 89 – Perfil de temperatura na superfície absorvedora para chaminé com profundidade de 150 mm e abertura na obstrução de 150 mm (a), 120 mm (b), 90 mm (c), 60 mm (d), 30 mm (e) e 0 mm (f), bem como configuração convencional (g) 119
Figura 90 - Perfil de temperatura no escoamento para chaminé com profundidade de 50 mm e abertura na obstrução de 50 mm (a), 40 mm (b), 30 mm (c), 20 mm (d), 10 mm (e) e 0 mm (f), bem como configuração convencional (g) 122
Figura 91 - Perfil de temperatura no escoamento para chaminé com profundidade de 150 mm e abertura na obstrução de 150 mm (a), 120 mm (b), 90 mm (c), 60 mm (d), 30 mm (e) e 0 mm (f), bem como configuração convencional (g) 123
Figura 92 - Distribuição de temperatura na entrada inferior para profundidade de 50 mm ... 125
Figura 93 - Distribuição de temperatura na entrada inferior para profundidade de 150 mm . 126
Figura 94 - Distribuição de temperatura na entrada superior para profundidade de 50 mm .. 127
Figura 95 - Distribuição de temperatura na entrada superior para profundidade de 150 mm 128
Figura 96 - Distribuição de temperatura na saída para profundidade de 50 mm 129
Figura 97 - Distribuição de temperatura na saída para profundidade de 150 mm 130
Figura 98 - Distribuição de temperatura na superfície do isolante para profundidade de 50 mm 131
Figura 99 - Distribuição de temperatura na superfície do isolante para profundidade de 150 mm 132
Figura 100 - Perfil de velocidade no escoamento para chaminé com profundidade de 50 mm e abertura na obstrução de 50 mm (a), 40 mm (b), 30 mm (c), 20 mm (d), 10 mm (e) e 0 mm (f), bem como configuração convencional (g) 134
Figura 101 - Perfil de velocidade no escoamento para chaminé com profundidade de 150 mm e abertura na obstrução de 150 mm (a), 120 mm (b), 90 mm (c), 60 mm (d), 30 mm (e) e 0 mm (f), bem como configuração convencional (g) 135
Figura 102 - Distribuição de áreas para cálculo de vazão volumétrica 136
Figura 103 - Vazão de saída devido à obstrução da cavidade para 50 mm de profundidade (autor) 137
Figura 104 - Vazão de saída devido à obstrução da cavidade para 150 mm de profundidade (autor) 138

Figura 105 - Visualização do escoamento da entrada superior e entrada inferior para chaminé com profundidade de 50 mm 139
Figura 106 - Visualização do escoamento da entrada superior e entrada inferior para chaminé com profundidade de 150 mm 140
Figura 107 - Comparação entre os perfis de temperatura na Sup. Abs. para as chaminés convencionais de 50 mm e 150 mm de profundidade 142
Figura 108 - Comparação entre as distribuições de temperatura do isolante do sistema de aquecimento para as chaminés convencionais de 50 mm e 150 mm de profundidade 143
Figura 109 - Comparação dos perfis de temperatura nos escoamentos do topo (a) e meio (b) para as chaminés convencionais de 50 mm e 150 mm de profundidade 144
Figura 110 - Comparação dos perfis de velocidade nos escoamentos do topo (a) e meio (b) para as chaminés convencionais de 50 mm e 150 mm de profundidade 146
Figura 111 - Vórtices no escoamento da configuração convencional com 150 mm de profundidade 147
Figura 112 - Comparação entre os perfis de temperatura na Sup. Abs. para todas as configurações com 50 mm de profundidade 149
Figura 113 - Comparação entre as temperaturas da entrada inferior para todas as configurações com 50 mm de profundidade 150
Figura 114 - Comparação entre as temperaturas da entrada superior para todas as configurações com 50 mm de profundidade 151
Figura 115 - Comparação entre as temperaturas da saída para todas as configurações com 50 mm de profundidade 151
Figura 116 - Comparação dos perfis de temperatura nos escoamentos do topo (a) e meio (b) para todas as configurações com 50 mm de profundidade 153
Figura 117 - Comparação dos perfis de velocidade nos escoamentos do topo (a) e meio (b) para todas as configurações com 50 mm de profundidade 155
Figura 118 - Estagnação do escoamento à montante da obstrução na configuração 50-20 ... 156
Figura 119 - Constrição e posterior expansão do escoamento na configuração 50-40 158
Figura 120 - Fuga parcial do ar proveniente da entrada inferior nas configurações 50-50 e 50-40 159
Figura 121 - Comparação entre os perfis de temperatura na Sup. Abs. para todas as configurações com 150 mm de profundidade 161
Figura 122 - Comparação entre as temperaturas da entrada inferior para todas as configurações com 150 mm de profundidade 162

Figura 123 - Comparação entre as temperaturas da entrada superior para todas as configurações com 150 mm de profundidade 163
Figura 124 - Vorticidade elevada nas configurações 150-120 e 150-90 164
Figura 125 - Comparação entre as temperaturas da saída para todas as configurações com 150 mm de profundidade 165
Figura 126 - Comparação dos perfis de temperatura nos escoamentos do topo (a) e meio (b) para todas as configurações com 150 mm de profundidade 166
Figura 127 - Estagnação do escoamento à montante da obstrução na configuração 150-60 . 167
Figura 128 - Comparação dos perfis de velocidade nos escoamentos do topo (a) e meio (b) para todas as configurações com 150 mm de profundidade 168

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do ar 53
Tabela 2 - Coeficientes para Eq. 28 e Eq. 29 62
Tabela 3 - Ordem cronológica e divisão dos grupos de pesquisa citados na seção 93
Tabela 4 - Variações geométricas realizadas por alguns dos grupos de pesquisa 94
Tabela 5 - Valores dos incrementos para a varredura na cavidade 109
Tabela 6 - Coeficientes e incertezas da curva de tendência do transdutor de velocidade 114
Tabela 7 - Temperaturas das entradas, saída e da resistência de aquecimento para as configurações com chaminé solar de profundidade 50 mm 120
Tabela 8 - Temperaturas das entradas, saída e da resistência de aquecimento para as configurações com chaminé solar de profundidade 150 mm 120
Tabela 9 - Vazão volumétrica e mássica para chaminé solar com 50 mm de profundidade .. 136
Tabela 10 - Vazão volumétrica e mássica para chaminé solar com 150 mm profundidade ... 137
Tabela 11 – Identificação das configurações com 50 mm de profundidade que promoveram remoção de ar da porção superior do ambiente 159
Tabela 12 - Vazão através da entrada superior (valores negativos representam um escoamento contrário) e porcentagem da vazão de saída em relação à configuração 50-Convencional ... 160
Tabela 13 - Identificação das configurações com 150 mm de profundidade que promoveram remoção de ar da porção superior do ambiente 169
Tabela 14 - Vazão através da entrada superior (valores negativos representam um escoamento contrário) e porcentagem da vazão de saída em relação à configuração 150-Convencional . 169

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abreviaturas

ACH	*Air Change per Hour*
AISI	*American Iron and Steel Institute*
AR	*Aspect Ratio*
ASHRAE	*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*
CAD	*Computer Aided Design*
CL	Camada Limite
DOF	*Depth Of Field*
FOV	*Field Of View*
ISO	*International Organization for Standardization*
LHS	*Latent Heat Storage*
MDF	*Medium Density Fiberboard*
PCM	*Phase Change Material*
PMMA	Polimetilmetacrilato
PMV	*Predicted Mean Vote*
PPD	*Predicted Percentage Dissatisfied*
Tamb	Temperatura do Ambiente
TEInf	Temperatura da Entrada Inferior
TESup	Temperatura da Entrada Superior
TpE	Temperatura Pontual do Escoamento
TRAq	Temperatura da Resistência de Aquecimento
TS	Temperatura da Saída (Termopilha)
TSA1	Temperatura na posição 1 da Superfície Absorvedora
TSA2	Temperatura na posição 2 da Superfície Absorvedora
TSA3	Temperatura na posição 3 da Superfície Absorvedora
TSA4	Temperatura na posição 4 da Superfície Absorvedora
TSA5	Temperatura na posição 5 da Superfície Absorvedora
TSA6	Temperatura na posição 6 da Superfície Absorvedora
VpE	Velocidade Pontual do Escoamento
WB	*White Balance*

Siglas de compostos e elementos químicos

N_2	Nitrogênio
O_2	Oxigênio
Ar	Argônio
CO_2	Dióxido de carbono
He	Hélio
Ne	Neônio
CH_4	Metano

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Minúsculas

0	Referente à superfície aquecida
∞	Referente à um ponto distante da superfície aquecida (assíntota)
c	Crítico
L	Local
T	Térmico
v	Viscoso

Letras Maiúsculas

cp	Calor específico à pressão constante
F	Força de empuxo
g	Aceleração da gravidade
Gr	Número adimensional de Grashof
h	Coeficiente de transmissão de calor por convecção
k	Condutividade térmica
L	Comprimento característico para o escoamento natural
n	Parâmetro do gás
Nu	Número adimensional de Nússelt
Pr	Número adimensional de Prandtl
q	Fluxo de calor
Ra	Número adimensional de Rayleigh
T	Temperatura
u	Velocidade relativa à coordenada x
v	Velocidade relativa à coordenada y
x	Coordenada vertical (referente à altura da cavidade)
y	Coordenada horizontal (referente à profundidade da cavidade)
α	Difusividade térmica
β	Coeficiente de expansão térmica volumétrica
λ	Comprimento de onda
ν	Viscosidade cinemática
ρ	Massa específica do ar
μ	Viscosidade dinâmica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 19

1.1 OBJETIVOS 21

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO 21

2 REVISÃO DA LITERATURA 22

2.1 CONFORTO TÉRMICO 22

2.1.1 Definição de conforto térmico 22

2.1.2 Aplicação do conforto térmico no corpo humano 24

2.1.3 Conforto térmico em ambientes 25

2.2 ENERGIA ALTERNATIVA 26

2.2.1 Características da energia solar 28

2.2.2 Aplicações da energia solar 30

2.2.3 Ventilação com energia solar 40

2.3 CONCEITOS ENVOLVIDOS 44

2.3.1 Radiação solar 44

2.3.2 Escoamento natural 49

2.4 ESTUDOS DA ÁREA 63

2.4.1 Principais grupos de pesquisa 64

2.4.2 Outros trabalhos de grande relevância 88

3 MATERIAIS E MÉTODOS 95

3.1 CHAMINÉ SOLAR PROPOSTA 96

3.2 CONSTRUÇÃO DO AQUECEDOR 99

3.3 CONJUNTO DE VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTO 102

3.4 INSTRUMENTAÇÃO DA CHAMINÉ SOLAR PROPOSTA 105

3.4.1 Medição das velocidades 106

3.4.2 Medição das temperaturas 110

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 112

4.1 CALIBRAÇÃO DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO 113

4.1.1 Calibração do transdutor de velocidade 113

4.1.2 Calibração dos termopares 114

4.2 EXPERIMENTOS 115

4.2.1 Perfis de temperatura 116

4.2.2 Perfis de velocidade 133

4.2.3 Vazão volumétrica e mássica 136

4.2.4 Visualização do escoamento 138

4.3 DISCUSSÃO 141

4.3.1 Comparação entre as chaminés convencionais 141

4.3.2 Chaminé com obstrução e profundidade de 50 mm 148

4.3.3 Chaminé com obstrução e profundidade de 150 mm 160

4.3.4 Comparação com os trabalhos publicados 170

5 CONCLUSÃO 172

5.1 TRABALHOS FUTUROS 173

REFERÊNCIAS 175

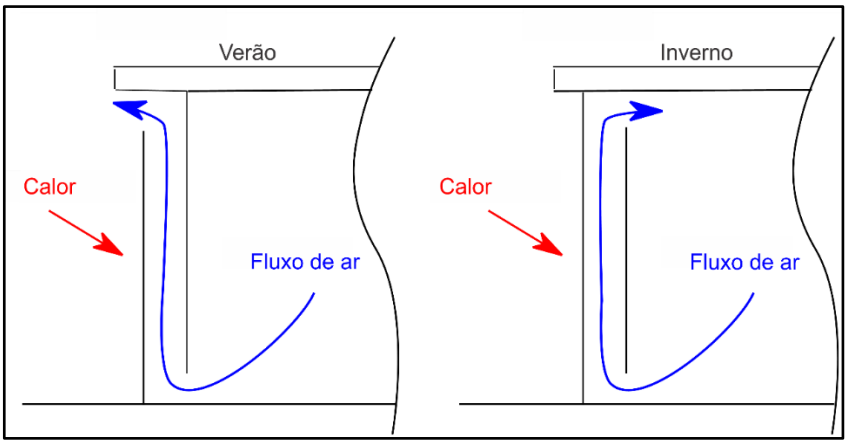
1 INTRODUÇÃO

Tendo em vista o cenário atual de consumo energético global, este sendo proveniente principalmente de sistemas de refrigeração, ventilação e condicionamento de ambientes, que a cada ano sofrem aumento de demanda devido à fatores culturais, econômicos e climatológicos, somados ainda ao fato de que existe uma procura constante por conforto térmico, saúde e bem-estar, levam diversos pesquisadores à considerar o desenvolvimento de tecnologias alternativas e sustentáveis voltadas à ventilação como necessidade atual. Tais tecnologias devem ser implementadas rapidamente em pequena, média ou larga escala, enfrentando, portanto, dificuldades como viabilidade econômica, apelo social e conscientização para seu sucesso.

A contribuição do autor ao desenvolvimento destas tecnologias é focada em dispositivos solares, uma vez que estes geralmente possuem grande potencial energético aliado com simplicidade e baixo custo, características que são exploradas por diversos autores na literatura. Neste aspecto, a utilização de sistemas solares passivos como uma chaminé solar destinada à ventilação de ambientes resultaria em uma possível solução ao problema, principalmente para regiões com alta incidência de radiação solar.

Seu princípio de funcionamento se baseia na absorção de energia solar e aquecimento de uma massa de ar, a qual escoa em uma cavidade devido à um empuxo gerado pela estratificação do meio. Tal característica é aproveitada para se promover a ventilação por exaustão ou aquecimento do ambiente interno conforme a Fig. 1.

Figura 1 – Funcionamento da chaminé solar no verão ou inverno



Fonte: Autor

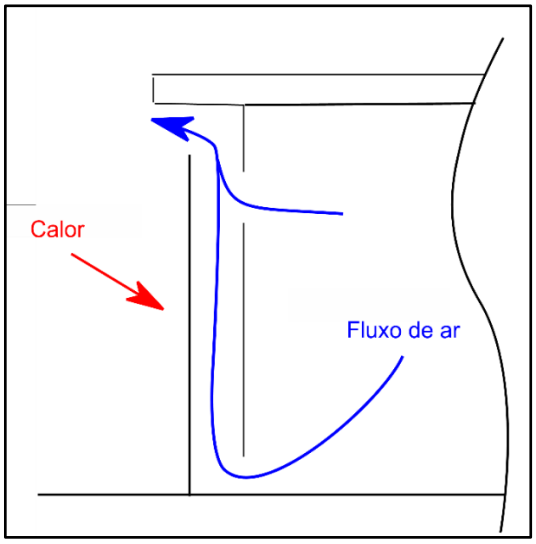
Sua construção permite ainda a instalação em paredes, telhados ou mesmo ao longo dos andares de um edifício, sendo capaz de em algumas situações promover uma vazão maior se

comparada com uma simples abertura de porta ou janela (KHEDARI; BOONSRI; HIRUNLABH, 2000).

A observação destes aspectos levou o autor deste trabalho, juntamente com seu grupo de pesquisa, ao desenvolvimento de soluções neste contexto, como a análise e implementação de chaminés solares trapezoidais em laterais de containers metálicos, cujo os quais, após sua vida útil em trabalhos de armazenamento de carga, são comumente reutilizados como alternativa à alvenaria em canteiros de obras, abrigos temporários, habitações de baixo custo, lojas e estabelecimentos comerciais temáticos, dentre outras aplicações. A evolução do estudo foi publicada em congressos voltados a áreas de análise energética como ECOS 2014 (MALTA; GOUVEIA; ALBUQUERQUE, 2014), ENCIT 2016 (VILLAS-BOAS; MALTA; GOUVEIA; ALBUQUERQUE, 2016) (MALTA; ALBUQUERQUE; JÚNIOR; YANAGIHARA, 2016) e congressos de assuntos gerais de engenharia mecânica como COBEM 2013 (MALTA; GOUVEIA; ALBUQUERQUE, 2013), COBEM 2015 (VILLAS-BOAS; MALTA; GOUVEIA; ALBUQUERQUE, 2015) e COBEM 2017 (VILLAS-BOAS; MALTA; ALBUQUERQUE, 2017).

No presente trabalho, o autor visa a análise da viabilidade de remoção de ar da parte superior e inferior do ambiente interno através da inserção de um estreitamento na cavidade da chaminé solar conforme Fig. 2, bem como uma análise aprofundada da influência geométrica em seu desempenho global. Assim, a chaminé proposta seria capaz de promover não somente uma ventilação similar à de uma chaminé solar convencional, mas simultaneamente remover a carga térmica de maior intensidade localizada na parte superior do ambiente.

Figura 2 - Chaminé proposta neste trabalho



Fonte: Autor

1.1 OBJETIVOS

O trabalho proposto possui como objetivo o estudo experimental de uma chaminé solar vertical de dupla entrada para realização de uma análise minuciosa acerca da viabilidade de se realizar a ventilação simultânea da parte inferior e superior de um ambiente interno. Para tal, um dispositivo foi construído seguindo recomendações básicas da literatura, o qual recebeu uma instrumentação com termopares e transdutor de velocidade.

O trabalho não somente é capaz de indicar se este tipo de ventilação é viável, mas também propõe soluções baseadas nos resultados experimentais a fim de se maximizar a vazão escoada, logo, diversas configurações foram testadas, comparando-as entre si e entre uma configuração de referência, no caso, uma chaminé solar convencional (apenas uma entrada e uma saída).

Uma discussão dos resultados mostra ainda se os fenômenos e respostas paramétricas encontradas nos experimentos condizem com as observações de diversos autores na literatura.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho aqui exposto é dividido em 4 partes:

Revisão da literatura, discorrendo sobre o conforto térmico, seu consumo energético atrelado, energias alternativas e sustentáveis, energia solar, conceitos fundamentais envolvidos em dispositivos solares e por fim os estudos específicos da área.

Materiais e métodos, descrevendo a construção da chaminé solar proposta e seus dispositivos auxiliares, bem como as abordagens e métodos utilizados para a realização dos experimentos.

Resultados e discussões, onde o autor em uma primeira parte exibe as informações coletadas e posteriormente discorre sobre elas a fim de se identificar comportamentos e fenômenos observados ou não na literatura estudada.

Conclusão, reunindo os principais pontos encontrados no trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão apresentados os conceitos fundamentais que embasaram o desenvolvimento deste trabalho, bem como os trabalhos já realizados acerca da chaminé solar ou mesmo de dispositivos com funcionamento similar.

2.1 CONFORTO TÉRMICO

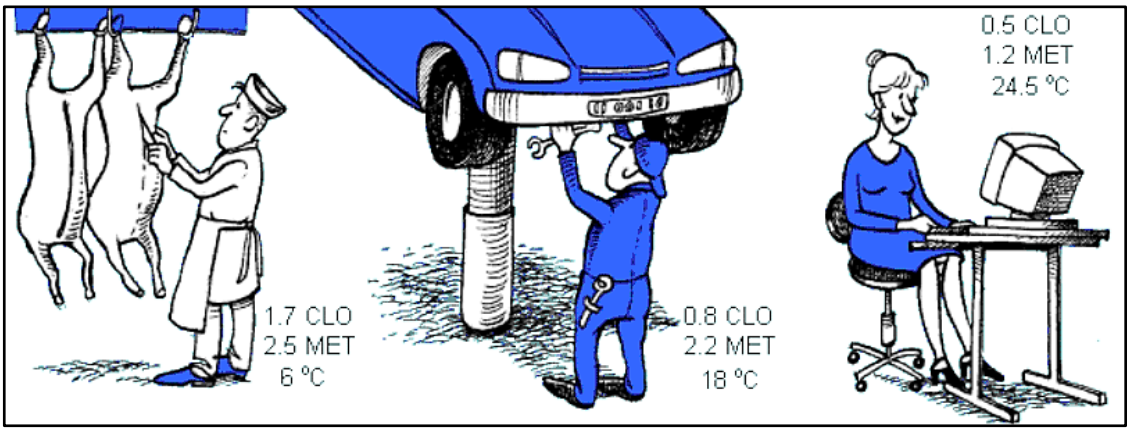
A dinâmica térmica do corpo humano conta com uma vasta quantidade de variáveis e fenômenos que agem simultaneamente, influenciando uns aos outros.

2.1.1 Definição de conforto térmico

Desde sua composição inicial, o corpo humano é sujeito a um processo de aclimatação, ou seja, adaptação ao clima, no qual se adquire um equilíbrio térmico relacionado ao local ao qual está submetido. No decorrer da vida o corpo é exposto a variações de temperatura, umidade e pressão, bem como durante atividade física ou metabolismo, que levam o corpo a regular-se termicamente, tendendo novamente ao equilíbrio, princípio que torna o ser humano um ser homeotérmico. Entretanto, em certos casos o corpo recebe uma sensação diferente da aclimatação realizada e, portanto, recebe esta sensação com insatisfação, gerando mal-estar térmico. Em casos ainda mais severos, aspectos fisiológicos e psicológicos podem ser afetados, e consequentemente, a saúde.

O conforto térmico pode ser definido como a sensação de bem-estar e satisfação térmica do ser humano em certo ambiente, utilizando certas vestimentas e executando uma determinada atividade conforme Fig. 3. Para tal, o corpo deve sofrer a devida troca térmica com o meio, sem que haja grandes discrepâncias em relação a aclimatação ou mesmo variações elevadas da temperatura interna.

Figura 3 – Associação das vestimentas (índice CLO), do metabolismo (índice MET), temperatura do ambiente e atividade desenvolvida no conforto térmico)

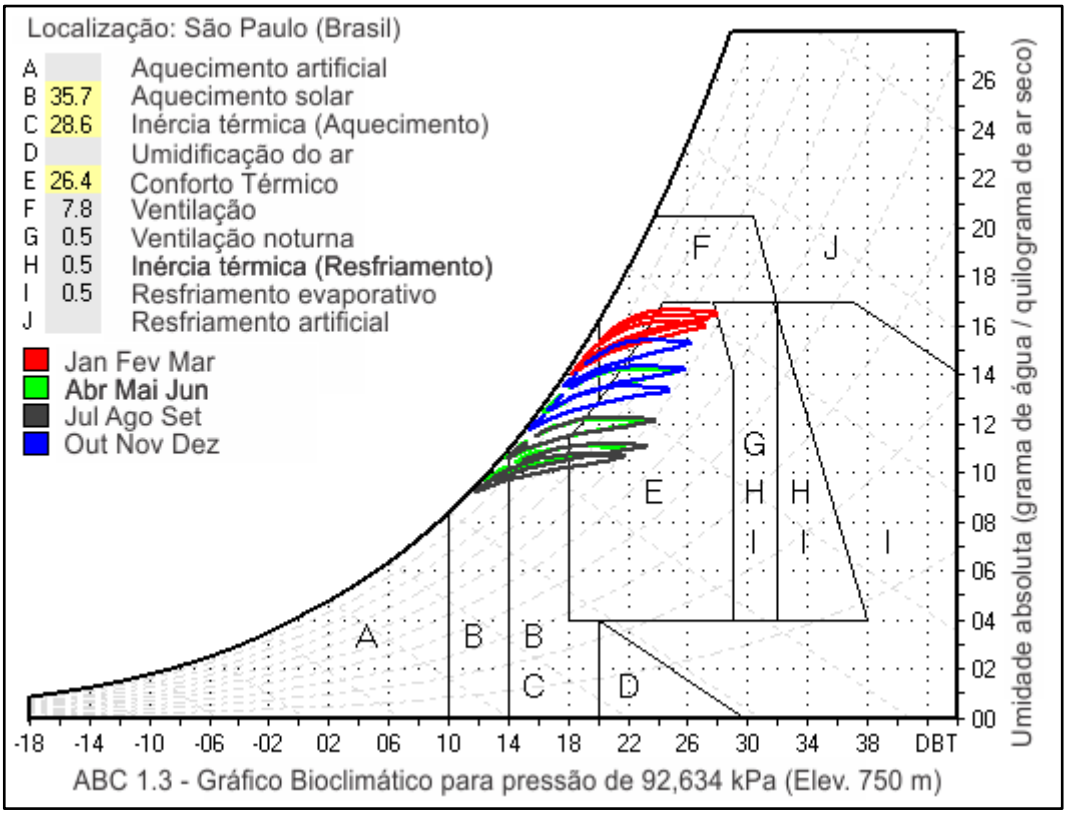


Fonte: Adaptado de Innova Airtech Instruments, 1997

A identificação e quantificação da sensação de desconforto térmico é algo relativo e difícil de ser mensurado. Escalas de indicação para a distinção térmica como a ISO7730:2005 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2005) e ISO9886:2004 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2004) são largamente utilizadas (VELT; DAANEN, 2017), bem como a avaliação do conforto térmico dada pela norma ASHRAE 55:2010 (AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, 2010), a qual leva em consideração o voto médio estimado (*predicted mean vote "PMV"*) desenvolvido por (FANGER, 1973) e a porcentagem de pessoas insatisfeitas (*predicted percentage of dissatisfied "PPD"*). Tais ferramentas auxiliam no desenvolvimento de mecanismos térmicos para promover o controle termo-higrométrico e gerar assim o conforto térmico necessário para o ser humano.

Quando se trata de gerar conforto térmico, uma estratégia bioclimática é necessária, e para tal, utiliza-se da carta bioclimática de Givoni conforme Fig. 4, a qual foi desenvolvida utilizando-se como base o diagrama psicrométrico. Desta forma, dependendo da zona bioclimática ao qual o ambiente está inserido, tem-se uma estratégia recomendada.

Figura 4 - Carta Bioclimática de Givoni para São Paulo

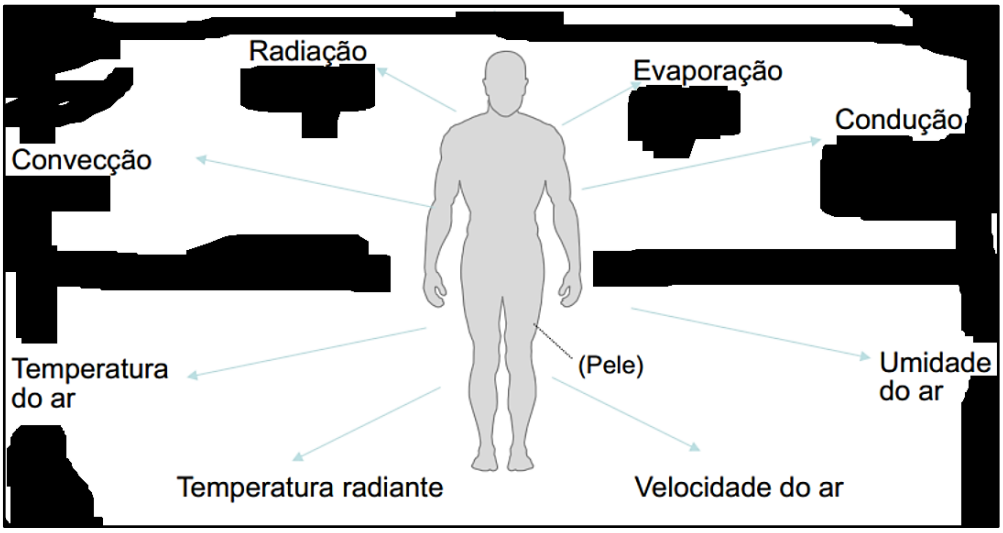


Fonte: Adaptado do software ABC – Architectural Bioclimatic Classification

2.1.2 Aplicação do conforto térmico no corpo humano

No âmbito externo do corpo, tem-se trocas de calor por convecção, radiação, condução (em pequena grandeza) e por fim, a evaporação (vide Fig. 5). O aumento da troca térmica entre o corpo e o ambiente pode promover uma perda de calor, ou mesmo um ganho, dependendo das condições impostas, sendo assim, a troca térmica é desejável desde que promova o conforto térmico. A carga térmica e sua origem possuem extrema importância neste cenário, podendo influenciar diretamente no conforto térmico, como por exemplo um corpo exposto à uma fonte de calor, onde o aumento de troca térmica promove o aquecimento do corpo, o que em certas situações pode trazer conforto térmico e em outras o oposto.

Figura 5 – Processos de transmissão de calor entre o ambiente e o ser humano e suas variáveis



Fonte: Autor

Tais fenômenos térmicos sofrem variação de intensidade devido a sensibilidade à velocidade relativa do meio que envolve o corpo, temperatura do meio, temperatura superficial do corpo, bem como a temperatura de radiação e umidade presente em ambas as partes, o que torna o conforto térmico algo extremamente complexo e de difícil controle. Entretanto, seu estudo, mesmo que baseado em modelos simplificados, se faz necessário, uma vez que permite o conhecimento aprofundado de causa e efeito, bem como o desenvolvimento de equipamentos capazes de lidar com estes mecanismos, seja de forma simplória ou utilizando tecnologia avançada.

2.1.3 Conforto térmico em ambientes

As necessidades atreladas ao conforto térmico dependem fortemente dos aspectos climatológicos, sócio-econômico e culturais, sendo normalmente distintos para cada país e região. A arquitetura vernacular é a representação ideal de desenvolvimento de habitações com o exclusivo intuito de sanar as necessidades da sociedade, sem nenhum objetivo estético atrelado. Baseada geralmente em matéria prima de baixa energia incorporada, este tipo de arquitetura além de sustentável é eficiente, uma vez que utiliza técnicas bioclimáticas passivas que garantem conforto térmico aos habitantes.

Os conceitos e técnicas da arquitetura vernacular geralmente são passados de geração para geração. Entretanto, com o avanço da arquitetura moderna outros instrumentos de controle termo-higrométrico passaram a ser empregados, muitos deles artificiais, com alto consumo

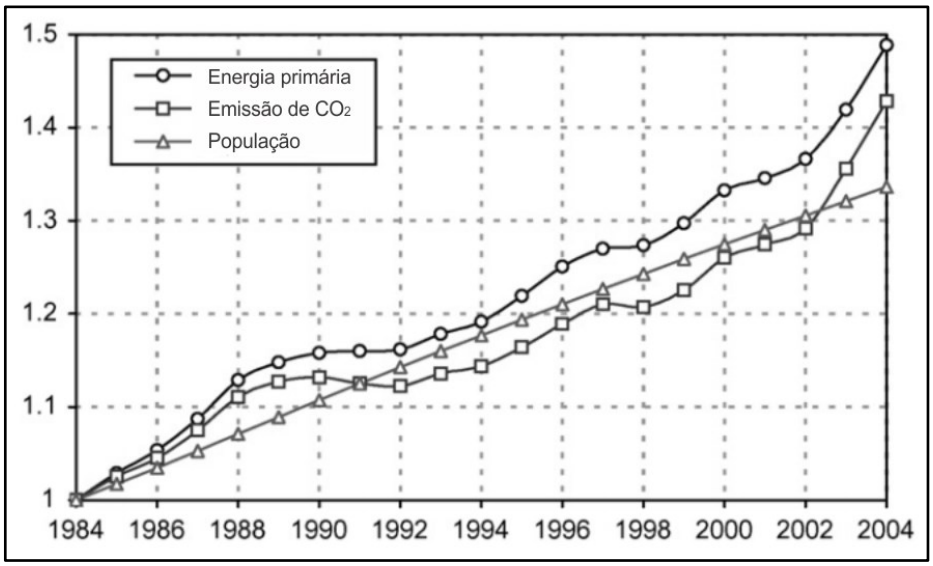
energético e construção baseada em materiais não sustentáveis. A utilização de sistemas de ventilação, aquecimento e condicionamento de ar modernos são exemplos claros disto, em edificações não residenciais o consumo energético por parte destes equipamentos chega a representar até mesmo 50% do consumo energético total (PÉREZ-LOMBARD, 2008).

Estudos recentes (CHANDEL; SHARMA; MARWAH, 2016) mostram diversas estratégias bioclimáticas utilizadas na arquitetura vernacular como por exemplo a orientação e formato do edifício, técnicas de sombreamento, ventilação e iluminação natural, dentre outros, que poderiam ser implementados na arquitetura moderna, trazendo inúmeros benefícios em termos de conforto ambiental e redução de consumo energético. O autor levanta ainda a questão de materiais modernos com energia incorporada fazendo uma comparação extensa com as vantagens dos materiais tradicionais em questão de isolamento térmico, custo e emissão de poluentes.

2.2 ENERGIA ALTERNATIVA

A procura por novas fontes de energia tem-se intensificado ao longo dos anos, uma vez que tecnologias largamente difundidas como uso de combustíveis fósseis se encontram escassas e custosas, além de possuírem grande impacto ambiental (THIRUGNANASAMBANDAM; INIYAN; GOIC, 2010). Como agravante, tem-se a expansão populacional mundial e o aumento do consumo energético per capita, tornando o fornecimento energético incapaz de suprir o consumo em escala. Pérez-Lombard (2008) expõe claramente o comportamento ascendente do consumo energético mundial de 1984 até 2004, período no qual o aumento da população mundial em 1/3 resultou em uma intensificação do consumo de energia primária da ordem de 49% como ilustrado na Fig. 6. Em seus estudos, os autores correlacionam diretamente o aumento do consumo energético global com o aumento populacional, aumento do período em que as pessoas permanecem dentro das edificações, e principalmente a busca por melhores níveis de conforto ao se utilizar sistemas de aquecimento, ventilação e condicionamento de ar.

Figura 6 – Aumento do consumo de energia primária, emissão de CO_2 e aumento populacional global ao longo do período de 1984 e 2004



Fonte: Adaptado de Pérez-Lombard, 2008

O desenvolvimento de uma fonte ou dispositivo baseado em energia alternativa por si só não soluciona o cenário energético atual, a nova tecnologia também deve agredir o meio ambiente em menor intensidade, logo, fontes de energia renováveis ou ainda sustentáveis se fazem urgentemente necessárias. Entretanto, não basta apenas haver a solução do problema para saná-lo completamente, é preciso que haja engajamento social, com conscientização da sociedade e ainda apoio político com elaboração de leis e incentivo ao desenvolvimento destas novas tecnologias.

Um exemplo claro desta preocupação e engajamento baseia-se nos países integrantes da união europeia e seu escopo de atuação elaborado em 1990. Denominado “20-20-20”, os países acordaram em reduzir a emissão de gases de efeito estufa em 20%, aumentar a porcentagem de geração de energia renovável para 20% e otimizar a eficiência energética em 20% até 2020 (LI; LIU; SHUKLA, 2016).

A aplicação de uma energia alternativa renovável ou sustentável necessita de uma análise aprofundada dos aspectos geográficos, que podem favorecer ou simplesmente inviabilizar sua implementação. Por este motivo, diversas alternativas energéticas têm sido exploradas, como por exemplo a energia solar, energia eólica, energia maremotriz, energia geotérmica e energia hidráulica.

Com este crescente interesse e desenvolvimento de novas alternativas energéticas, surge também a procura por aumento de eficiência e redução de custo voltado a viabilidade econômica, que por fim torna a tecnologia largamente difundida e preferível.

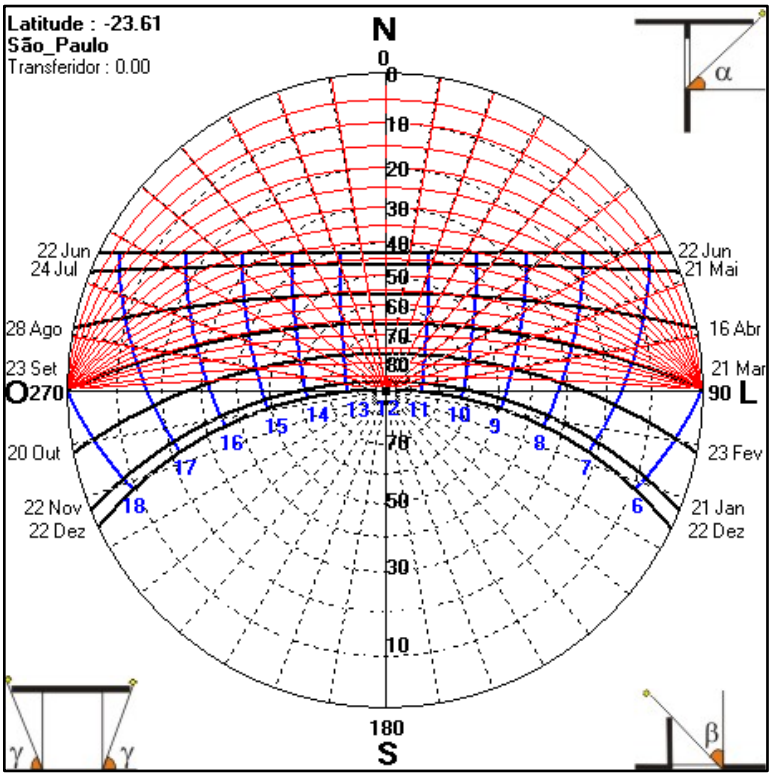
2.2.1 Características da energia solar

O sol emite energia à taxa de 3,8 x 10^{23} kW, dos quais cerca de 1,8 x 10^{14} kW é interceptado pelo planeta terra após percorrer 150 milhões de quilômetros. Desta, estima-se que 60% atinge de fato a superfície terrestre, enquanto 40% é refletida para o espaço ou mesmo absorvida pela atmosfera (WORLD ENERGY COUNCIL, 2013). Ou seja, anualmente, o planeta terra é capaz de receber a quantidade de 3,4 x 10^{6} EJ, o equivalente a mais de 7550 vezes o consumo energético primário mundial de 450 EJ. Tal contexto ilustra claramente uma característica básica da energia solar, sua extrema abundância, possuindo a maior disponibilidade dentre todas as fontes energéticas renováveis conhecidas atualmente (THIRUGNANASAMBANDAM; INIYAN; GOIC, 2010)(DAN; BARSHILIA; CHATTOPADHYAY; BASU, 2017). Isto se deve ao fato de que a energia solar está disponível de forma direta, por radiação eletromagnética, ou mesmo indireta através de energia hidráulica, eólica, maremotriz, biomassa entre outras.

Sua recepção se dá de forma não uniforme devido ao movimento orbital elíptico do planeta terra em torno do sol e de sua rotação, sendo assim, a intensidade de radiação recebida na superfície terrestre varia ao longo do dia, bem como ao longo da latitude terrestre e do período do ano em questão, ao passo que nas regiões polares e períodos de solstício ocorre grande variação da duração solar diária, já para as regiões próximas da linha do equador e períodos de equinócio a duração solar diária é equivalente a duração do período noturno (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2002).

A partir disto, fica claro que, a radiação solar varia de acordo com diversos fatores, e sua posição em referência à um corpo em certa latitude e época do ano segue a mesma dinâmica, gerando assim o diagrama azimute de irradiação de cada região como por exemplo o diagrama de São Paulo ilustrado na Fig. 7.

Figura 7 – Diagrama azimute para São Paulo



Fonte: Adaptado do software SOL-AR

O diagrama auxilia de certa forma o desenvolvimento de novas tecnologias solares, pois proporciona uma diretriz ao desenvolvimento de geometrias e estudos de posicionamento ótimo para estes dispositivos que de certa forma necessitam absorver e usufruir esta energia com grande eficácia. De maneira simplória, países do hemisfério norte podem otimizar a absorção energética de seus equipamentos solares através do direcionamento para o sul, enquanto que, países do hemisfério sul, como o Brasil, geralmente se aproveitam melhor da energia solar ao direcionar os equipamentos para o norte.

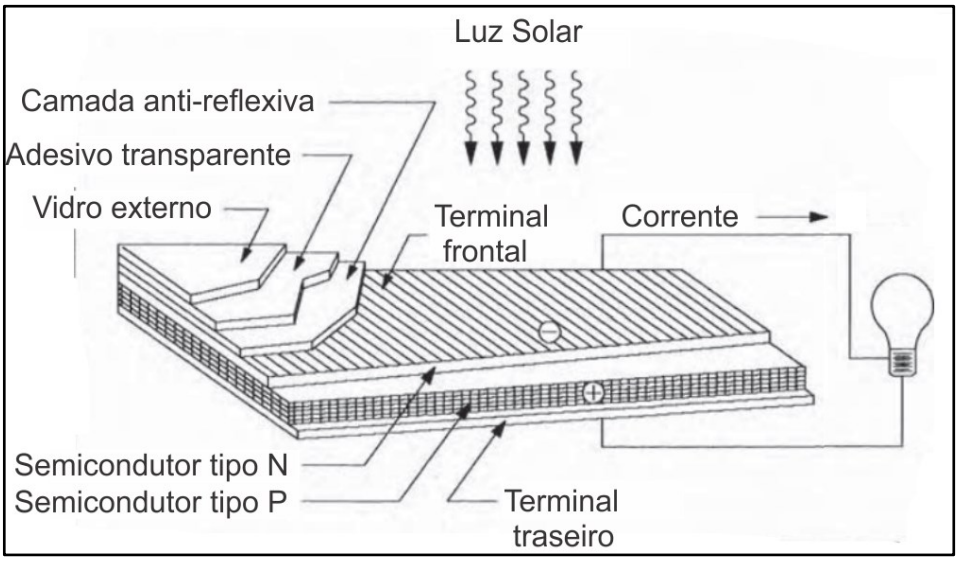
Com o avanço nas pesquisas e desenvolvimento de novos dispositivos, surge também a necessidade de controle voltado à natureza intermitente da energia solar. Na natureza, a energia solar é armazenada através de processos de fotossíntese, ou mesmo sendo incorporada em alimentos e biomassa (WORLD ENERGY COUNCIL, 2013), entretanto, armazená-la artificialmente torna-se uma tarefa complexa, porém necessária. Autores como (NKHONJERA; BELLO-OCHENDE; JOHN; KING'ONDU, 2017) estudam este tipo de armazenamento de energia térmica voltada à aplicação com energia solar a fim de se garantir o fornecimento de energia mesmo em momentos sem a presença do sol.

2.2.2 Aplicações da energia solar

A energia solar pode ser aproveitada através de técnicas solares passivas ou ativas, sendo que na técnica passiva, a energia é utilizada termicamente para o seu devido fim, sem sofrer conversões, já na técnica ativa, a energia solar é absorvida e convertida para uma forma energética mais conveniente, seja com o uso de equipamentos elétricos ou mesmo mecânicos.

Um exemplo claro da técnica ativa é a utilização de painéis fotovoltaicos que absorvem a energia solar e a transformam em energia elétrica diante de um certo rendimento (DAN; BARSHILIA; CHATTOPADHYAY; BASU, 2017). Os painéis fotovoltaicos têm ganhado grande interesse devido sua versatilidade e pequeno volume ocupado, seu funcionamento básico consiste na excitação de junções de silício dopados positivamente e negativamente (P-N) conforme Fig. 8, os quais são capazes de induzir corrente elétrica diante da incidência de fótons. Entretanto, muito ainda deve ser aprimorado a fim de se elevar sua capacidade e eficiência (WINTER; SIZMANN; VANT-HULL, 1991). O constante desenvolvimento desta tecnologia tem aumentado significativamente sua viabilidade econômica, levando-a a ser implementada em grande, média e pequenas aplicações, desde dispositivos eletrônicos portáteis até mesmo grandes usinas solares para a alimentação da rede elétrica regional.

Figura 8 –Concepção de uma célula fotovoltaica

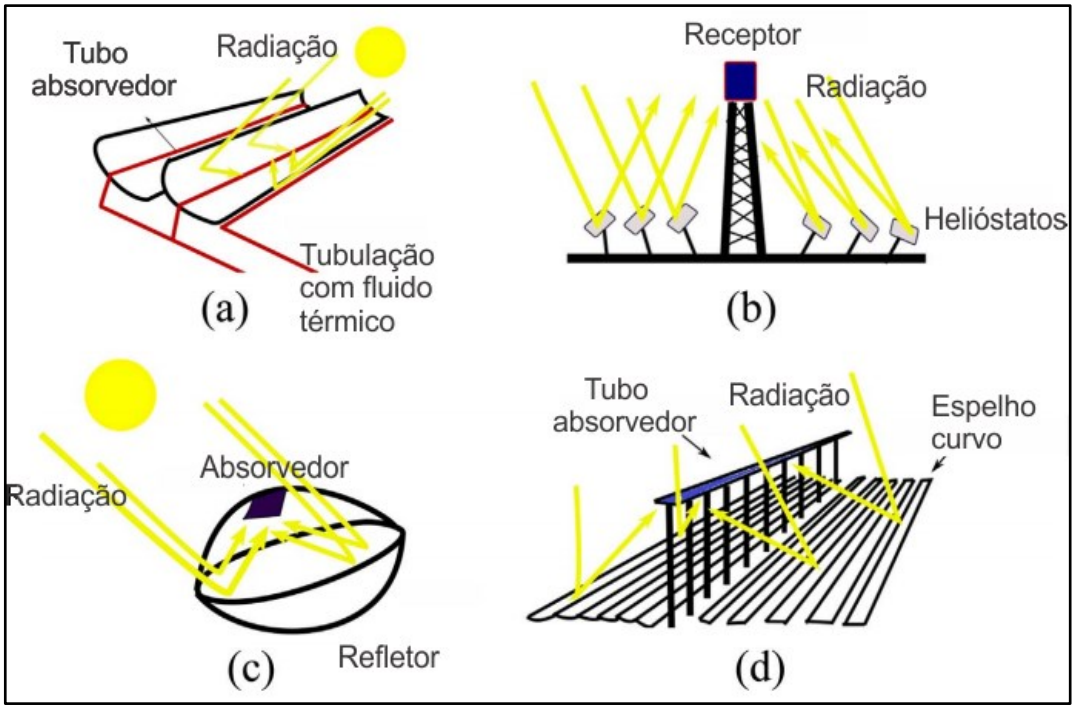


Fonte: Adaptado de Patel, 2006

A energia térmica proveniente do sol pode ser absorvida ou transferida através de coletores solares, os quais variam de acordo com a aplicação final. Os coletores planos, não

concentradores, são geralmente utilizados em processos que não demandam temperaturas superiores a 100°C, como por exemplo o aquecimento de água para uso doméstico, ventilação e aquecimento de ambientes ou mesmo processos de aquecimento industriais. Para processos industriais que demandam uma temperatura mais elevada ou mesmo para geração de energia elétrica, utilizam-se coletores concentradores (vide Fig. 9) do tipo calha parabólica, linear Fresnel ou disco parabólico, capazes de fornecer temperaturas de até 500°C através da convergência dos raios solares. Já em aplicações que exigem altas temperaturas como grandes usinas solares ou processos de fornalha industrial, emprega-se geralmente o conceito de receptor central como no caso da torre solar, atingindo em alguns casos, temperaturas superiores a 1000°C (WORLD ENERGY COUNCIL, 2013).

Figura 9 – Concentradores dos tipos calha parabólica (a), torre solar (b), disco parabólico (c) e linear Fresnel (d)

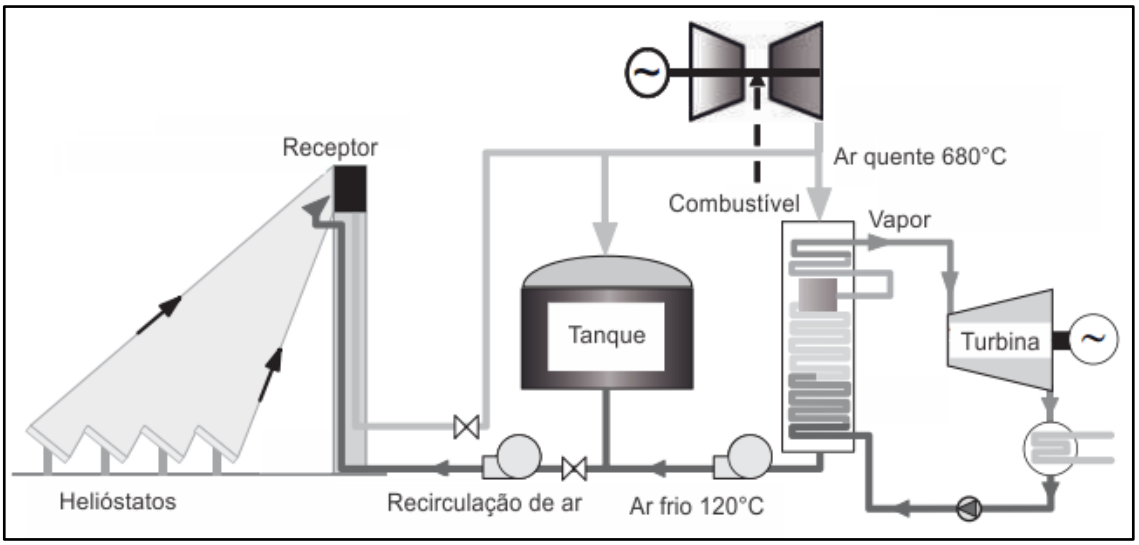


Fonte: Adaptado de Dan, Barshilia, Chattopadhyay e Basu, 2017

A geração de energia elétrica através da energia solar não se resume apenas ao painel fotovoltaico, a utilização de outros dispositivos torna possível o cumprimento do mesmo objetivo. Certas usinas solares utilizam-se de concentradores solares reflexivos, como no arranjo de receptor central conforme ilustrado na Fig. 10, com o intuito de transferir energia à um fluido, o qual é parte integrante de um ciclo termodinâmico, assim, movimentando posteriormente uma turbina acoplada a um gerador de corrente elétrica.

Tal conceito têm sido implementado com êxito, apresentando uma melhor eficiência e maior viabilidade econômica se comparado com a utilização de painéis fotovoltaicos, que geralmente são extremamente custosos e necessitam de inversores para corrente alternada (PATEL, 2006). Além disso, a utilização de um sistema térmico traz a vantagem da utilização de dispositivos de armazenamento de energia térmica, que promovem uma menor oscilação na geração de energia elétrica.

Figura 10 – Usina solar por ciclo termodinâmico



Fonte: Adaptado de Vogel e Kalb, 2010

O acionamento do ciclo termodinâmico pode ser realizado de diversas maneiras, como por exemplo com a utilização de uma lagoa solar. Dentre as diversas variações existentes de seu funcionamento tem-se o conceito da lagoa solar com gradiente salino, neste caso, desenvolve-se uma lagoa artificial de baixa profundidade a qual geralmente possui fundo com coloração preta, desempenhando um papel de superfície absorvedora. A energia térmica proveniente do sol é absorvida e então transferida ao fluido da lagoa, assim promovendo um aumento de temperatura do fluido, entretanto, este aumento de temperatura acarreta em uma redução da massa específica do fluido que, portanto, inicia uma convecção ascendente indesejável, uma vez que esta dissiparia a energia absorvida (HULL, 1979). Com este intuito, a lagoa solar utiliza-se de camadas que se distinguem devido a concentração salina dissolvida no fluido, formando um gradiente salino ao longo da profundidade da lagoa que se constitui de concentrações mais elevadas no fundo da lagoa e praticamente desprezíveis no topo como ilustrado na Fig. 11.

O conceito visa armazenar a energia absorvida na parte inferior da lagoa, a qual ao elevar

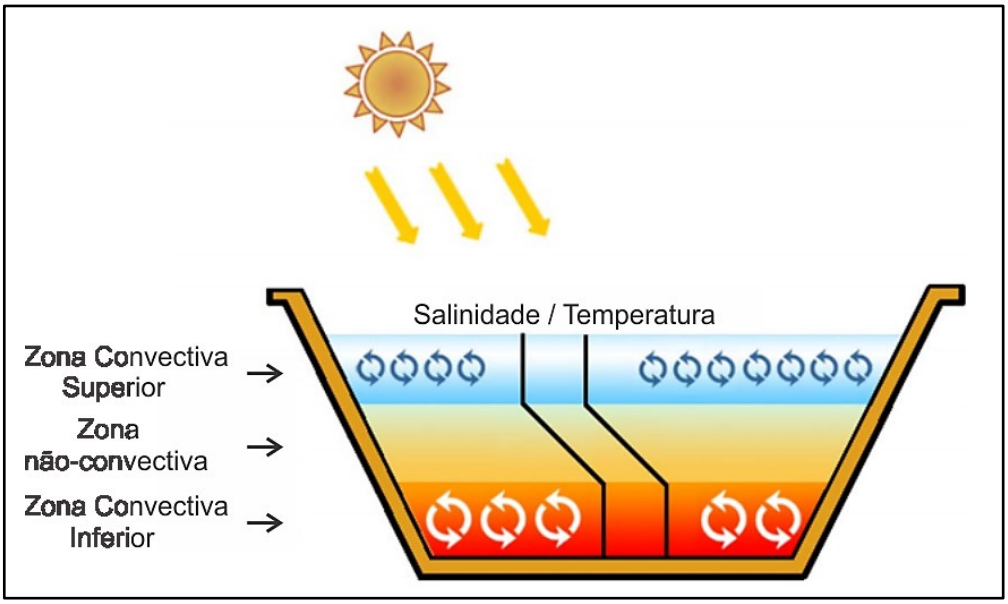
a temperatura do fluido, permite que haja um aumento de solubilidade, garantindo que as camadas de fluido do fundo mantenham-se sempre com massa específica superior em relação as camadas de fluido do topo, estabilizando e impedindo a convecção ascendente.

A camada intermediária possui papel extremamente importante, pois a solução salina aquosa possui condutividade térmica baixa, e pode ainda ser reduzida de acordo com o aumento de solubilidade, agindo como uma camada isolante isenta de fluxos convectivos (EL-SEBAII; RAMADAN; ABOUL-ENEIN; KHALLAF, 2011).

Em sua utilização para geração de energia elétrica, a energia térmica contida nas camadas de fluido presentes no fundo da lagoa é então transferida à um ciclo termodinâmico com auxílio de um trocador de calor, e assim, a solução aquosa que forneceu este calor, retorna à lagoa em suas camadas do topo. Por diversos motivos, Abdulsalam, Idris, Mohamed e Ahsan (2014) descrevem a lagoa solar como o método mais ecológico e de menor impacto ambiental voltado para geração de energia elétrica, dessalinização, aquecimento de água doméstica e ventilação ou aquecimento de ambientes.

A lagoa solar com gradiente salino apresenta também aspectos de armazenamento de energia térmica, a qual propicia um fornecimento energético mesmo em horários com pouca ou nenhuma absorção de energia solar.

Figura 11 – Lagoa solar para geração de energia elétrica



Fonte: Adaptado de Khalilian, 2017

Usinas baseadas em chaminés solares são outro exemplo de conversão da energia solar em energia elétrica, o conceito foi inicialmente proposto pelo professor Dr. Jorg Schlaich em

1968 na Universidade de Stuttgart, situada na Alemanha, e leva em consideração a indução de um empuxo térmico devido ao aquecimento do ar pela energia térmica proveniente da energia solar. Neste conceito, o dispositivo possui três partes principais, sendo a chaminé solar, o coletor solar e finalmente a turbina responsável pela conversão energética.

A indução de energia cinética é realizada pelo coletor solar, o qual utiliza o princípio de efeito estufa, transferindo a energia térmica proveniente do sol para a massa de ar que se situa abaixo dele. Devido a variação da massa específica do ar, surge um escoamento contínuo partindo do perímetro externo do coletor solar para o centro, onde se localiza a turbina e a chaminé conforme Fig. 12 (KOONSRISUK; CHITSOMBOON, 2007)(KOONSRISUK; LORENTE; BEJAN, 2010). A energia cinética é então convertida na turbina.

O potencial de pressão gerado a partir do fenômeno é utilizado para vencer as perdas por atrito e arrasto nos três componentes, bem como prover o diferencial de pressão na turbina (BILGEN; RHEAULT, 2005).

Dr. Schlaich chegou a desenvolver em parceria com o departamento de pesquisa alemão e auxílio de uma companhia de eletricidade espanhola uma usina em Manzanares, Espanha, a qual teve suas obras iniciadas em 1981 e viria assim servir como protótipo em seus estudos. No caso em questão, a chaminé solar possuía 194,6 m de altura, 10 m de diâmetro, coletor solar com 122 m de raio e aproximadamente 11000 m² de área (BERNARDES; VOB; WEINREBE, 2003)(BILGEN; RHEAULT, 2005). A usina operou de 1982 a 1989 e possuía potência nominal de 50 kW, neste período, pesquisas revelaram a grande influência dos aspectos geométricos na eficiência global da usina, bem como na intensidade e obtenção de energia elétrica.

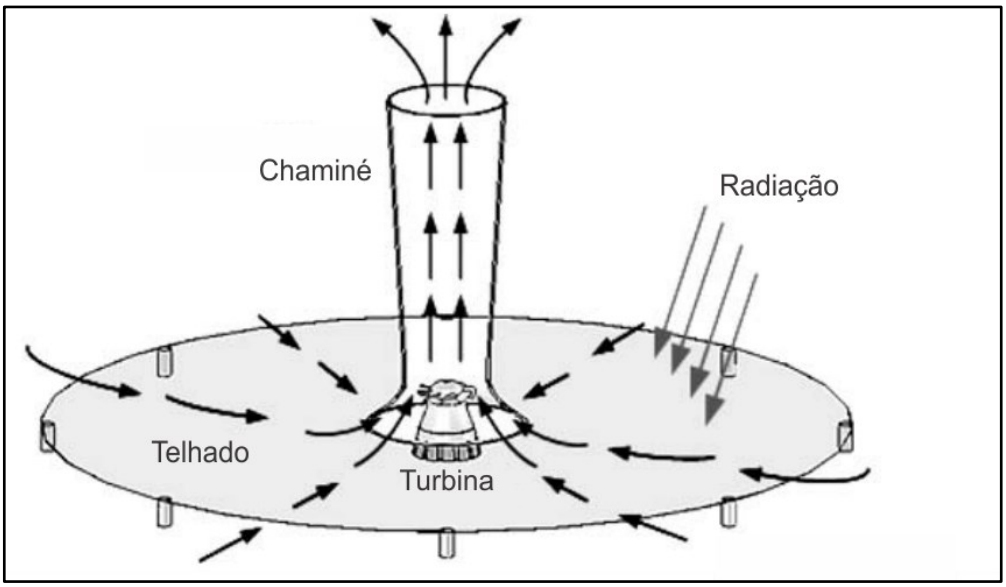
Haaf, Friedrich, Mayr e Schlaich (1983) indicam que o aumento do raio do coletor fornece uma potência maior fornecida pela usina, entretanto, tal aumento gera uma redução da eficiência global ao aumentar a intensidade de perdas por convecção, radiação e atrito do escoamento. Já o aumento da altura ou raio da chaminé resultam igualmente no aumento da eficiência global bem como na potência extraída da turbina.

Aspectos como a temperatura do ar ambiente que adentra o coletor e distribuição de ventos afetam diretamente o comportamento da chaminé, em geral, a temperatura do ar ambiente deve ser mínima e os ventos locais não devem acentuar trocas por convecção no coletor nem mesmo intensificar a estratificação térmica atmosférica.

A utilização deste tipo de usina possui vantagens em relação ao uso de concentradores solares ou de células fotovoltaicas, visto que a captação não necessita de incidência de radiação direta, podendo haver uma difusão completa com geração de energia elétrica. Entretanto, ao contrário das outras tecnologias, existe uma forte dependência pela incidência de radiação

infravermelho (HAAF; FRIEDRICH; MAYR; SCHLAICH, 1983), e seu rendimento costuma ser baixo (KOONSRISUK; LORENTE; BEJAN, 2010).

Figura 12 - Chaminé solar voltada para geração de energia elétrica



Fonte: Adaptado de Koonsrisuk, Lorente e Bejan, 2010

Ming (2016) expõe uma introdução às tecnologias voltadas para geração de energia elétrica através da energia solar, dando enfoque à usina por chaminé solar.

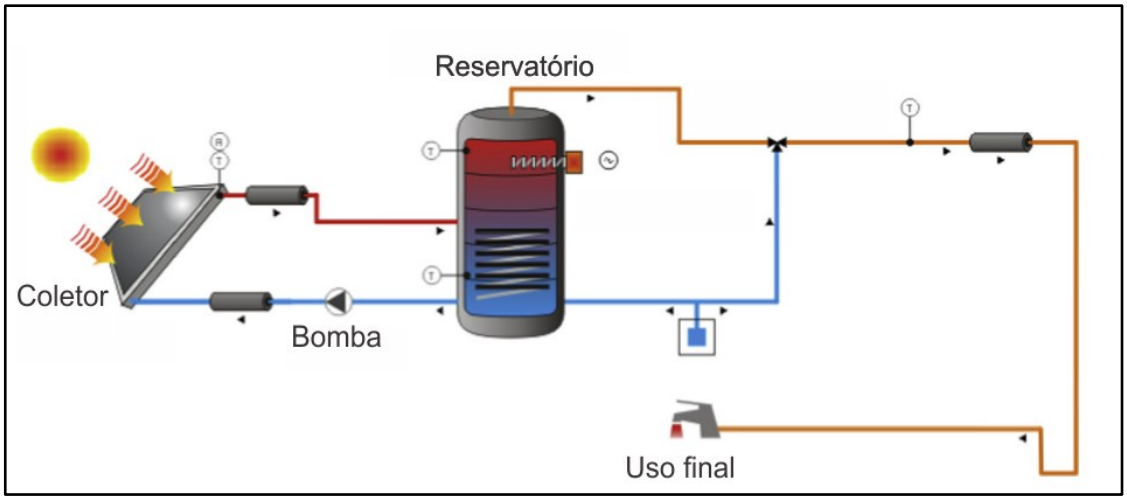
É importante notar que, um dispositivo acionado termicamente através da energia solar não necessariamente se enquadra na técnica passiva, pois como no exemplo dado acima, a energia solar após ser absorvida sofre conversões a fim de se obter energia na forma elétrica ao fim do processo.

Dentre as inúmeras aplicações da energia solar, tem-se também a utilização de sistemas de menor porte voltados para outras utilidades do ser humano. Neste aspecto, surge por exemplo o conceito de uso da energia solar para promover o aquecimento doméstico de água, que geralmente é realizado utilizando-se coletores solares planos acoplados a um reservatório térmico, desta forma, o fluido do reservatório pode ser circulado no sistema através de uma bomba (processo ativo) ou mesmo pelo princípio de termos sifão (processo passivo) para que o fluido de menor temperatura contido no reservatório preencha o volume inferior do coletor solar a medida que o fluido de menor densidade retorna para o reservatório. O uso final do fluido aquecido se dá com a drenagem do reservatório para uma torneira conforme Fig. 13, chuveiro ou sistema de utilidade como sistemas de aquecimento de piscinas e de lavagem industrial.

Os sistemas de aquecimento doméstico de água baseados nesta tecnologia geralmente

possuem alta eficiência, sendo esta, altamente dependente do desempenho e construção do coletor plano (JAISANKAR; ANANTH; THULASI; JAYASUTHAKAR; SHEEBA, 2011).

Figura 13 – Coletor solar para aquecimento doméstico de água

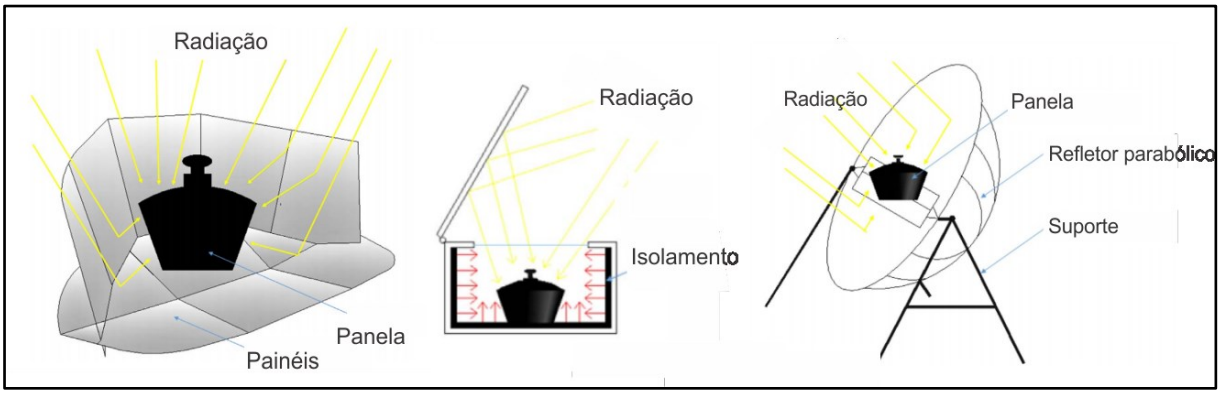


Fonte: Adaptado de Allouhi, Jamil, Kousksou, Rhafiki, Mourad e Zeraouli, 2015

O aquecimento de alimentos também pode se beneficiar da energia solar, utilizando-se de um forno solar. Trata-se de um dispositivo normalmente reflexivo que tem como propósito fornecer a energia térmica proveniente do sol para utensílios como panelas. A tecnologia é empregada geralmente através de dispositivos diretos e indiretos, residindo a diferença à apenas o método de transferência de energia para o recipiente com o alimento. Dentre os métodos de transferência direta tem-se três tipos básicos de fornos solares, sendo eles o forno solar do tipo painel, tipo caixa e por fim o parabólico (vide Fig. 14), cujo qual necessita de grande atenção devido a sua concentração de energia pontual, o que pode em alguns casos queimar facilmente o alimento ou até mesmo atear fogo à matéria orgânica ou materiais de construção (HEREZ; RAMADAN; KHALED, 2018). Os fornos solares indiretos, por outro lado, utilizam um fluido dedicado para a transferência da energia para o recipiente, sendo comumente utilizado coletores solares para promover absorção da energia solar por meio de efeito estufa.

O forno solar se apresenta como uma solução sustentável de baixo custo, revelando-se como uma alternativa à queima de madeira principalmente para povoados distantes e zonas rurais, reduzindo significativamente as emissões de gases como monóxido de carbono e dióxido de carbono (CUCE; CUCE, 2013).

Figura 14 – Fornos solares do tipo painel, caixa e parabólico



Fonte: Adaptado de Herez, Ramadan e Khaled, 2018

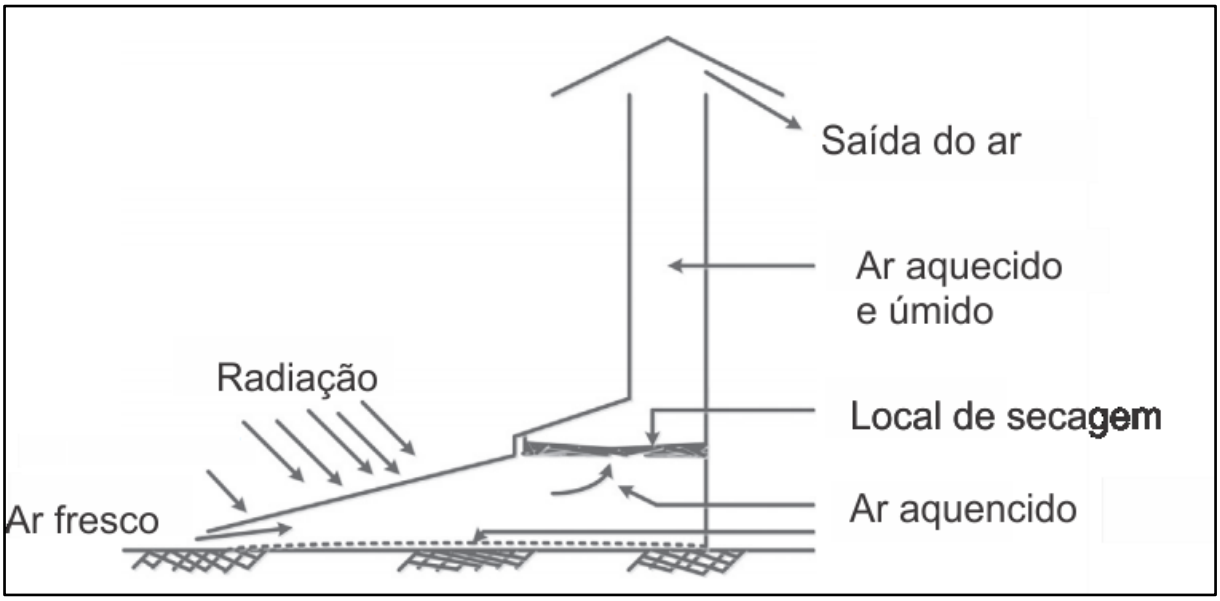
A aplicação da energia solar na agricultura também possui diversas vantagens. A técnica convencional de secagem em terreiros baseia-se no aproveitamento da energia solar para realizar a preservação de alimentos. Neste caso, expõe-se os produtos à céu aberto, permitindo que a secagem seja realizada através da incidência do sol e de ventos (MUSTAYEN; MEKHILEF; SAIDUR, 2014). Apesar de ser largamente difundida, suas limitações não permitem o controle correto de pragas, condições ambientais, nem mesmo o ajuste da velocidade de secagem para o cultivo adequado, resultando em perda de qualidade (KUMAR; SANSANIWAL; KHATAK, 2016), surgindo assim a necessidade de dispositivos que promovam o mínimo de proteção e controle do sistema.

Outros dispositivos solares surgiram com este propósito, como por exemplo no caso do método de secagem em estufas, eliminando os problemas com pragas e ventos indesejados. Outro método bastante difundido é a utilização de secadores com incidência indireta de radiação solar, no qual um coletor solar é utilizado para promover a absorção da energia, aquecendo e promovendo empuxo de ar. O ar quente é direcionado para uma câmara que contém os produtos e assim, obtêm-se a secagem dos mesmos, bem como a saída de ar úmido morno conforme ilustrado na Fig. 15 (MUSTAYEN; MEKHILEF; SAIDUR, 2014).

Vijayavenkataraman, Iniyan e Goic (2012), Mustayen, Mekhilef e Saidur (2014) e Kumar, Sansaniwal e Khatak (2016) discorreram sobre os tipos e estudos acerca dos secadores solares, bem como suas vantagens e desvantagens.

O uso de secadores solares não se restringe apenas à área de agricultura, mas a qualquer outro processo industrial ou doméstico que se necessite remover excesso de umidade contida em produtos.

Figura 15 – Secador solar



Fonte: Adaptado de Mustayen, Mekhilef e Saidur, 2014

Se o processo de secagem tem grande importância para a atividade humana, deve-se destacar também a enorme dependência das espécies animais com a umidade. A água é essencial para a existência da vida, entretanto, dentre todo o seu volume presente no planeta terra, estima-se que cerca de 97% contenha sal, e que apenas 0,5% possua infraestrutura que a disponibilize para consumo mundial (NAYI; MODI, 2018).

A água limpa é necessária em processos de irrigação na agricultura, áreas da medicina, âmbito residencial e industrial, sendo assim, surge uma enorme preocupação com o aprimoramento das técnicas de destilação e dessalinização para promover a limpeza da água ou mesmo torná-la potável.

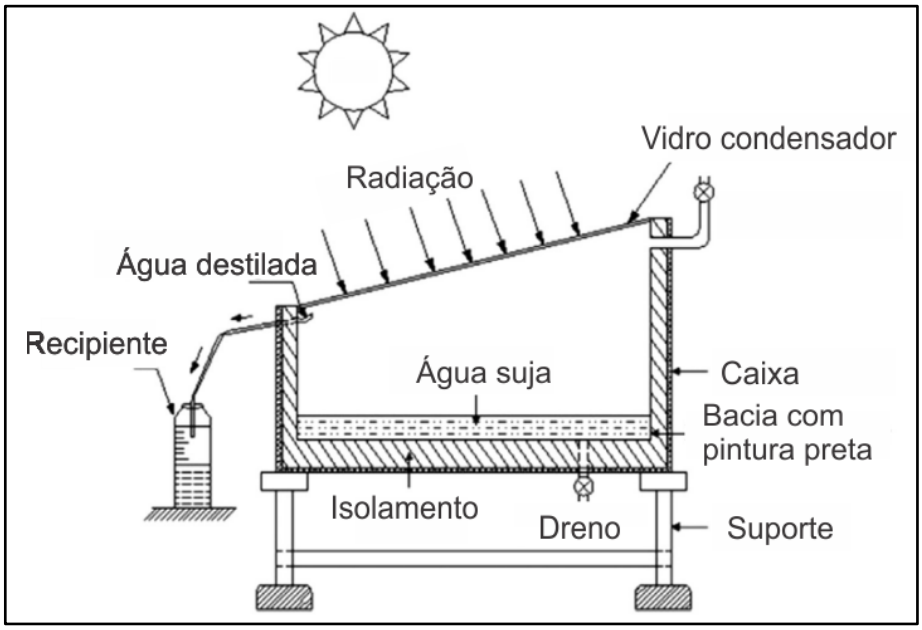
O uso de energia solar neste cenário surge a mais de 2000 anos atrás, entretanto, com o objetivo de produzir sal através de ebulição da água salgada (SIVAKUMAR; SUNDARAM, 2013). Foram necessários muitos séculos para que se fosse evidenciada a condensação de água potável, e utilização da mesma para saciar a sede de trabalhadores no Chile (PRAKASH; VELMURUGAN, 2015).

Além de apresentarem baixo custo, tais dispositivos solares não possuem dificuldades construtivas e geralmente requerem pouca manutenção (YADAV; SUDHAKAR, 2015). Entretanto, diversos autores relataram a baixa produtividade de água limpa, bem como baixa eficiência térmica.

Seu princípio de funcionamento, aspectos climáticos e construtivos são determinantes

para definir a produtividade e eficiência do equipamento, dentre eles pode-se citar a intensidade solar, a velocidade relativa dos ventos, a profundidade de água salgada retida no dispositivo e a inclinação do vidro como ilustrado na Fig. 16 (RUFUSS; INIYAN; SUGANTHI; DAVIES, 2016).

Figura 16 – Destilador solar



Fonte: Adaptado de Nayi e Modi, 2018

Assim como pode ser evidenciado em coletores solares, a energia solar permite o fácil deslocamento de massa de ar, pois o aumento de temperatura causado pela absorção de energia gera um empuxo térmico ascendente. Tal característica é ainda aproveitada por alguns dispositivos solares que possuem como finalidade a renovação e circulação de ar em ambientes.

Dispositivos como a parede Trombe, chaminés solares e fachadas duplas voltadas para ventilação são exemplos disto.

Thirugnanasambandam, Iniyan e Goic (2010) discorre sobre uma extensa revisão da literatura acerca do desenvolvimento de dispositivos térmicos acionados através da energia solar, citando tanto dispositivos da técnica passiva quanto da técnica ativa.

Dentre tantos dispositivos solares existentes, fica claro que a energia solar possui grande potencial para promover a substituição das energias e sistemas não sustentáveis, trazendo ainda versatilidade e viabilidade ao tornar possível sua utilização por sociedades em regiões remotas que não teriam acesso à tecnologia senão por outro modo. Além disso, o fato de poder ser desenvolvida em plataformas de pequeno, médio e grande porte, ainda mantendo custos

razoáveis, favorece o engajamento social.

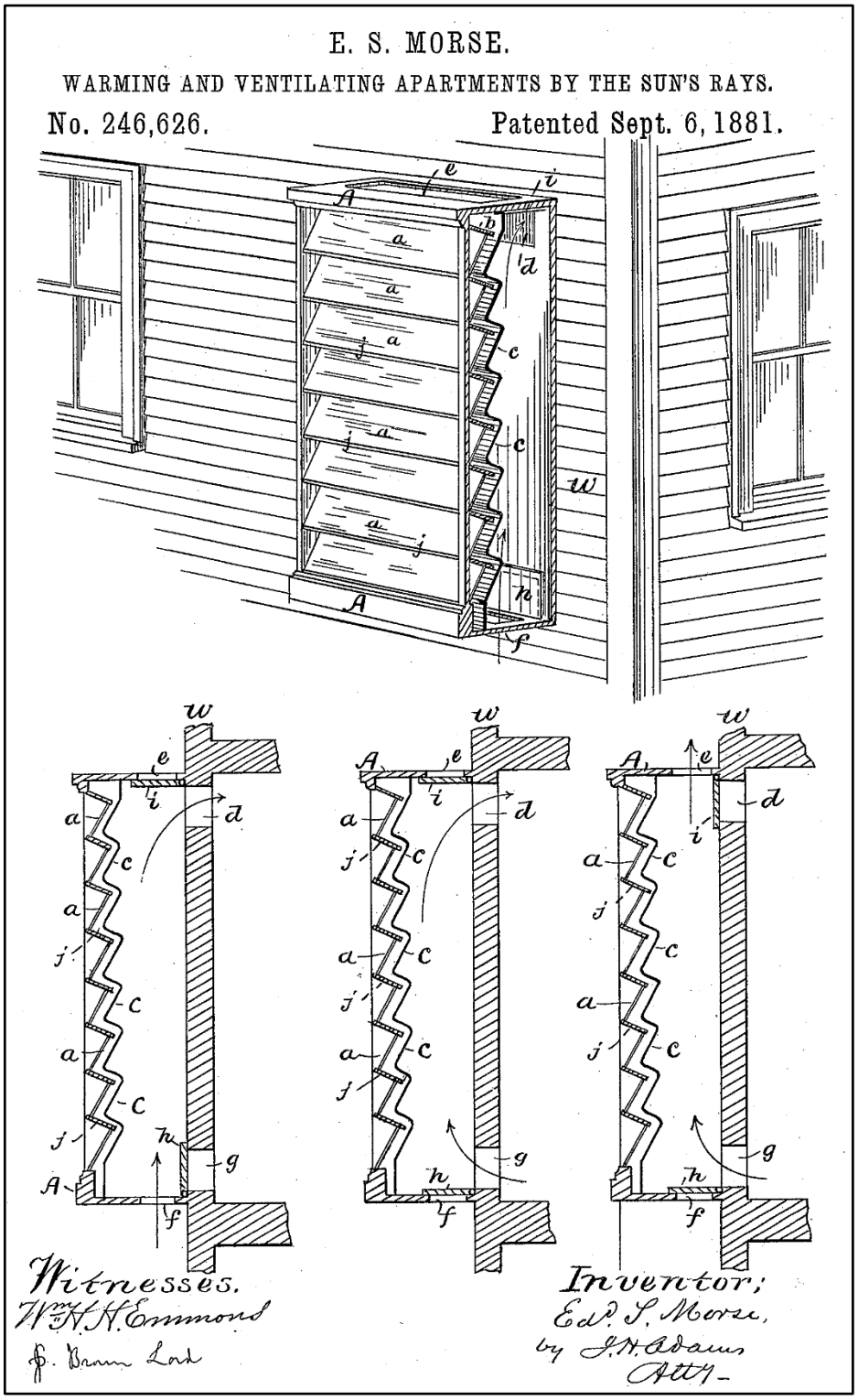
Neste trabalho, a utilização da energia solar está voltada para o acionamento de dispositivos térmicos passivos, mais especificamente, dispositivos voltados à promoção de conforto térmico em ambientes.

2.2.3 Ventilação com energia solar

A ventilação em certos dias amenos no verão pode ser facilmente realizada através de ventos advindos de janelas e portas, pois nestas circunstâncias, o ar atmosférico possui propriedades capazes de se retirar a energia de cargas térmicas (BOUCHAIR, 1994). Entretanto, certos ambientes possuem deficiências no controle termo higrométrico, seja por não possuírem janelas e outras aberturas, ou mesmo devido à baixa inércia térmica dos materiais que o formam, propiciando variações abruptas das propriedades do ar do ambiente interno.

O conceito por trás dos dispositivos de ventilação solar passivos foi idealizado por Edward S. Morse, sendo a ideia patenteada e publicada em 6 de setembro de 1881 (MORSE, 1881). Seu princípio de funcionamento ainda é utilizado nos dias atuais, sendo aplicável tanto no verão quanto no inverno. Para tal, variações geométricas mínimas são realizadas conforme a Fig. 17, permitindo uma renovação de ar através do insuflamento natural de ar quente para dentro do ambiente, aquecimento do ar interno através de uma recirculação do ar do ambiente e por fim a exaustão de ar do ambiente.

Figura 17 – Patente registrada para Edward S. Morse



Fonte: Adaptado de Morse, 1881

Em 1967, o engenheiro Félix Trombe utilizou princípio similar para elaboração de uma nova patente (FELIX, 1984), desta forma, em parceria com o arquiteto Jacques Michel, Trombe construiu um protótipo denominado de casa Trombe (vide Fig. 18), que aproveitava a energia

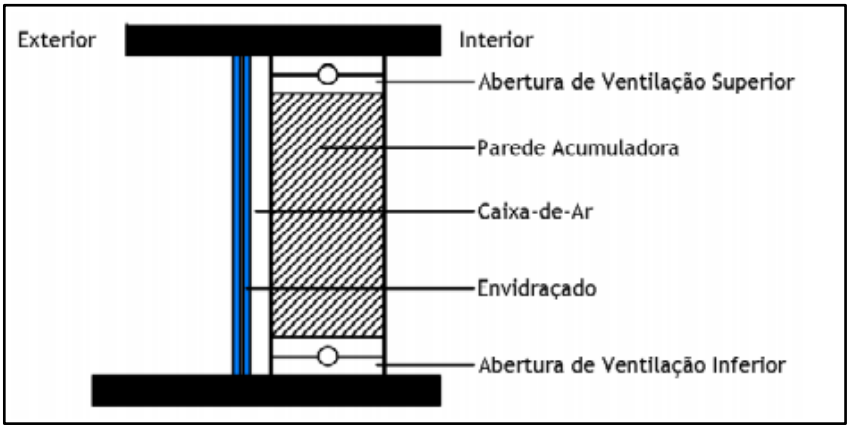
solar para induzir o aquecimento do ambiente, demonstrando assim a utilidade do sistema e promovendo assim sua popularização.

Figura 18 - Casa Trombe

Fonte: Sá, 2011

A parede solar de Trombe constitui-se em seu desenho clássico de uma parede acumuladora em combinação com uma superfície transparente. O arranjo desses componentes formam uma cavidade, comumente chamada de caixa de ar (SÁ, 2011) ou cavidade. Seu intuito é armazenar a energia solar e utilizar-se de propriedades como capacidade térmica e inércia térmica para promover um aquecimento uniforme ao ambiente ao longo do dia, liberando energia em momentos onde a incidência de calor não é elevada e a demanda por aquecimento é requerida. Seu funcionamento não permite a ventilação do ambiente, mas sim, puro aquecimento conforme ilustrado na Fig. 19.

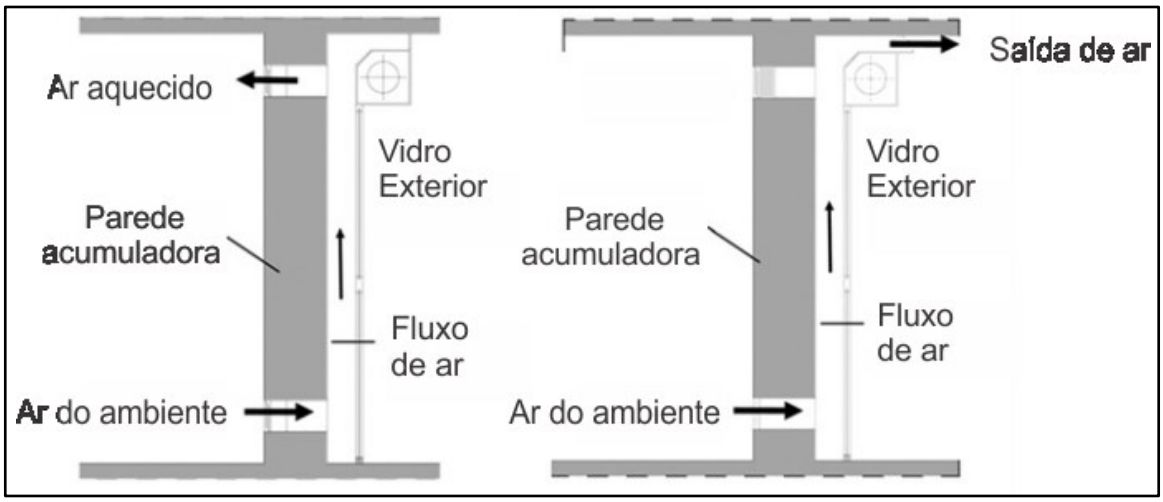
Figura 19 - Parede Trombe clássica



Fonte: Sá, 2011

Modificações foram posteriormente realizadas com o intuito de se aprimorar o arranjo, dentre elas, a utilização de aberturas, as quais permitem com que a transmissão de calor da parede acumuladora para o ambiente não seja somente baseada na radiação térmica, mas também por convecção através da convecção natural gerada na cavidade (BIANCO, 2016). Este conceito denominado como parede de Trombe modificada vai ainda mais além, permitindo sua utilização não só para prover aquecimento através destes métodos, mas também para a ventilação do ambiente através de exaustão, oferecendo um funcionamento similar à uma chaminé solar. Tais variações podem ser visualizadas na Fig. 20.

Figura 20 - Parede Trombe modificada



Fonte: Adaptado de Saadatian, Sopian, Lim, Asim e Sulaiman, 2012

Diversos outros dispositivos foram derivados a partir do conceito da parede de Trombe, (SAADATIAN; SOPIAN; LIM; ASIM; SULAIMAN, 2012) expõe grande parte deles, comentando acerca de suas especificações e finalidades de acordo com a necessidade do local em termos de conforto térmico.

A chaminé solar por outro lado, não possui elemento acumulador, mas sim um isolante térmico (BANSAL; MATHUR; MATHUR; JAIN, 2005), garantindo que a energia coletada seja mantida na cavidade e assim promovendo um sistema de termossifão com intenso empuxo térmico (ZHAI; SONG; WANG, 2011). Entretanto, a chaminé solar também é capaz de promover um aquecimento do ambiente por convecção desde que submetida à períodos de incidência de radiação solar, bastando apenas uma alteração do escoamento. De qualquer modo, sua concepção é voltada principalmente para a ventilação por exaustão, sendo um arranjo aplicável para locais onde a ventilação do ambiente é requerida em momentos de intensa

radiação solar, devido sua baixa inércia térmica.

Alguns autores buscam implementar acumuladores de energia na chaminé solar, a fim de estender a ventilação por períodos após a incidência de radiação solar. Dentre estes pode-se citar os estudos realizados por Li, Liu e Shukla (2016), Amori e Mohammed (2012) acerca de acumuladores de energia do tipo latente (*LHS – Latent Heat Storage*), os quais possuem alta eficiência por trabalharem apenas com a mudança de fase do componente, sem variações de temperatura.

Neste trabalho, o enfoque reside na chaminé solar voltada para a ventilação por exaustão, entretanto, os estudos voltados para a parede de Trombe são em sua maioria aplicáveis para a chaminé solar, pois se baseiam no mesmo fenômeno e possuem componentes semelhantes, sendo assim, estes são de grande valia para o estudo aqui levantado.

2.3 CONCEITOS ENVOLVIDOS

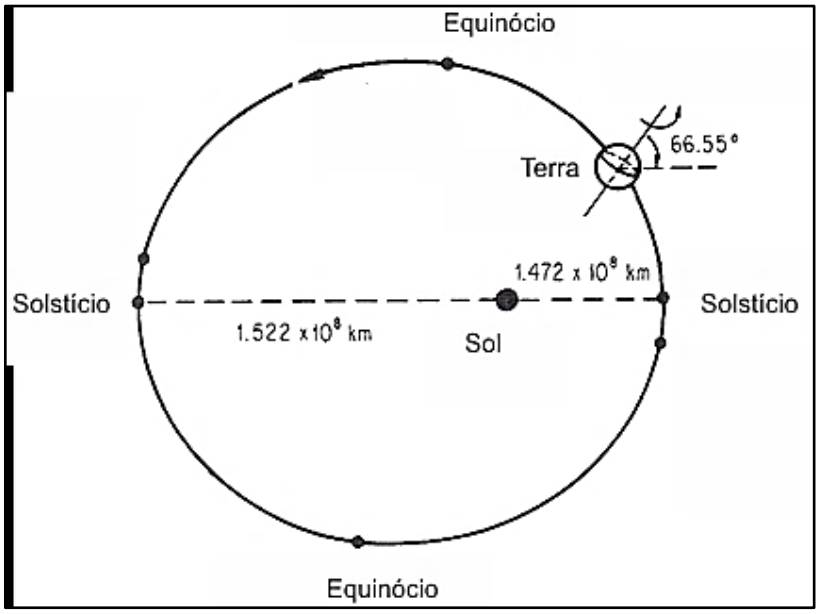
Chaminés solares são essencialmente ativadas por uma fonte térmica, através da absorção de energia solar, portanto, seu desempenho depende de inúmeros fatores climáticos e construtivos com o intuito de se maximizar a absorção da radiação solar e sua posterior conversão em empuxo térmico.

2.3.1 Radiação solar

A radiação emitida pelo sol constitui-se da união de diversas ondas eletromagnéticas. A faixa de comprimento de tais ondas é questionável, porém diversos autores citam faixas próximas, compreendidas entre 0,1 μm e 4,0 μm (ÖZISIK, 1973)(BEZERRA, 1982)(DAN; BARSHILIA; CHATTOPADHYAY; BASU, 2017).

A incidência de radiação extraterrestre, ou seja, fora da atmosfera terrestre, é aproximadamente equivalente à radiação de um corpo negro sujeito à temperatura de 5762 K, entretanto, a inclinação terrestre no sistema solar, bem como a variação da distância entre o sol e a terra ao longo do ano (Fig. 21) acarretam em uma incidência de radiação extraterrestre não uniforme durante este período (LUNDE, 1980).

Figura 21 – Órbita do planeta terra

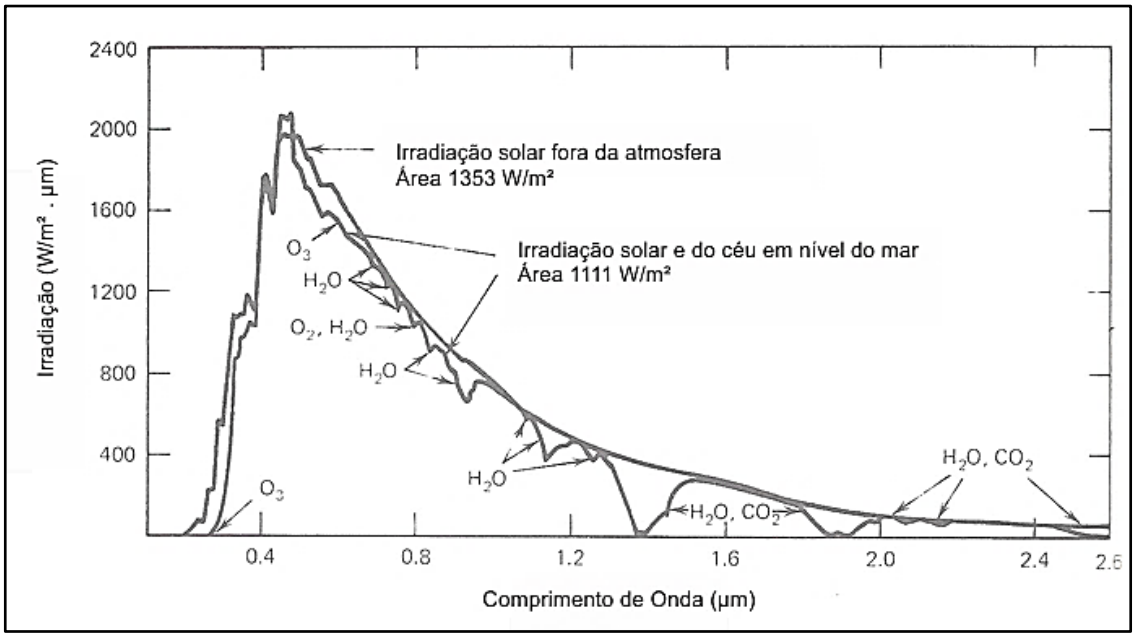


Fonte: Adaptado de Kreider e Kreth, 1981

A incidência de radiação solar na superfície terrestre difere-se da incidência extraterrestre, fatores atmosféricos como absorção, reflexão e espalhamento da radiação devido a interação molecular das ondas eletromagnéticas com a própria composição química do ar atmosférico ou mesmo nuvens são grandes contribuidores para esta diferença (KREIDER; KRETH, 1981)(WINTER; SIZMANN; VANT-HULL, 1991).

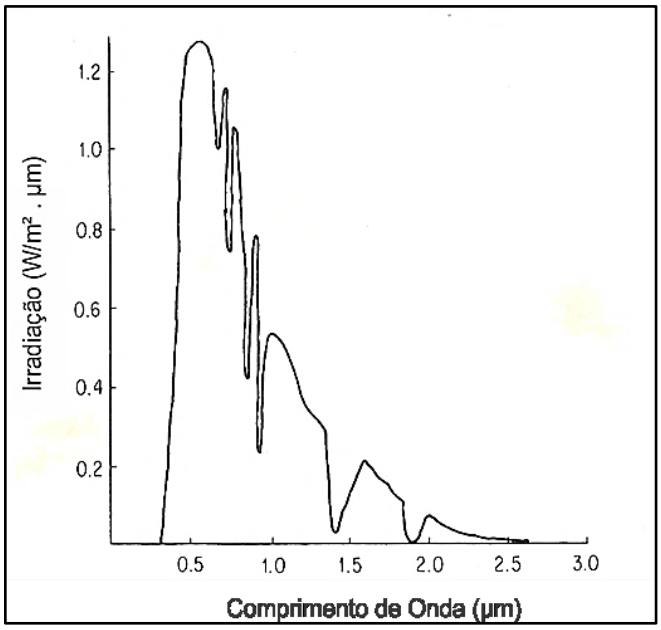
Portanto, se a irradiação solar é fortemente dependente da interação com a atmosfera, é de se esperar que, para um local específico na superfície terrestre, haja variações da irradiação ao longo do tempo, mesmo que o céu esteja perfeitamente “limpo” e livre de nuvens neste período. Tal fenômeno ocorre pois, a massa atmosférica à qual a radiação deve se propagar diminui até que o sol seja visualizado em sua posição central de meio-dia, e da mesma forma ocorre um aumento da massa atmosférica até que o sol seja visto em sua posição de pôr do sol. Esta variação de massa atmosférica interfere diretamente a absorção, reflexão e transmissão da radiação solar, sendo que propagações em maior distância levam à uma incidência menor de radiação solar na superfície terrestre (KREIDER; KRETH, 1981). Na Fig. 22 pode-se visualizar a influência da atmosfera na distribuição espectral da radiação solar para uma massa atmosférica unitária, ou seja, para a posição do sol no meio-dia, já na Fig. 23 pode-se verificar a atenuação de radiação devido ao aumento da massa atmosférica, sendo a massa equivalente ao dobro da presente na posição de meio-dia.

Figura 22 – Irradiação extraterrestre e irradiação para massa atmosférica unitária



Fonte: Adaptado de Lunde, 1980

Figura 23 – Irradiação para massa atmosférica equivalente à 2

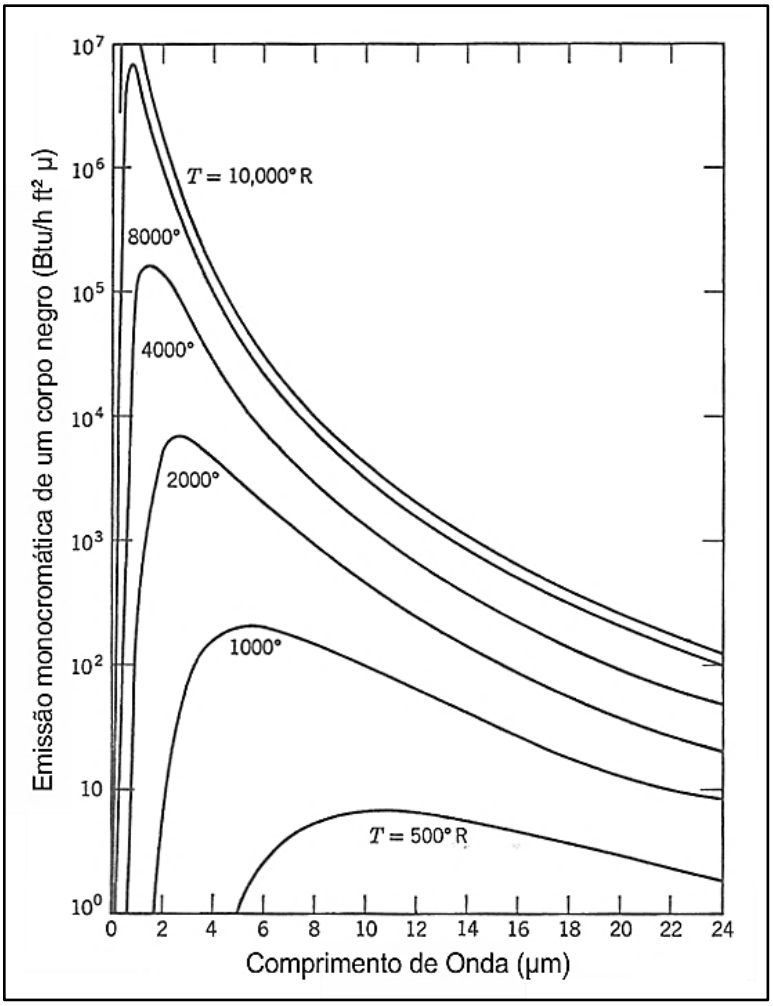


Fonte: Adaptado de Kreider e Kreth, 1981

De acordo com a lei de Planck, a distribuição espectral da emissão de radiação por um corpo negro ideal sofre variação de acordo com a temperatura superficial do mesmo. Ao passo que com o aumento da temperatura do corpo, a distribuição além de elevar sua intensidade

energética, passa a emitir radiação em comprimentos de onda também mais curtos como ilustrado na Fig. 24.

Figura 24 – Distribuição espectral da emissão de radiação para um corpo negro no vácuo



Fonte: Adaptado de Özisik, 1973

Através de uma análise de máximos e mínimos, deriva-se a equação que rege a intensidade energética em função do comprimento de onda, deduzindo-se assim, a lei desenvolvida por Wilhelm Wien. Nesta, identifica-se o comprimento de onda no qual a intensidade energética emitida através de radiação por um corpo negro ideal é máxima, conforme a Eq. 1 (WINTER; SIZMANN; VANT-HULL, 1991)(KREIDER; KRETH, 1981).

$$\lambda_{max}.T = 2897{,}8\ [\mu m \cdot K] \qquad (1)$$

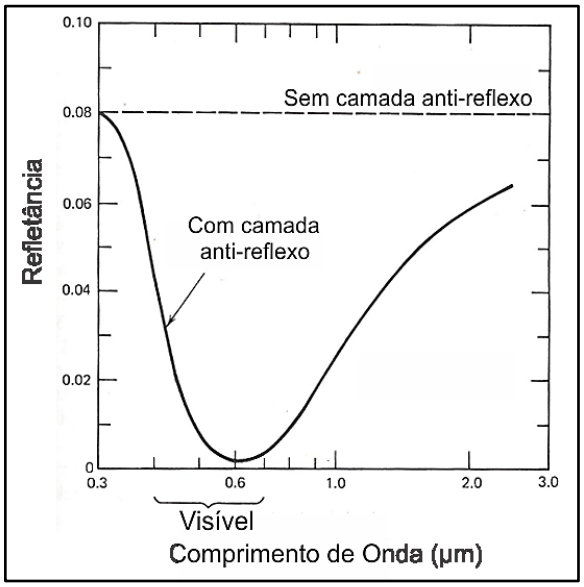
Com λ_{max} sendo o comprimento de onda em μm onde a emissão é máxima e T sendo a temperatura uniforme do corpo em Kelvin.

Seguindo a lei de Wien, para um corpo negro ideal representando o sol, com temperatura próxima a 5762 K, tem-se uma emissão máxima através do comprimento de onda de aproximadamente 0,5 μm, conforme pode ser evidenciado na Fig. 22 e Fig.23. Entretanto, em um dispositivo solar, além da radiação solar, tem-se também a radiação térmica, emitida por componentes internos, os quais geralmente se estabelecem próximo da temperatura de 60 °C, portanto, de maneira análoga, para um corpo com temperatura de 333 K tem-se a emissão máxima de re-radiação por ondas com comprimento de aproximadamente 8,7 μm.

Para se obter a maior absorção de energia solar, é necessário que tais dispositivos sejam desenvolvidos de forma a absorver a radiação solar mas evite a re-radiação para o ambiente, logo, surge a necessidade de se explorar a refletividade, absortividade e transmissividade de diferentes materiais.

A refletividade de um material impede que a energia contida em ondas eletromagnéticas possa ser absorvida ou transmitida pelo mesmo. Dispositivos solares baseados na absorção de energia solar por "efeito estufa", como por exemplo os coletores solares, contam com o auxílio de superfícies transparentes, que necessitam de baixa refletividade e alta transmissividade para os comprimentos de onda de maior intensidade solar. Camadas anti-reflexivas de apenas alguns micrometros ou mesmo a utilização de filtros podem auxiliar na otimização do material, no caso do uso de vidro, isto pode ser evidenciado através do espectro da Fig. 25.

Figura 25 - Minimização da refletância por camadas anti-reflexivas



Fonte: Adaptado de Lunde, 1980

Nestes tipos de sistema é recomendada também a utilização de vidros de baixo teor de óxido de ferro em sua composição, o qual minimizam a absorção por parte do material, permitindo uma maior transmissibilidade. O vidro comum, ou chamado *float*, geralmente transmite de 79% a 84% da radiação solar, apresentando cerca de 0,12% de óxido de ferro em sua composição, ao passo que, um vidro do tipo *extra clear*, ou também chamado *water white*, possuindo apenas 0,01% de óxido de ferro é capaz de transmitir até mesmo 91% da radiação incidente (KREIDER; KRETH, 1981).

Se os vidros utilizados em coletores solares necessitam de alta transmissibilidade, os chamados concentradores solares, por outro lado, necessitam de máxima refletividade, uma vez que toda a energia solar deve ser concentrada em um coletor. Além disso, para um concentrador solar é imprescindível que o material possua mínima absortividade, do contrário, parte da energia solar é destinada ao aumento indesejado de temperatura de um componente.

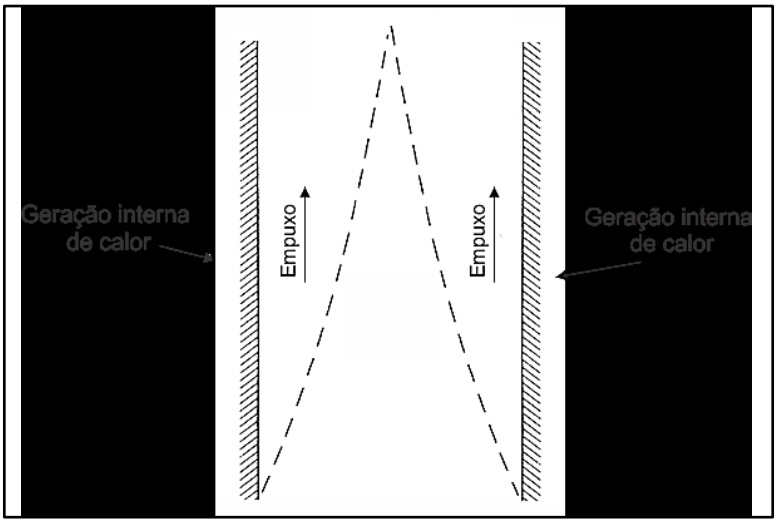
Tais exemplos evidenciam claramente a importância de se estudar a função e o espectro de comprimentos de onda eletromagnética aos quais cada componente está submetido.

2.3.2 Escoamento natural

A indução de escoamento por energia térmica não é um fenômeno exclusivo de chaminés solares, qualquer sistema fluídico que possua um gradiente térmico está sujeito as leis físicas que regem o escoamento natural.

O escoamento natural ocorre em velocidades extremamente baixas, e sua transmissão de calor, conhecida como convecção natural é aplicável em diversas áreas de engenharia, sendo largamente estudada na literatura (SCHLICHTING, 1979). Diversas pesquisas voltadas ao arrefecimento de dispositivos eletrônicos, industriais, ou até mesmo em aplicações nucleares são realizadas (MOSHFEGH; SANDBERG, 1996)(ANGELO, 2013). Tem-se como exemplo de aplicação, o arrefecimento de computadores e servidores, onde múltiplas placas de circuito impresso, com geração interna de calor, transferem esta energia ao fluido que as envolve, promovendo um escoamento ascendente devido as variações das propriedades do fluido como representado na Fig. 26 (FEDOROV; VISKANTA, 1997).

Figura 26 – Placas de circuito impresso com geração interna de calor

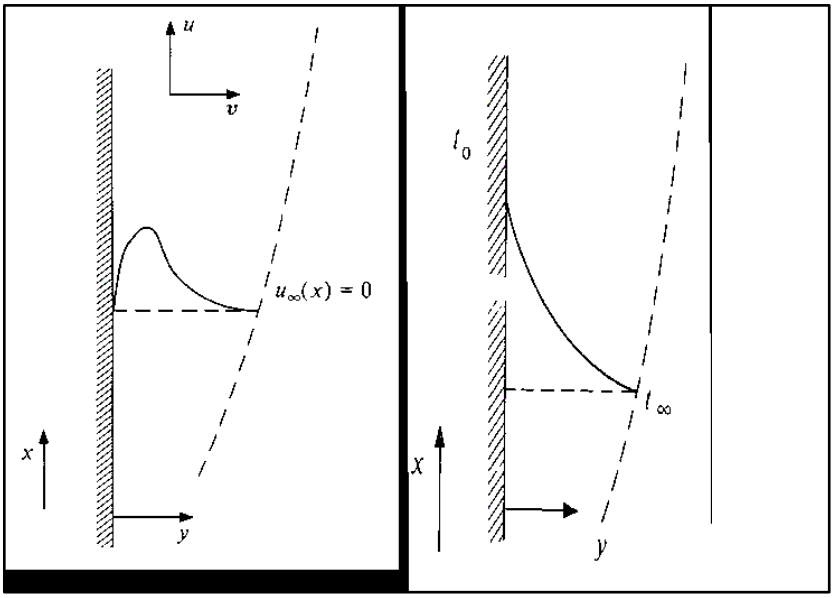


Fonte: Autor

Tal mecanismo é, portanto, uma forma de promover uma circulação à baixo custo, de maneira confiável, robusta e geralmente utilizando-se poucos componentes.

Em oposição ao escoamento forçado, o escoamento natural possui velocidade nula (meio quiescente) externamente a camada limite hidrodinâmica, sendo que nesta região a pressão é hidrostática e não possui vínculo com o escoamento principal (MARTYNENKO; KHRAMTSOV, 2005). Tal conceito ilustra claramente a concentração do escoamento na camada limite que se forma próxima a superfície aquecida, como pode ser visto na Fig. 27.

Figura 27 - Gradientes de velocidade e temperatura típicos de escoamentos naturais



Fonte: Kays e Crawford, 1993

As equações de conservação de energia, de massa e de quantidade de movimento para a placa plana levam em consideração um fluido newtoniano diante de um escoamento bidimensional em regime permanente, seguindo o sistema de coordenadas da Fig. 27. Desta forma, podendo ser expressas respectivamente conforme as Eq. 2, Eq. 3 e Eq. 4 (KAYS; CRAWFORD, 1993) (KREIDER; KRETH, 1981).

$$\rho u c \frac{\partial T}{\partial x} + \rho v c \frac{\partial T}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial T}\left(k \frac{\partial T}{\partial y}\right) = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \tag{3}$$

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = g(\rho_\infty - \rho) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial y}\right) \tag{4}$$

A análise do fenômeno é complexa, mesmo em regime permanente, visto que o escoamento possui uma enorme sensibilidade térmica, tal qual torna o gradiente de velocidade fortemente relacionado ao gradiente térmico (PINARD; FRAISSE; MÉNÉZO; RENZI, 2012) (SCHLICHTING, 1979).

Em geral, para gases, a variação térmica acarreta em variações de massa específica, viscosidade dinâmica (consequentemente viscosidade cinemática), condutividade térmica e calor específico, entretanto, para pequenas variações de temperatura (temperatura da superfície aquecida em relação a temperatura ao longe da superfície) é comum utilizar-se da aproximação de Boussinesq, a qual considera o escoamento em regime permanente e apenas a variação de massa específica em função da temperatura, regida pela Eq. 5 (KAYS; CRAWFORD, 1993)(SHANG, 2006).

$$\rho_\infty - \rho = \rho\beta(T - T_\infty) \tag{5}$$

Sendo β o coeficiente volumétrico de expansão térmica do fluido, representado na Eq. 6 (KREIDER; KRETH, 1981).

$$\beta = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_P \cong \frac{\rho_\infty - \rho}{\rho(T - T_\infty)} \tag{6}$$

No caso de um gás ideal, β pode ser expresso através da Eq. 7 (KREIDER; KRETH, 1981).

$$\beta = \frac{1}{T_\infty} \tag{7}$$

A aproximação de Boussinesq resulta, portanto na equação de quantidade de movimento conforme a Eq. 8 (KAYS; CRAWFORD, 1993)(KREIDER; KRETH, 1981).

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = g\beta(T - T_\infty) + \nu\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \tag{8}$$

Tais equações podem ser aplicadas com grande êxito no escoamento ao longo de superfícies verticais com escoamento induzido através do campo gravitacional, entretanto, é necessário que a variação da temperatura ao longe da superfície aquecida (T∞) em função da coordenada paralela à superfície (x) seja desprezível (KAYS; CRAWFORD, 1993).

Para os demais casos, é necessário levar em consideração a variação das demais propriedades do fluido, desta maneira, deve-se incluir o comportamento característico destas propriedades nas equações de conservação de energia, de massa e de quantidade de movimento, conforme a Eq. 9, Eq, 10, Eq. 11, Eq. 12 e Eq. 13 (SHANG, 2006).

$$\frac{\mu}{\mu_\infty} = \left(\frac{T}{T_\infty}\right)^{n_\mu} \tag{9}$$

$$\frac{k}{k_\infty} = \left(\frac{T}{T_\infty}\right)^{n_k} \tag{10}$$

$$\frac{\rho}{\rho_\infty} = \left(\frac{T}{T_\infty}\right)^{-1} \tag{11}$$

$$\frac{\nu}{\nu_\infty} = \left(\frac{T}{T_\infty}\right)^{n_\mu+1} \tag{12}$$

$$\frac{c_p}{c_{p\infty}} = \left(\frac{T}{T_\infty}\right)^{n_{c_p}} \tag{13}$$

Os expoentes das equações refletem diretamente na sensibilidade da variável em função da temperatura e, portanto, para expoentes maiores, maior será a variação da propriedade ao longo de um gradiente térmico. Dentre os fatores que promovem essa sensibilidade está o número atômico do gás sendo escoado, ao passo que, quanto maior o número atômico, maior a sensibilidade térmica (SHANG, 2006).

Particularmente, para gases monoatômicos ou diatômicos, a variação de calor específico do fluido é mínima ($n_{c_p} < 0.1$), portanto, essa influência pode ser desprezada. Entretanto, para gases poliatômicos (3 ou mais átomos) o mesmo não pode ser realizado (SHANG, 2006).

O fluido escoado em uma chaminé solar é o ar atmosférico, o qual possui composição segundo a Tab. 1.

Tabela 1 - Composição química do ar

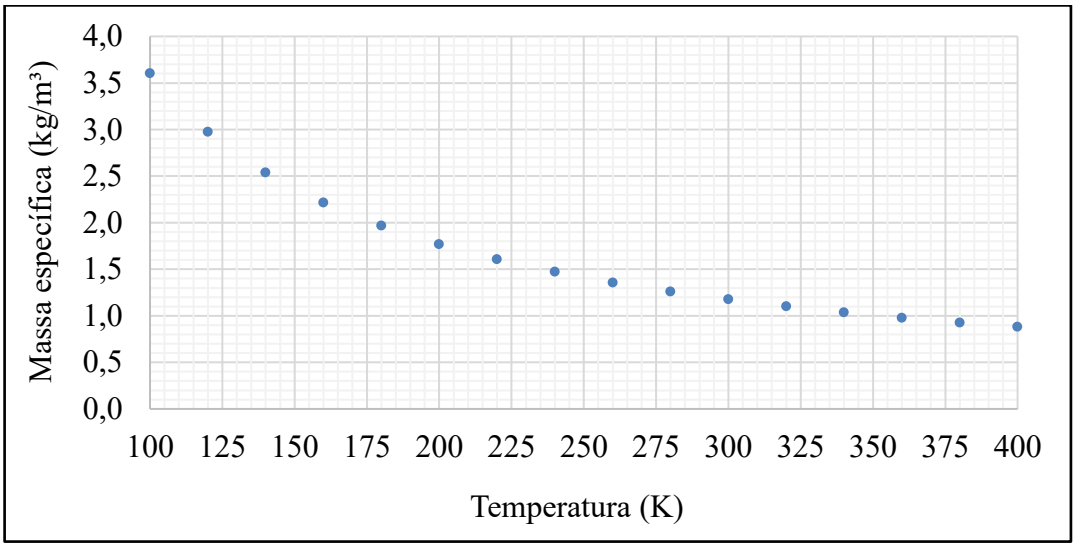
Constituinte	% Mols
N_2	78.08
O_2	20.95
Ar	0.93
CO_2	0.036
Ne, He, CH_4, Outros	0.003

Fonte: Adaptado de Turns e Kraige, 2007

A indução de um empuxo térmico é determinada pelo grau de expansão volumétrica do fluido em questão, visto que fluidos com maior coeficiente de expansão, se expostos ao mesmo gradiente térmico, geram forças de empuxo maiores e consequentemente um aumento da velocidade média do escoamento.

No caso em questão, a variação da massa específica do ar revela seu grau de expansão em função da temperatura, como ilustrado na Fig. 28.

Figura 28 – Variação da massa específica do ar atmosférico em função da temperatura



Fonte: Adaptado de Turns e Kraige, 2007

O escoamento natural é acionado por forças de empuxo presentes no campo gravitacional, portanto dada a expansão do fluido como na Eq. 14, tem-se uma força infinitesimal relacionada a diferença das massas específicas (MARTYNENKO; KHRAMTSOV, 2005).

$$\Delta\vec{F} = \Delta(\rho\vec{g}) = \Delta\rho\vec{g} + \rho\Delta\vec{g} \tag{14}$$

Partindo do pressuposto básico de que o escoamento natural é induzido por um empuxo térmico no campo gravitacional, Tritton (1988) coloca que o escoamento atinge regime permanente no instante em que outros termos o balanceiam, sendo assim, tais termos não podem possuir grandeza maior que o empuxo térmico, e assim, as grandezas inerciais ou viscosas, ou ambas, devem possuir a mesma grandeza do empuxo.

Os parâmetros adimensionais relacionados ao fenômeno são obtidos através do teorema dos π de Buckingham, utilizando-se como variáveis a velocidade (u), o comprimento característico (L), a gravidade (g), o coeficiente de expansão térmica (β), a diferença de temperatura (T-T∞), a viscosidade cinemática (ν) e a difusividade térmica (α). Utilizando-se de uma base com massa, comprimento, tempo e temperatura, obtêm-se os parâmetros expressos na Eq. 15, Eq. 16 e Eq. 17 (KREIDER; KRETH, 1981).

$$\pi_1 = \frac{U_\infty L}{\nu} \tag{15}$$

$$\pi_2 = \frac{\nu}{\alpha} \tag{16}$$

$$\pi_3 = \frac{g\beta(T-T_\infty)L^3}{\nu^2} \tag{17}$$

Pode-se reconhecer o primeiro parâmetro (π1) como o número de Reynolds, o segundo parâmetro (π2) como o número de Prandtl e o terceiro parâmetro (π3) como o número de Grashof (KREIDER; KRETH, 1981).

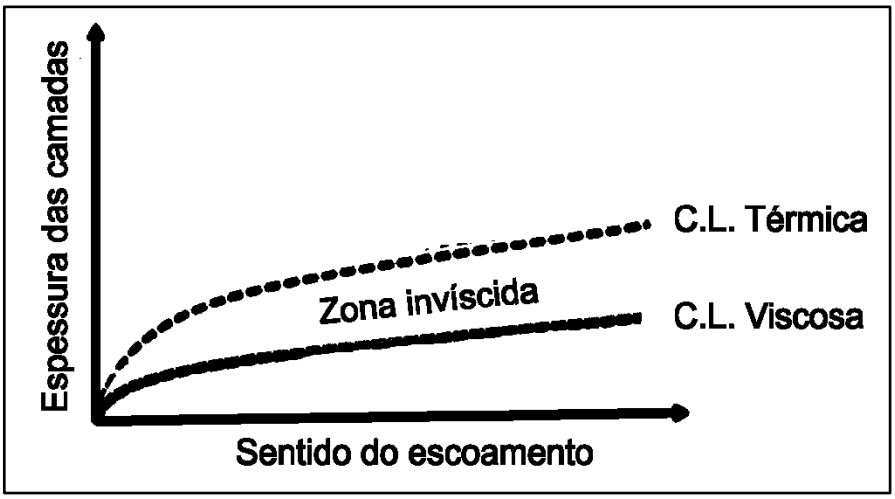
O regime de um escoamento é geralmente determinado pelo adimensional Reynolds, o qual é definido pela razão entre as forças inerciais e as forças viscosas. Portanto, um escoamento onde tem-se predominantemente as ações físicas inerciais do fluido apresenta um número de Reynolds alto, já um escoamento onde tem-se efeitos viscosos predominantes, apresenta um número de Reynolds baixo. Tais regimes podem ser qualificados como laminar ou turbulento, sendo que entre eles é possível observar um comportamento de transição, indicando características iniciais de um escoamento caótico com flutuações abruptas de velocidade.

Em um escoamento natural, a velocidade do fluxo é determinada pelo campo de temperatura, portanto, o número de Reynolds (π1) não é um parâmetro independente, mas sim, dependente (KREIDER; KRETH, 1981) (TRITTON, 1988).

O número de Prandtl, por outro lado, apresenta uma relação entre as propriedades de difusão de quantidade de movimento (ν) e difusividade térmica do fluido (α), indicando se o fluido possui maior grau de difusão de vorticidade ou de difusão de calor (TRITTON, 1988), respectivamente.

Para números de Prandtl pequenos (menores que 1), tem-se uma camada viscosa de baixa espessura próxima a superfície aquecida e uma camada térmica de maior espessura, de tal forma que, exista uma zona a qual pode ser tratada com simplificações de fluido inviscido (sem viscosidade). Nesta situação, o empuxo térmico ocorre ao longo de toda a camada limite térmica, promovendo o escoamento em ambas as zonas, assim, a camada limite hidrodinâmica assume a mesma dimensão da camada limite térmica e o escoamento na região não viscosa é, portanto, tido como potencial (MARTYNENKO; KHRAMTSOV, 2005). Tal comportamento pode ser ilustrado através da Fig. 29.

Figura 29 – Comportamento das camadas limites viscosa e térmica para baixos números de Prandtl

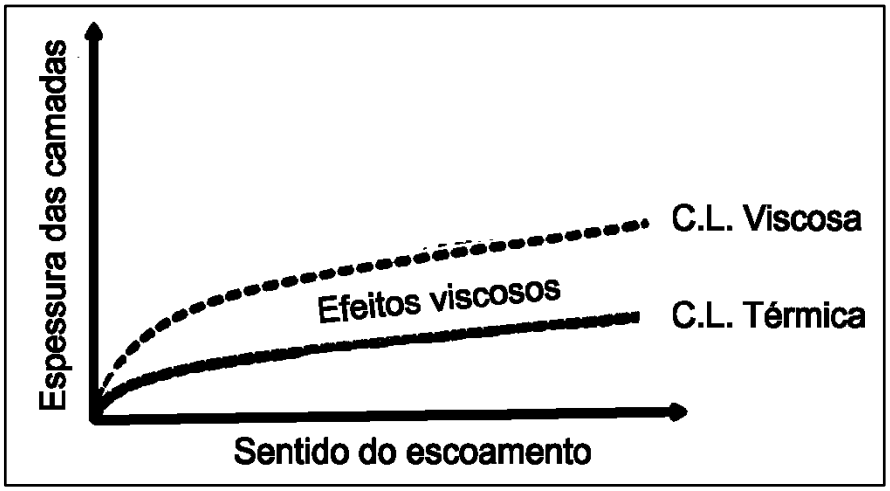


Fonte: Autor

No caso do número de Prandtl ser igual a 1, as camadas limites viscosa e térmica assumem mesma dimensão, possuindo empuxo térmico ao longo de toda a sua extensão. Em geral, gases apresentam números de Prandtl ligeiramente menor que 1 (TRITTON, 1988).

Já para números de Prandtl elevados (maiores que 1), tem-se uma camada térmica com espessura menor se comparada à camada viscosa, e assim, nenhuma zona pode ter sua viscosidade desprezada. Entretanto, o fato de o empuxo térmico estar presente apenas na camada limite térmica reflete em um escoamento por arraste viscoso na zona da camada viscosa que não possui a presença do empuxo (vide Fig. 30)(MARTYNENKO; KHRAMTSOV, 2005).

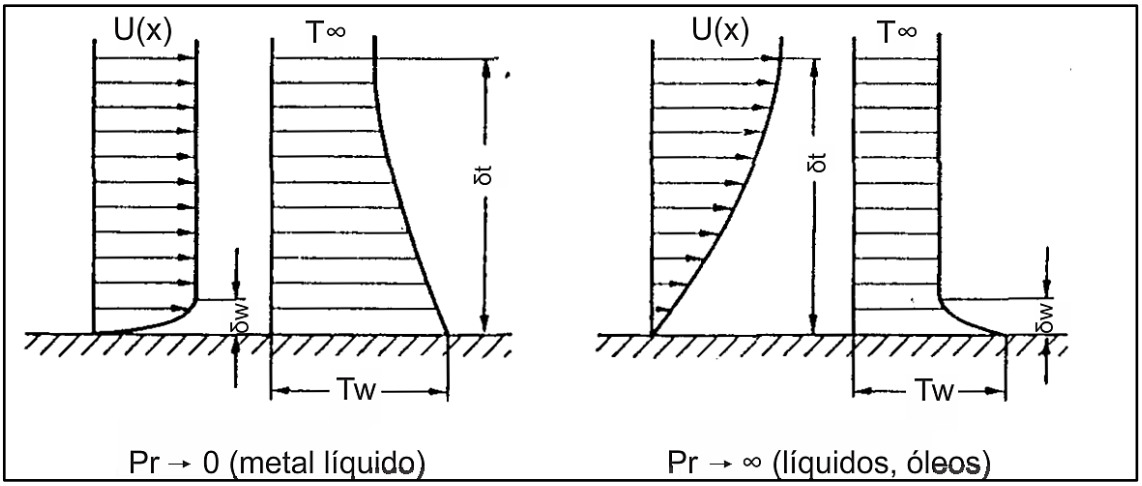
Figura 30 – Comportamento das camadas limites viscosa e térmica para altos números de Prandtl



Fonte: Autor

A Figura 31 ilustra claramente o comportamento típico de metais líquidos (com baixo número de Prandtl) e de diversos outros fluidos como óleos (número de Prandtl elevado).

Figura 31 – Diferença no número de Prandtl para escoamentos forçados



Fonte: Adaptado de Schlichting, 1979

Assim como o número de Reynolds indica o regime ao qual o escoamento forçado está sujeito, o número de Grashof indica o regime ao qual o escoamento natural está submetido. De forma análoga, o número de Grashof relaciona as forças inerciais devido ao empuxo às forças viscosas (KREIDER; KRETH, 1981)(TRITTON, 1988), comparando-as. No caso de um escoamento natural ocorrendo entre duas superfícies com temperaturas distintas, tem-se o número de Grashof local expresso como na Eq. 18 (MARTYNENKO; KHRAMTSOV, 2005).

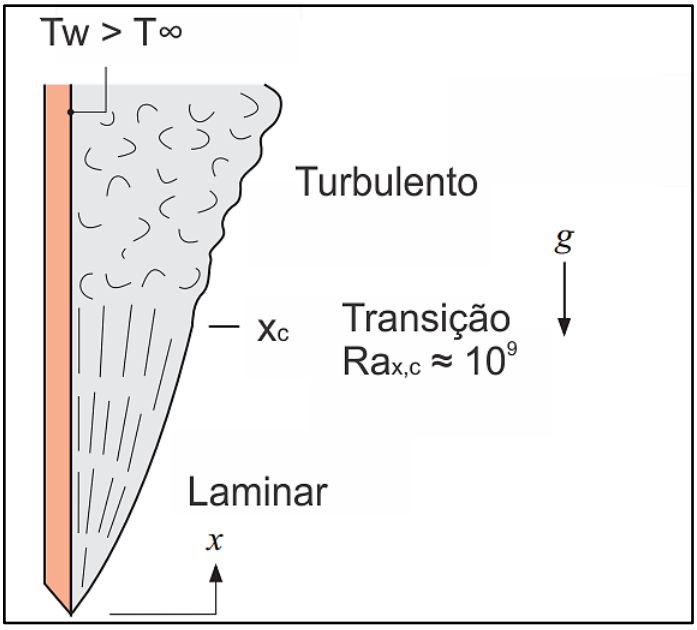
$$Gr_L = \frac{g\beta(T-T_\infty)L^3}{\nu^2} \tag{18}$$

Os números de Prandtl e Grashof são geralmente combinados na forma de um produto, o qual é conhecido como número de Rayleigh. Para o escoamento natural sobre uma placa plana vertical, tem-se um número de Rayleigh crítico equivalente à cerca de 10^9, sendo o regime laminar situado até 10^8, seguido por uma região de transição entre 10^8 e 10^{10} e finalmente o regime turbulento a partir de 10^{10} (KREIDER; KRETH, 1981)(MARTYNENKO; KHRAMTSOV, 2005).

Para uma placa plana vertical, o escoamento natural em regime permanente pode produzir um gradiente de velocidade ao longo da placa (du/dx) de tal forma que a velocidade relativa do ar é baixa na parte inferior da placa, sofrendo um incremento ao longo da placa

(aumento da velocidade com o aumento de x), o que altera o regime de um escoamento laminar para turbulento gradualmente conforme ilustra a Fig. 32.

Figura 32 - Variação do regime ao longo da coordenada



Fonte: Adaptado de Bergman, Lavine, Incropera e Dewitt, 2011

O número de Nusselt também é um adimensional de grande importância para a análise do escoamento natural, particularmente a análise de transmissão de calor do fenômeno, ou seja, a convecção natural. Sua grandeza pode ser calculada de acordo com a Eq. 19, a qual relaciona o grau de transmissão de calor por condução e por convecção na região próxima à superfície (BERGMAN; LAVINE; INCROPERA; DEWITT, 2011).

$$Nu = \frac{hL}{k_f} \tag{19}$$

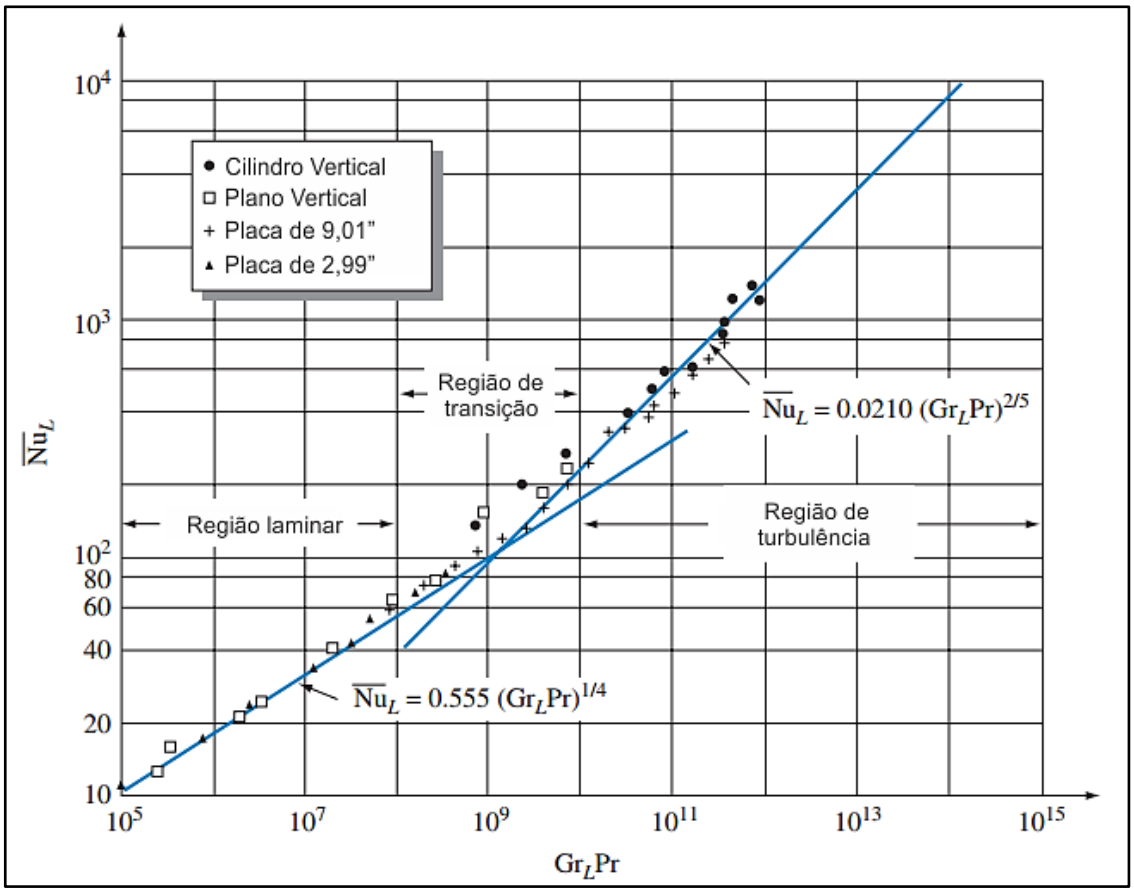
Tanto no regime transiente (escoamento ainda não desenvolvido) quanto no regime permanente há variação das espessuras das camadas limites térmica, viscosa e hidrodinâmica, bem como do coeficiente de convecção, ambos em função do espaço, ocasionando assim, uma alteração no número de Nusselt, portanto, é comum utilizar-se da denominação “local” para especificar que o número de Nusselt é valido para um certo ponto do escoamento. Entretanto, tais problemas geralmente visam levantar um coeficiente médio de convecção ao longo de uma geometria com o intuito de se obter o fluxo de calor total do fenômeno, logo, é necessário

utilizar um número de Nusselt médio como na Eq. 20 para se atingir este objetivo (BERGMAN; LAVINE; INCROPERA; DEWITT, 2011).

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}L}{k_f} \tag{20}$$

Kreider e Kreth (1981) indicam através da Fig. 33 a relação entre o número de Nusselt e o número de Rayleigh para escoamentos naturais em placas e cilindros verticais, ao qual pode se notar as faixas correspondentes aos regimes laminar, de transição e turbulento.

Figura 33 - Correlação entre número de Nusselt e número de Grashof



Fonte: Adaptado de Kreider e Kreth, 1981

O fenômeno geralmente é tratado através de duas abordagens, utilizando-se uma temperatura superficial constante como condição de contorno ou mesmo um fluxo de calor constante através da superfície (MARTYNENKO; KHRAMTSOV, 2005), através das condições de contorno expressas na Eq 21 e Eq. 22 para o primeiro caso e Eq. 21 e Eq. 23 para o segundo caso.

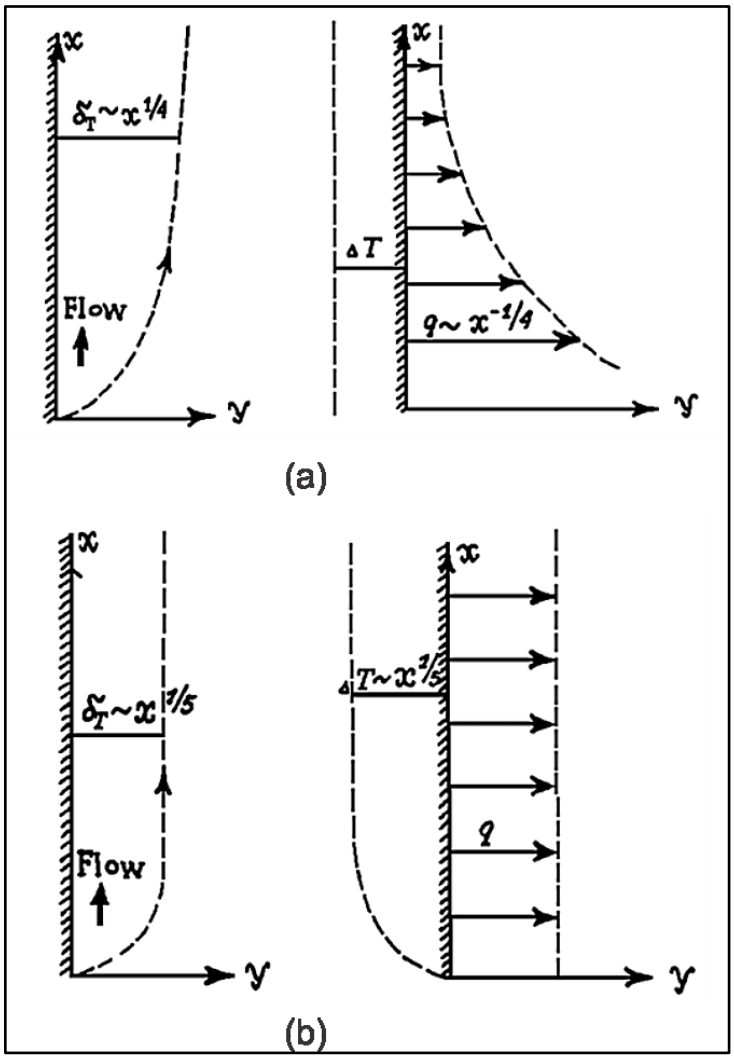
$$u(y,0) = v(y,0) = v(y, x \to \infty) = 0 \tag{21}$$

$$T(y,0) = T_0, T(y, x \to \infty) = T_\infty \tag{22}$$

$$-k\frac{\partial T}{\partial X}(y,0) = q_0, T(y, x \to \infty) = T_\infty \tag{23}$$

Tais abordagens possuem características distintas que influenciam diretamente a dinâmica do escoamento e o perfil das camadas limites térmica e hidrodinâmica como pode ser visto na Fig. 34.

Figura 34 – Abordagens de temperatura superficial constante (a) e fluxo de calor constante (b)



Fonte: Adaptado de Martynenko e Khramtsov, 2005

O tipo de abordagem possui, portanto, impacto sobre as deduções do número de Grashof e de Rayleigh, de tal forma que para a abordagem de temperatura superficial constante tem-se os adimensionais expressos como na Eq. 24 e Eq. 25 (MARTYNENKO; KHRAMTSOV, 2005).

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_0 - T_\infty)L^3}{\nu^2} \tag{24}$$

$$Ra_L = Gr_L Pr \tag{25}$$

Já para a abordagem de fluxo constante através da superfície, tem-se a Eq. 26 como o Grashof modificado e Eq. 27 para Rayleigh modificado.

$$Gr_L{}^* = \frac{g\beta q_0 L^4}{k\nu^2} \tag{26}$$

$$Ra_L{}^* = Gr_L{}^* Pr \tag{27}$$

Os números de Nusselt local e médio também sofrem variações de acordo com cada abordagem, sendo que, para o estudo de escoamento natural entre duas placas verticais tem-se as Eq. 28 e Eq. 29, sendo regidas pelos coeficientes da Tab. 2 (BERGMAN; LAVINE; INCROPERA; DEWITT, 2011).

$$\overline{Nu} = \left[\frac{C_1}{\left(Ra_L\frac{S}{L}\right)^2} + \frac{C_2}{\left(Ra_L\frac{S}{L}\right)^{\frac{1}{2}}}\right]^{-\frac{1}{2}} \tag{28}$$

$$Nu_L = \left[\frac{C_1}{Ra^*\frac{S}{L}} + \frac{C_2}{\left(Ra^*\frac{S}{L}\right)^{\frac{2}{5}}}\right]^{-\frac{1}{2}} \tag{29}$$

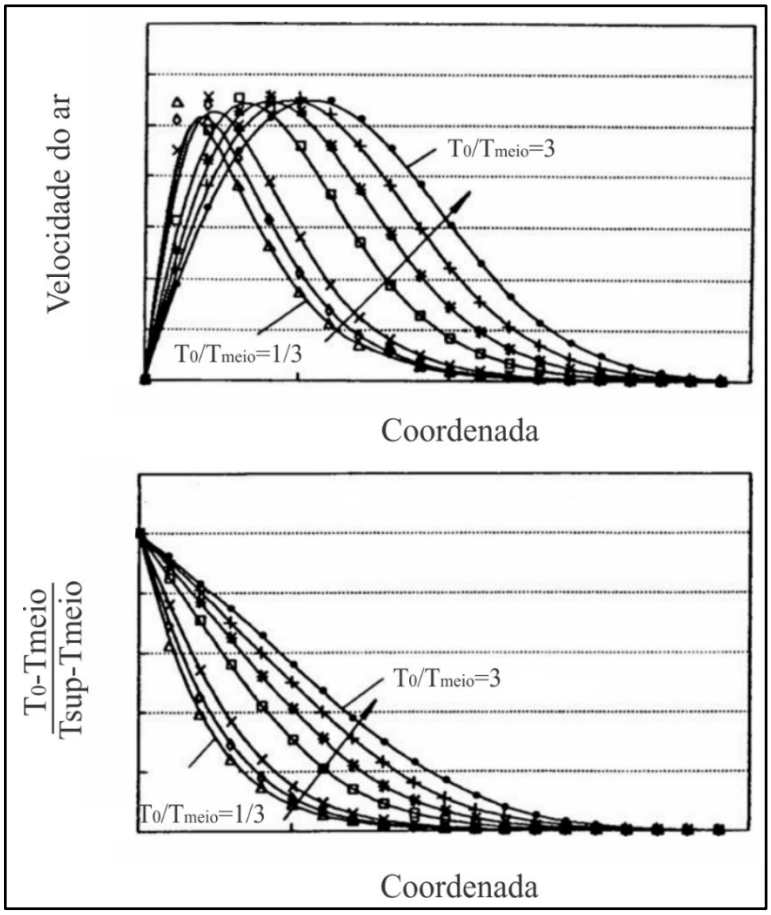
Tabela 2 - Coeficientes para Eq. 28 e Eq. 29

Condição	C1	C2
Simetria - Superfícies isotérmicas	576	2.87
Simetria - Superfícies com mesmo fluxo de calor constante	48	2.51
Superfície isotérmica / adiabática	144	2.87
Superfície fluxo de calor constante / adiabática	24	2.51

Fonte: Adaptado de Bergman, Lavine, Incropera e Dewitt, 2011

Shang (2006) ilustra a influência da relação T_0/Tmeio em um escoamento natural pela abordagem de temperatura superficial uniforme, revelando que além de intensificar o campo de velocidades, o aumento desta relação desloca o ponto de máxima velocidade para longe da superfície aquecida, resultando em gradientes de velocidade e temperatura com comportamento similar ao da Fig. 35.

Figura 35 – Gradientes de velocidade e temperatura para diversas relações entre temperatura da superfície e temperatura do meio



Fonte: Adaptado de Shang, 2006

Fica clara a extrema importância dos perfis de velocidade e temperatura, bem como das camadas limites viscosa, hidrodinâmica e térmica.

2.4 ESTUDOS DA ÁREA

Diversos autores que estiveram relacionados com estudos voltados para aquecimento e captação de energia solar, em um certo momento iniciaram estudos relacionados à ventilação utilizando princípios semelhantes. Desde então, muitos estudos numéricos e experimentais foram realizados ao longo dos anos, tanto para promover a ventilação, quanto o aquecimento dos ambientes.

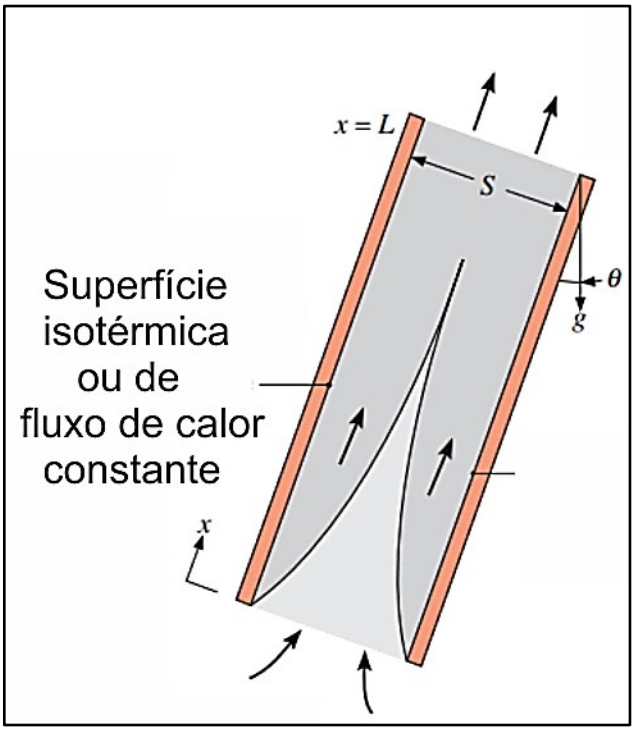
Para locais onde é necessário um aquecimento do ambiente, os autores procuram promover este aquecimento de forma controlada, já para locais onde é necessária a redução da carga térmica, os autores buscam promover a maior ventilação possível do ambiente, aproximando a temperatura do ambiente interno com a temperatura do ambiente externo (atmosférica).

Com este objetivo em mente, grande parte dos autores procuram estudar as influências da geometria, do fluxo de calor e dos gradientes térmicos na vazão mássica ou volumétrica do escoamento, bem como analisar as propriedades térmicas dos materiais e os comportamentos dos gradientes ao longo do dia. Diversos dispositivos foram propostos, alguns modelos de redes térmicas foram criados, bem como expressões analíticas que possam prever a vazão em função destas características.

Os dispositivos geralmente se baseiam em uma cavidade formada por superfícies planas, sendo que esta pode ser orientada verticalmente ou estar sujeita à uma inclinação “θ” conforme a Fig.36.

A cavidade possui uma certa altura “L” (no caso de dispositivos instalados no telhado), uma certa largura “B” e uma certa profundidade dada pela dimensão “S”. Entretanto, é comum tratar o problema como um escoamento bidimensional, portanto a largura “B” normalmente não é considerada.

Figura 36 – nomenclaturas para uma cavidade genérica sujeita à escoamento natural



Fonte: Adaptado de Bergman, Lavine, Incropera e Dewitt, 2011

A relação entre a profundidade e a altura da cavidade "(S/L)" é conhecida como relação *gap-to-heigh*, e sua grandeza inversa, como *aspect ratio*.

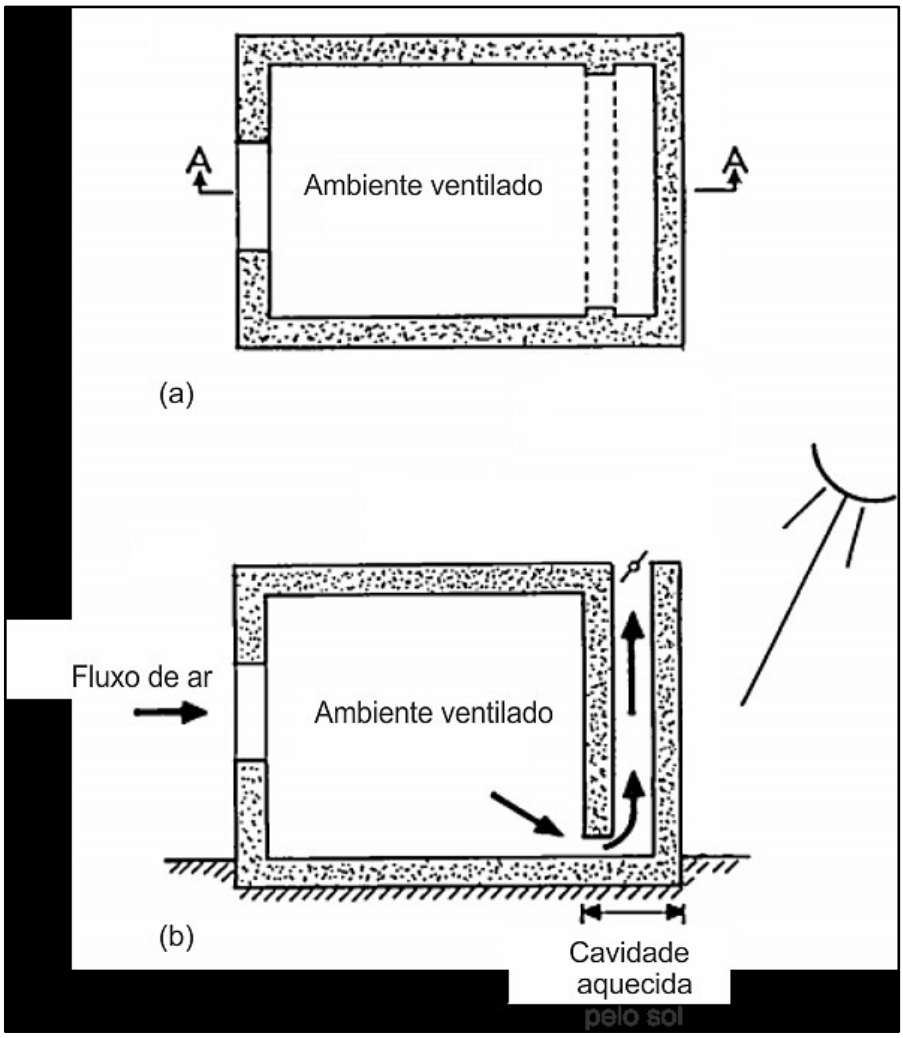
2.4.1 Principais grupos de pesquisa

Ammar Bouchair desenvolveu um estudo teórico incialmente avaliando a influência do ângulo azimutal de uma chaminé solar em seu desempenho e capacidade de captação de energia (BOUCHAIR; FITZGERALD, 1988). O direcionamento para o noroeste, oeste, sudoeste, sul e sudeste foram levados em consideração na análise, concluindo-se que o ângulo azimutal possui uma forte influência sobre a quantidade de calor coletado, e que, para uma latitude de 33° ao norte, a orientação para oeste é extremamente interessante, uma vez que o modelo indicou os maiores níveis de captação de energia solar, ultrapassando até mesmo os resultados da configuração voltada para o sul.

A evolução do trabalho levou o autor a publicar um outro artigo em 1994 (BOUCHAIR, 1994). Neste, o autor analisou experimentalmente e teoricamente as influências da variação da profundidade, variação de temperatura, variação da altura da entrada de ar, e consequentemente sua área. Para tal, utilizou-se uma chaminé solar em real escala (vide Fig. 37) submetida à

regime permanente, a qual foi instrumentada de tal forma que a velocidade e a temperatura pudessem ser aferidas.

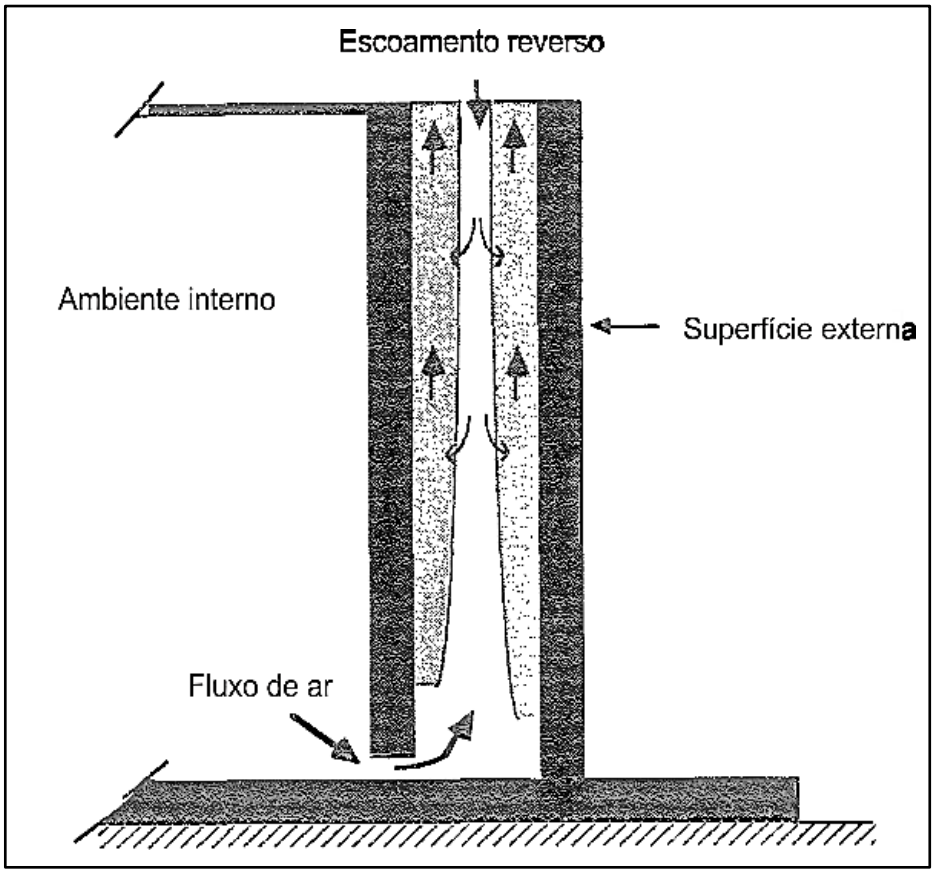
Figura 37 – Chaminé solar estudada por Bouchair em 1994, planta (a) e vista lateral (b)



Fonte: Adaptado de Bouchair, 1994

Concluiu-se através deste estudo que o aumento da profundidade da cavidade é benéfico para o aumento da vazão mássica, porém este aumento ocorre até uma certa relação *gap-to-height*, sendo que acima de um determinado valor, o escoamento tende a sofrer uma alteração de direção, revertendo-se próximo a saída de ar da cavidade, e assim, fazendo com que o aumento da profundidade a partir deste limiar, prejudique o escoamento. Tal efeito ficou conhecido na literatura como *reverse flow* ou *back flow*, ao qual será colocado aqui neste trabalho como escoamento reverso, sendo retratado pelo autor segundo a Fig. 38. Levando este efeito em consideração, foi encontrada uma profundidade ótima, equivalente à 10% da altura da cavidade (relação *gap-to-height* ótima equivalente à 1/10).

Figura 38 - Escoamento reverso



Fonte: Adaptado de Bouchair, 1994

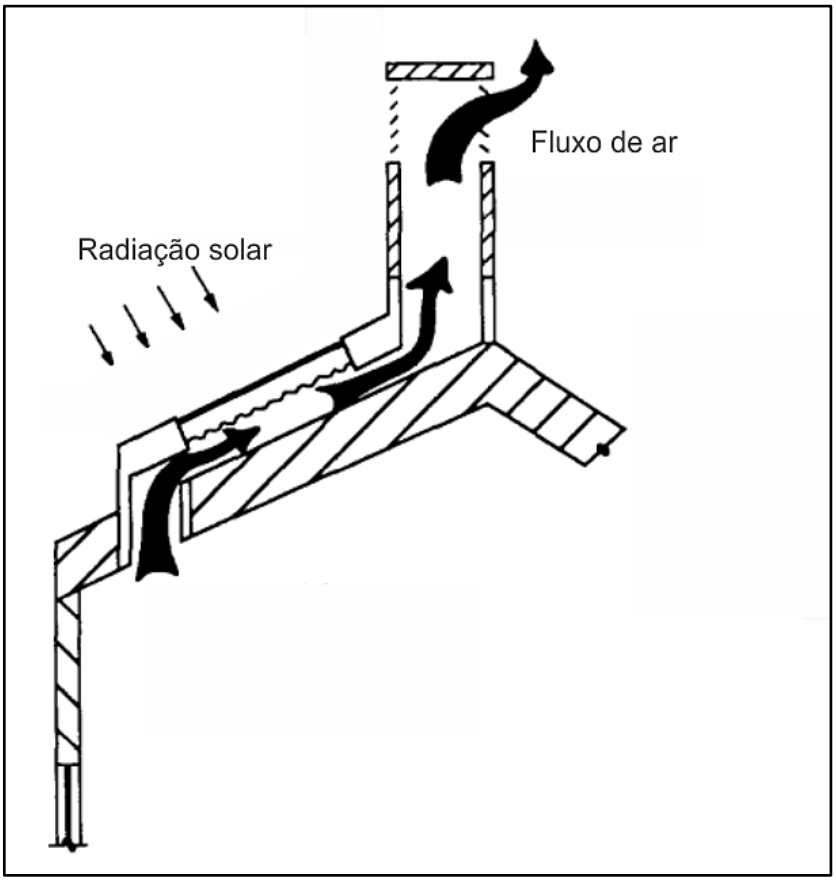
Concluiu-se também que, a redução da perda de carga da cavidade, que surge ao se aumentar a profundidade da mesma, revela e intensifica a perda de carga da área de entrada do ar sobre o escoamento em geral, tornando-se uma espécie de "gargalo" para a vazão mássica, sendo necessário o aumento da área de entrada para chaminés com maiores profundidades.

Os estudos levantados por Ammar Bouchair são provavelmente os primeiros voltados para a ventilação com uma chaminé solar, sendo citados em diversos outros artigos posteriormente publicados. Praticamente na mesma época, um outro grupo de pesquisadores, situados na Índia, que estavam voltados para estudos de dispositivos de captação de energia solar (BANSAL; RAM; SINGH, 1984) começaram a estudar o potencial da ventilação por chaminé solar.

Bansal, Mathur e Bhandari (1993) desenvolveram um modelo matemático com o intuito de se estudar a influência de diferentes áreas de abertura e coeficientes de descarga, bem como as variações de temperatura do ambiente e da incidência de radiação solar. A chaminé solar utilizada possuía uma inclinação de 30° (em relação à horizontal conforme Fig. 39) e revelou que o aumento da incidência de radiação solar gera um aumento da vazão volumétrica escoada

pela chaminé, assim como ocorre também com o aumento da temperatura do ambiente externo e o aumento do coeficiente de descarga (BANSAL; MATHUR; BHANDARI, 1993).

Figura 39 – Chaminé solar de telhado estudada em 1993



Fonte: Adaptado de Bansal, Mathur e Bhandari, 1993

Desta forma, o estudo levantado indicou que uma chaminé de apenas 2,25 m² é capaz de gerar entre 140 m^3h^{-1} e 330 m^3h^{-1}, quando exposta à uma incidência entre 100 Wm^{-2} e 1000 Wm^{-2}. Por fim, o desempenho do dispositivo se apresentou fortemente dependente dos parâmetros construtivos como geometria do coletor, área transversal da cavidade e das grandezas envolvidas na transmissão de calor entre os componentes e o fluido.

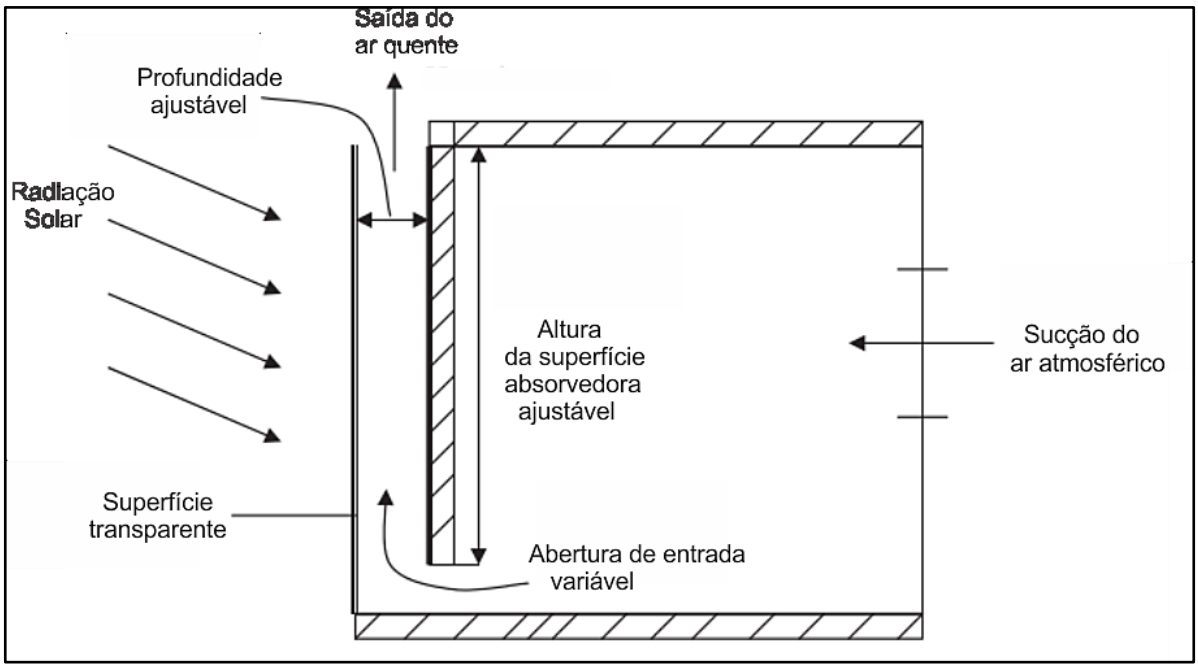
No ano seguinte, Rajesh Mathur, orientado por Bansal, conclui sua tese de doutorado, voltada especificamente para a ventilação utilizando dispositivos solares. Em seu trabalho, o dispositivo pôde induzir uma ventilação entre 150 m^3h^{-1} e 200 m^3h^{-1} utilizando um coletor de apenas 1 m² de área, sujeito à uma incidência de 800 Wm^{-2} (MATHUR, 1994).

Em 1999, o autor publica uma revisão de algumas das aplicações solares desenvolvidas na Índia, parte delas de própria autoria (BANSAL, 1999). No que tange respeito a este trabalho,

Bansal comenta brevemente sobre as recentes descobertas na época com relação ao aquecimento de ambientes através de telhados com chaminés solares inclinadas, ou mesmo paredes com chaminés solares verticais.

Posteriormente, sugeriram um modelo matemático para uma chaminé solar vertical baseada em vidro conforme a Fig. 40 (BANSAL; MATHUR; MATHUR; JAIN, 2005). A proposição dos autores é de que em climas quentes, quando não há a necessidade de se utilizar as janelas de um cômodo, as mesmas podem receber pequenas variações para acomodar uma chaminé solar, que auxiliaria na ventilação durante este período.

Figura 40 – Chaminé solar estudada em 2005



Fonte: Adaptado de Bansal, Mathur, Mathur e Jain, 2005

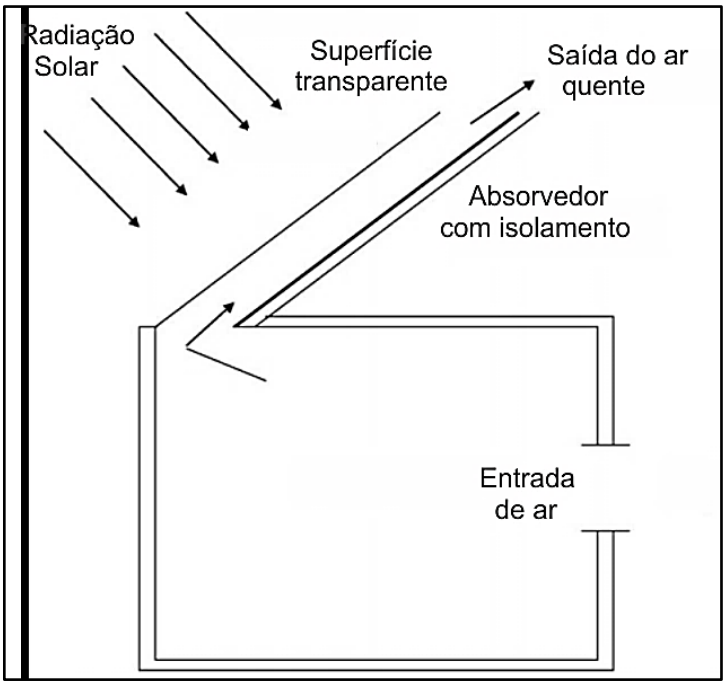
Os autores levaram em consideração um sistema em regime permanente, com transmissão de calor unidirecional, escoamento em regime laminar e desprezaram as perdas por atrito devido à baixa velocidade induzida. O modelo foi validado através de um experimento, o qual revelou que as temperaturas do vidro e do ar são subestimadas pelo modelo matemático, ou seja, parte da radiação solar interage com o vidro e com o ar, elevando a temperatura dos mesmos, como consequência disto, a temperatura da placa metálica colocada na superfície oposta da cavidade, se apresenta como menor se comparada com a previsão do modelo. De qualquer modo, o modelo aderiu bem aos resultados experimentais e poderia ser empregado na análise de chaminés de pequeno porte.

O grupo de autores chegou ainda a publicar dois trabalhos em 2006, analisando uma chaminé solar vertical (MATHUR; BANSAL; MATHUR; JAIN; ANUPMA, 2006) e uma chaminé solar inclinada (MATHUR; MATHUR; ANUPMA, 2006), a qual representaria uma chaminé instalada em um telhado conforme Fig. 41. Ambos os trabalhos cobriram partes experimentais e modelagem matemática.

Na análise da chaminé vertical, foram utilizadas condições extremamente similares aos do trabalho anterior ilustrado na Fig. 40. O dispositivo sofreu variações geométricas para que as influências da profundidade da cavidade e da área de entrada pudessem ser analisadas, bem como a influência da incidência de radiação sobre a vazão. Com os resultados, pôde-se comprovar que, o aumento da profundidade evita a restrição do escoamento, e consequentemente das camadas limites, favorecendo o escoamento e indicando uma vazão maior de ventilação. Os autores também puderam comprovar que o aumento da incidência de radiação gera um aumento de vazão, confirmando o observado em Bansal, Mathur e Bhandari (1993), o qual foi descrito pelos autores como uma relação linear.

Neste mesmo trabalho, o dispositivo pôde atingir uma vazão máxima equivalente à cerca de 5,6 trocas de ar por hora (*ACH - Air Change per Hour*) correspondente para um ambiente de 27 m² (151,2 m^3h^{-1}) e uma chaminé com relação *gap-to-height* equivalente a 3/10 sujeita a uma radiação de 700 Wm^{-2}.

Figura 41 – Chaminé solar estudada em 2006



Fonte: Adaptado de Mathur, Mathur e Anupma, 2006

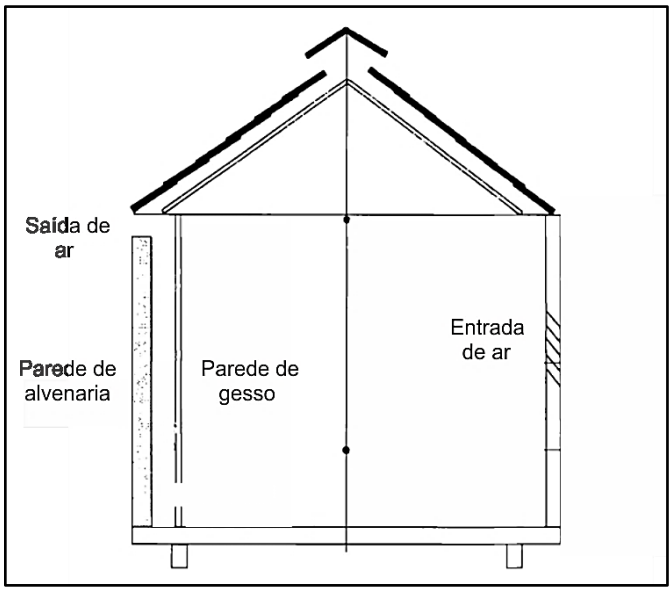
Já no estudo da chaminé inclinada, os autores puderam discorrer e desenvolver uma solução analítica acerca do ângulo ótimo para o coletor, ao qual comentaram ser dependente da latitude onde o dispositivo se encontra.

Para o local do experimento (Jaipur na Índia), com latitude de 27° ao norte, foi identificado um ângulo ótimo de 45°, o qual forneceu uma vazão 10% superior às condições de 30° e 60°. Mais uma vez os autores puderam evidenciar o aumento da vazão conforme o aumento da profundidade, bem como com o aumento da área de entrada da cavidade.

De certa forma, este grupo de pesquisadores da Índia conseguiu evidenciar diversas características primordiais na dinâmica e comportamento da chaminé solar, mas principalmente, ao longo dos anos, seus trabalhos puderam estimular outros grupos ao desenvolvimento desde tipo de dispositivo, como por exemplo um outro grupo de pesquisadores situados na Tailândia. Tal grupo pôde avaliar em 1998 uma parede Trombe modificada com 2 metros de altura conforme a Fig. 42 (KHEDARI; LERTSATITTHANAKORN; PRATINTHONG; HIRUNLABH, 1998), tanto em uma configuração ventilada, quanto sem ventilação.

Na situação ventilada, os resultados apresentados mostraram o aumento de vazão com o aumento da profundidade da cavidade, retornando a maior vazão para a configuração com maior profundidade, de 140 milímetros. Descobriu-se também que, o fato de a parede de alvenaria ser pintada de preto (a qual possui maior absortividade) também propiciou uma indução maior de vazão quando comparada com os resultados da parede pintada de branco.

Figura 42 – Ambiente com parede Trombe estudado em 1998



Fonte: Adaptado de Khedari, Lertsatitthanakorn, Pratinthong e Hirunlabh, 1998

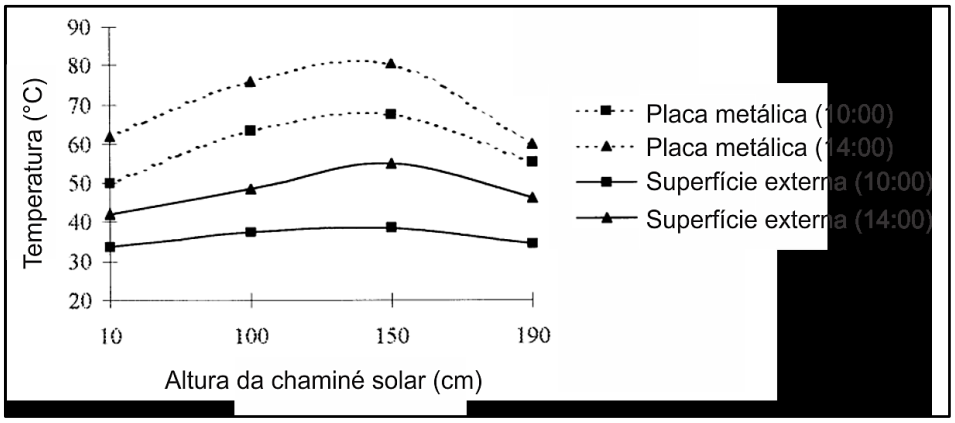
A parede Trombe modificada gerou uma redução de temperatura do ambiente interno quando ventilada, provando sua capacidade em reduzir até 75% o ganho de calor pelo ambiente, e se mostrando ser um ótimo isolante térmico para o ambiente. O autor indica ainda que a maior temperatura do ambiente foi identificada como sendo a temperatura no topo do ambiente interno, o que de fato é de se esperar, pois a carga térmica tende a se acumular na parte superior devido ao empuxo térmico natural.

Em 1999, este grupo utilizou um conceito semelhante a parede de Trombe, empregando um vidro como superfície externa (HIRUNLABH; KONGDUANG; NAMPRAKAI; KHEDARI, 1999). O dispositivo era capaz de ter sua profundidade e altura variadas (entre 1 metro e 2 metros), bastando apenas algumas pequenas modificações no aparato. A parte experimental foi realizada das 8 horas da manhã até 17 horas da tarde, coletando assim, a variação de incidência de radiação solar ao longo do dia.

Os autores também desenvolveram um modelo numérico utilizando condições como regime permanente, céu como corpo negro sujeito à certa temperatura, desprezando absorções de energia pela superfície de vidro e assumindo que as propriedades dos materiais, como a condução de calor, permaneceriam constantes em função da temperatura.

Foi identificado que a temperatura da placa metálica, presente na superfície oposta ao vidro, aumenta de acordo com o aumento da altura do dispositivo ou mesmo com a redução da profundidade, o que indica que a transmissão de calor entre as superfícies se acentua conforme um menor volume de ar na cavidade necessita ser aquecido. O autor relata também uma temperatura menor próximo às aberturas superior e inferior do dispositivo em virtude da convecção com os ambientes interno e externo, de tal forma que o gradiente de temperatura ao longo da altura do dispositivo se revelou conforme a Fig 43.

Figura 43 - Gradiente de temperatura ao longo da altura da chaminé estudada em 1999



Fonte: Adaptado de Hirunlabh, Kongduang, Namprakai e Khedari, 1999

A vazão por outro lado, sofreu um aumento de acordo com o aumento da profundidade da cavidade ou mesmo com o aumento da altura do aparato, sendo que o melhor arranjo encontrado mostrou ser o de relação *gap-to-height* equivalente a 145/2000, fornecendo uma ventilação com vazão mássica entre 0,01 $kg.s^{-1}$ e 0,02 $kg.s^{-1}$.

O modelo numérico proposto demostrou boa aderência com os resultados experimentais, apresentando desvio máximo de 10%.

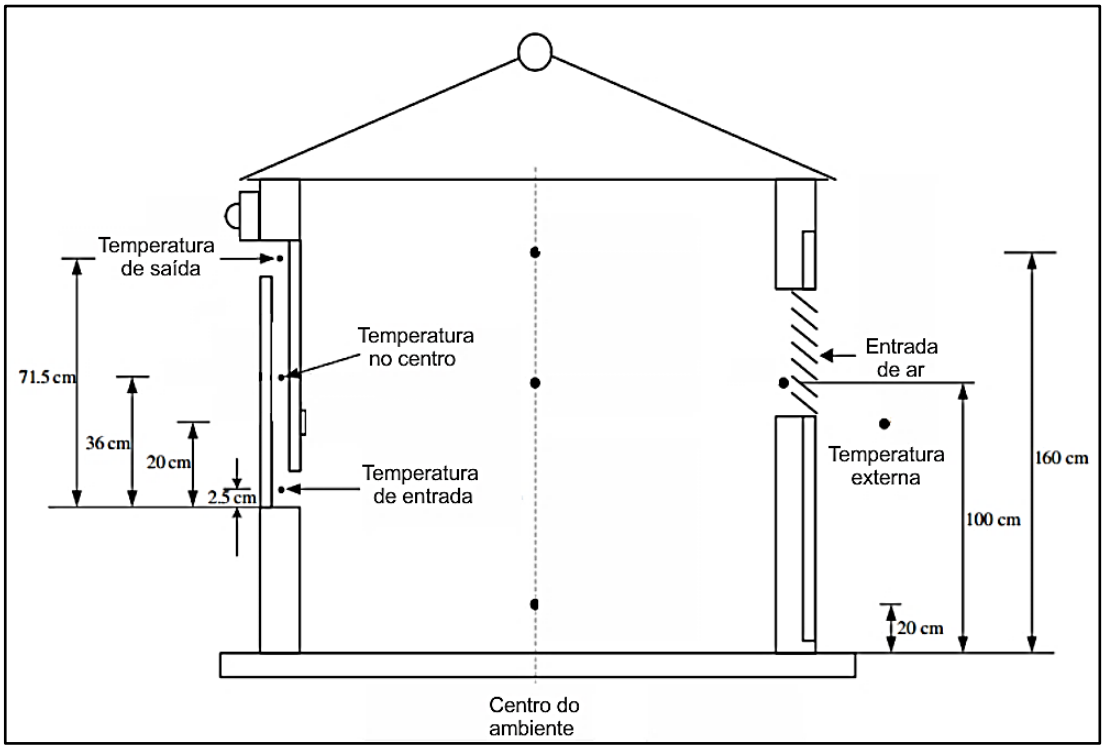
A evolução nos estudos dos autores se mostra clara com a publicação no ano de 2000, onde na ocasião, estudaram-se experimentalmente dois tipos de chaminé solar, implementadas em paredes ou implementadas em telhados (disposta por um ângulo de inclinação).

Tais chaminés foram empregadas em uma sala de 25m³, mostrando que, o simples fato de as chaminés entrarem em operação, gera uma aproximação entre a temperatura do ambiente interno e a temperatura do ambiente externo (atmosférica), indicando um grande potencial à solução de conforto térmico (KHEDARI; BOONSRI; HIRUNLABH, 2000).

Os autores colocam ainda que a diferença entre as temperaturas interna e externa resultaram em 6°C para o ambiente não ventilado, 4°C para o ambiente com circulação de ar através de janelas e portas, e por fim, 3°C com a utilização das chaminés, indicando que o uso de chaminés solares pode ser mais benéfico que uma simples ventilação por janelas e portas. Entretanto, é citada claramente a necessidade de se obter uma maior velocidade ao redor dos ocupantes do ambiente interno, a fim de se gerar um conforto térmico adequado.

Em 2006, o grupo levou adiante o conceito de chaminés solares, desta vez implementando-as em janelas através da utilização de dois vidros paralelos conforme Fig 44.

Figura 44 – Chaminé solar proposta em 2006

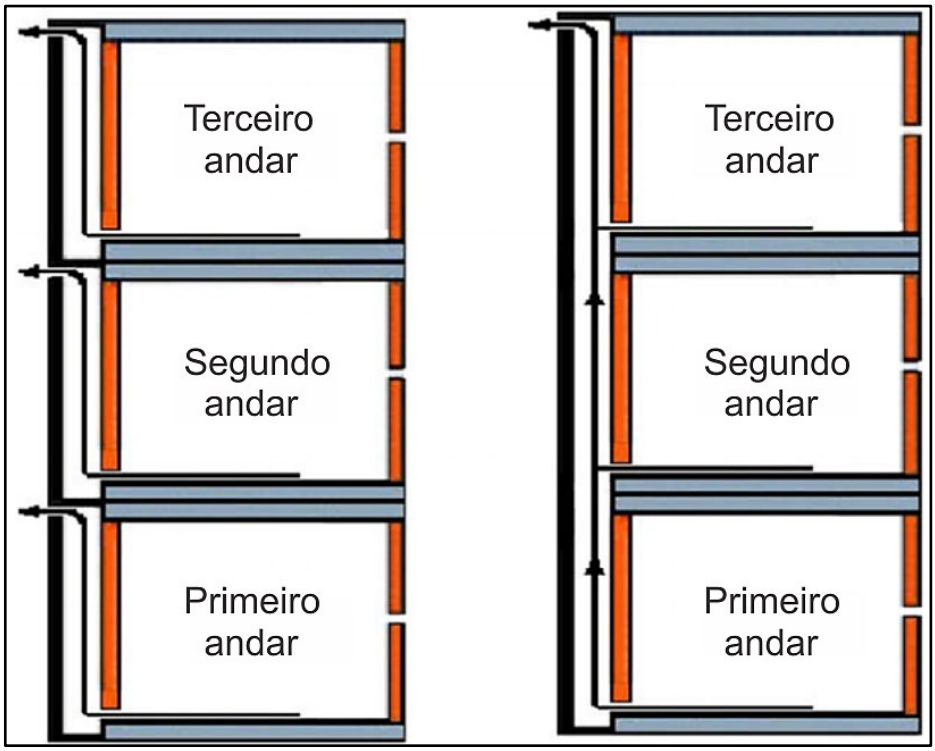


Fonte: Adaptado de Chantawong, Hirunlabh, Zeghmati, Khedari, Teekasap e Win, 2006

Desta forma, os autores puderam comparar uma janela com vidro único e uma janela com vidro duplo em um arranjo similar à chaminé solar, evidenciando que, além de promover ventilação para o ambiente, a configuração é capaz de agir como um isolante, reduzindo a entrada de calor através da janela. De qualquer modo, os autores recomendaram fortemente a utilização deste tipo de chaminé solar em conjunto com outros tipos, operando em conjunto e assim garantindo conforto térmico para os ocupantes (CHANTAWONG; HIRUNLABH; ZEGHMATI; KHEDARI; TEEKASAP; WIN, 2006).

Pode-se perceber que, o grupo de pesquisadores tailandeses possuíam um foco voltado para as aplicações da chaminé solar, tornando a chaminé não somente um conceito, mas sim avaliando diretamente as condições onde poderiam ser empregadas e sua viabilidade. Tal fato se repercute também na publicação de 2009, onde idealizaram a implementação do conceito entre os andares de um prédio. Para tal, os autores utilizaram-se de um modelo em escala de um prédio de 3 andares, analisando experimentalmente um cenário de um prédio convencional (sem ventilação por chaminé solar), bem como duas configurações possíveis de chaminés inseridas no prédio, de acordo com a Fig. 45.

Figura 45 – Cenários estudados em 2009



Fonte: Adaptado de Punyasompun, Hirunlabh, Khedari e Zeghmati, 2009

Foi identificado que o modelo com chaminé solar, ao contrário do modelo de prédio convencional, apresentou uma diferença de temperatura de até 5°C entre os andares. Ao se comparar os dois modelos de chaminé, a chaminé com apenas uma saída obteve melhor desempenho, visto que a diferença de temperatura entre os andares e o ambiente externo foi indicada como sendo menor.

A maior temperatura encontrada nos experimentos foi no último andar, porém a maior diferença entre temperatura do ambiente interno e do ambiente externo foi vista no primeiro andar. Além disso, como previsto, o terceiro andar obteve a maior vazão (PUNYASOMPUN; HIRUNLABH; KHEDARI; ZEGHMATI, 2009).

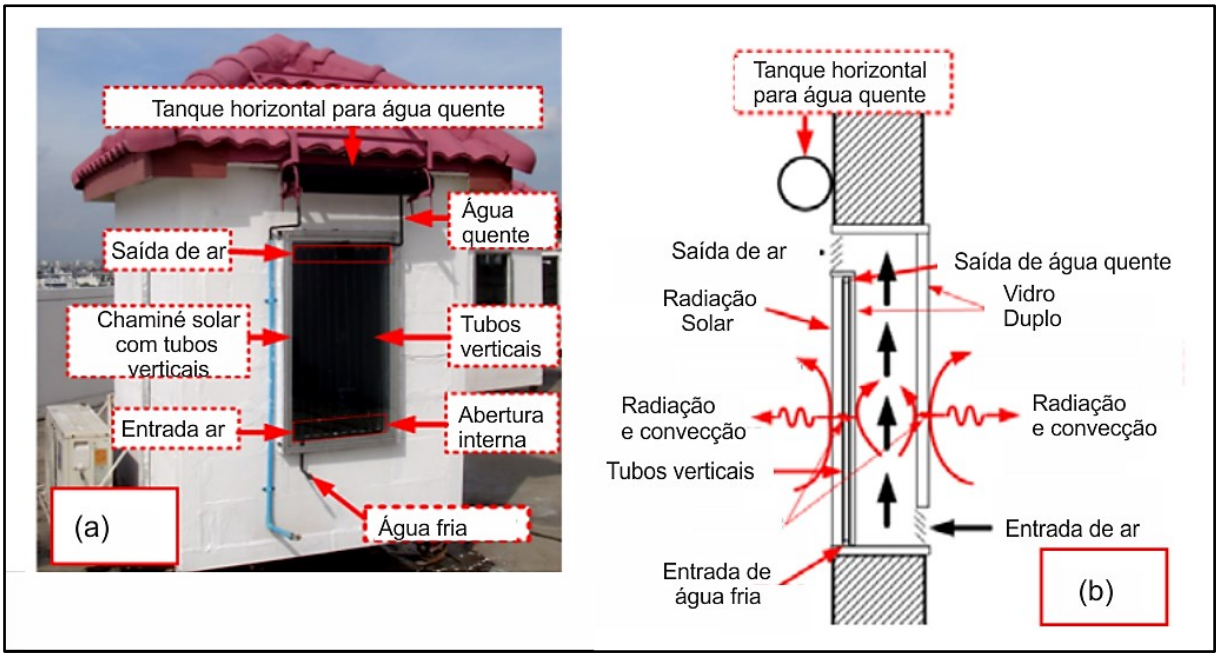
Os autores levantaram ainda um modelo matemático desenvolvido em base de analogias elétricas, o qual aderiu razoavelmente bem aos resultados experimentais, podendo ser aplicado para este tipo de configuração.

Recentemente, o grupo desenvolveu estudos experimentais utilizando sistemas combinados, como por exemplo o uso de uma chaminé solar baseada em vidro juntamente com um sistema de aquecimento de água (CHANTAWONG, 2017a), no qual um aparato foi desenvolvido para que se avaliasse a viabilidade de obter água aquecida e ventilação do

ambiente interno em momentos onde a incidência direta de luz através de uma janela não é desejada.

O dispositivo, como ilustrado na Fig 46, possuía dois vidros paralelos, formando uma cavidade entre eles, a qual era destinada ao escoamento de ar através de duas aberturas similares às de uma chaminé solar. De maneira análoga, tubos verticais formavam uma configuração similar de coletores solares para aquecimento doméstico de água, sendo inseridos paralelamente à um dos vidros.

Figura 46 – Chaminé solar estudada em 2017



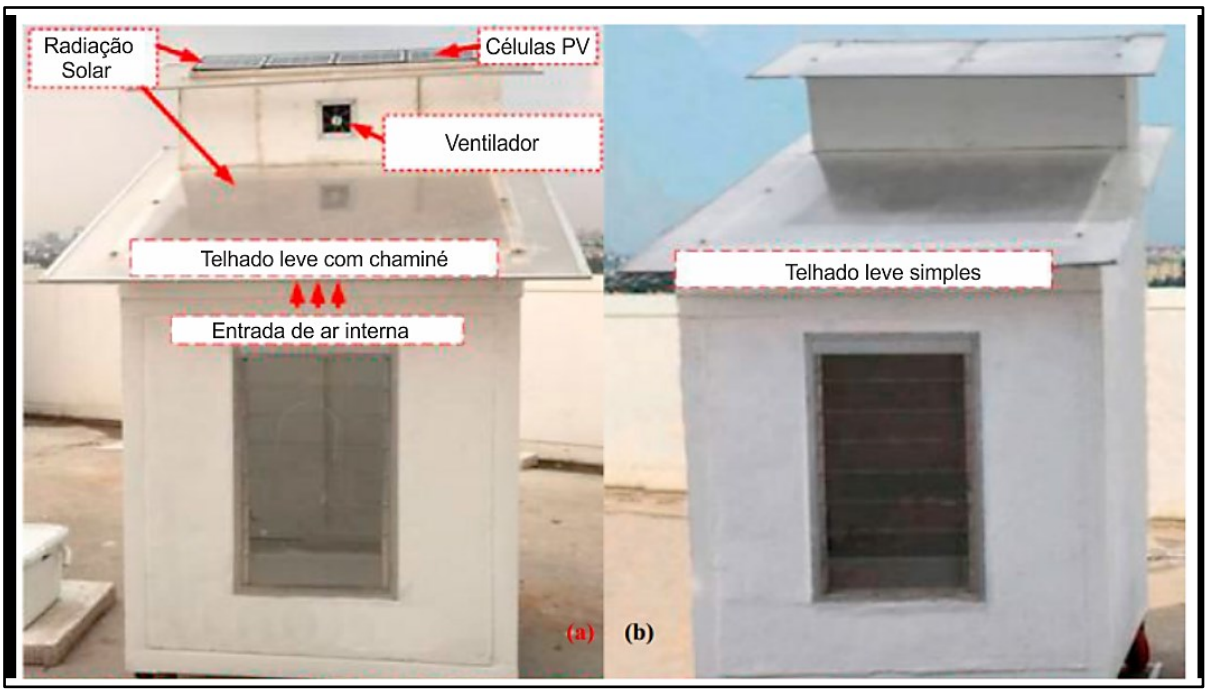
Fonte: Adaptado de Chantawong, 2017a

Os autores concluíram que a utilização da chaminé solar baseada em duplo vidro gerou uma redução da temperatura do ambiente, fornecendo uma circulação de até 0,58 $m.s^{-1}$ maior ao se compará-la com o cenário de um único vidro como janela, além disso, embora a luminosidade tenha se mantido semelhante para os dois cenários, uma redução de ganho de calor pelo ambiente foi notada, comprovando o fenômeno observado em Chantawong, Hirunlabh, Zeghmati, Khedari, Teekasap e Win (2006). Já para o sistema de aquecimento de água, os autores colocam que o sistema pôde aquecer a água suficientemente para as atividades domésticas, sendo que durante os testes as temperaturas do coletor oscilaram entre 35°C e 49°C.

Os autores fizeram uma comparação em outro trabalho recente entre um telhado leve simples e uma chaminé solar para telhados assistida por um ventilador, o qual era acionado por painéis fotovoltaicos conforme Fig. 47 (CHANTAWONG, 2017b). Os resultados mostraram

que a temperatura do ambiente interno, bem como o ganho de calor foram reduzidos ao se utilizar a chaminé proposta, entretanto, é interessante ressaltar que o autor cita a diferença de temperatura entre os dois modelos em uma faixa de 0,5°C à 2°C, o que é questionável, uma vez que a incerteza dos termopares utilizados no experimento era de ± 0,5°C.

Figura 47 – Conceitos estudados em 2017



Fonte: Adaptado de Chantawong, 2017b

Ainda no ano de 2017, este grupo de pesquisadores publicou um estudo acerca da implementação de acumuladores térmicos do tipo PCM (*phase change material*) em paredes solares. O dispositivo foi capaz de acumular a energia proveniente do sol, aumentando ligeiramente a inércia térmica do conjunto, assim, os resultados mostram que a utilização de cera de parafina como acumulador levou à uma redução da temperatura do ambiente interno, reduzindo o ganho de calor pelo ambiente e intensificando a ventilação de ar do mesmo (THANTONG; CHANTAWONG, 2017).

Através destes estudos, o grupo de pesquisadores Tailandeses deram um passo no desenvolvimento dos dispositivos de ventilação solar, ao avaliarem não somente os aspectos geométricos e construtivos, mas também discorrerem sobre as oportunidades ao longo de anos.

Fica nítido que, o conhecimento acumulado no passado sobre captação de energia solar e aquecimento de ambientes através de paredes Trombe levou diversos autores ao estudo voltado para a ventilação solar.

Guohui Gan é um exemplo disto, seu trabalho publicado em 1998 seguiu a linha de diversos trabalhos realizados juntamente com Hazim Awbi, discorrendo sobre o uso de paredes Trombe não para aquecimento, mas em um arranjo para a indução de ventilação em ambientes. Para tal, o autor realizou uma simulação numérica com o intuito de se avaliar as influências de parâmetros como profundidade da cavidade, altura, tipo de vidros e isolamentos no desempenho do dispositivo disposto (GAN, 1998).

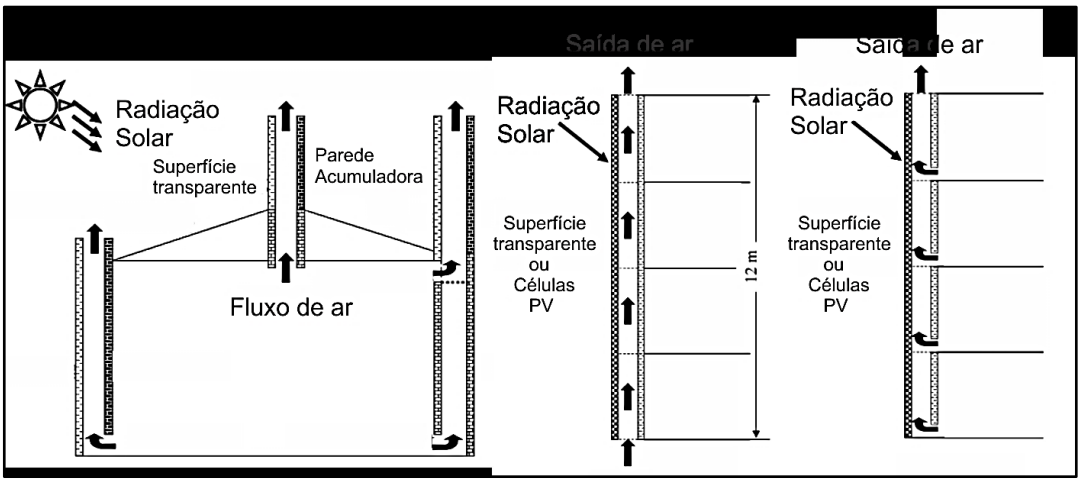
Os resultados mostraram que o aumento da profundidade gera uma redução da perda de carga distribuída ao longo da cavidade, entretanto, para uma pequena área de entrada de ar, o aumento da profundidade não provoca alterações na vazão escoada, uma vez que a perda de carga do sistema é fortemente dependente das perdas de carga singulares proveniente das aberturas da cavidade. Uma forma de corrigir isto foi notada ao se aumentar tanto a profundidade quanto a área de entrada da cavidade, reduzindo a perda de carga como um todo.

Observou-se também que, o aumento de vazão mássica acarreta um aumento de intensidade da convecção na cavidade, o que reduz a temperatura das superfícies e consequentemente, o empuxo térmico.

Assim como em outros grupos de pesquisa, identificou-se através deste trabalho, um aumento de vazão mássica e das temperaturas médias das superfícies conforme a intensidade do calor imposto no dispositivo. Por fim, o autor relata que, em uma aplicação que necessite apenas de ventilação por exaustão, o uso de isolamento térmico na parede oposta é imprescindível, sendo melhor recomendado para estes casos, a utilização de uma chaminé solar.

Em um trabalho seguinte (GAN, 2006), Gan discorre sobre um estudo numérico voltado para chaminés solares verticais em diversas configurações conforme ilustrado na Fig 48.

Figura 48 – Configurações estudadas em 2006

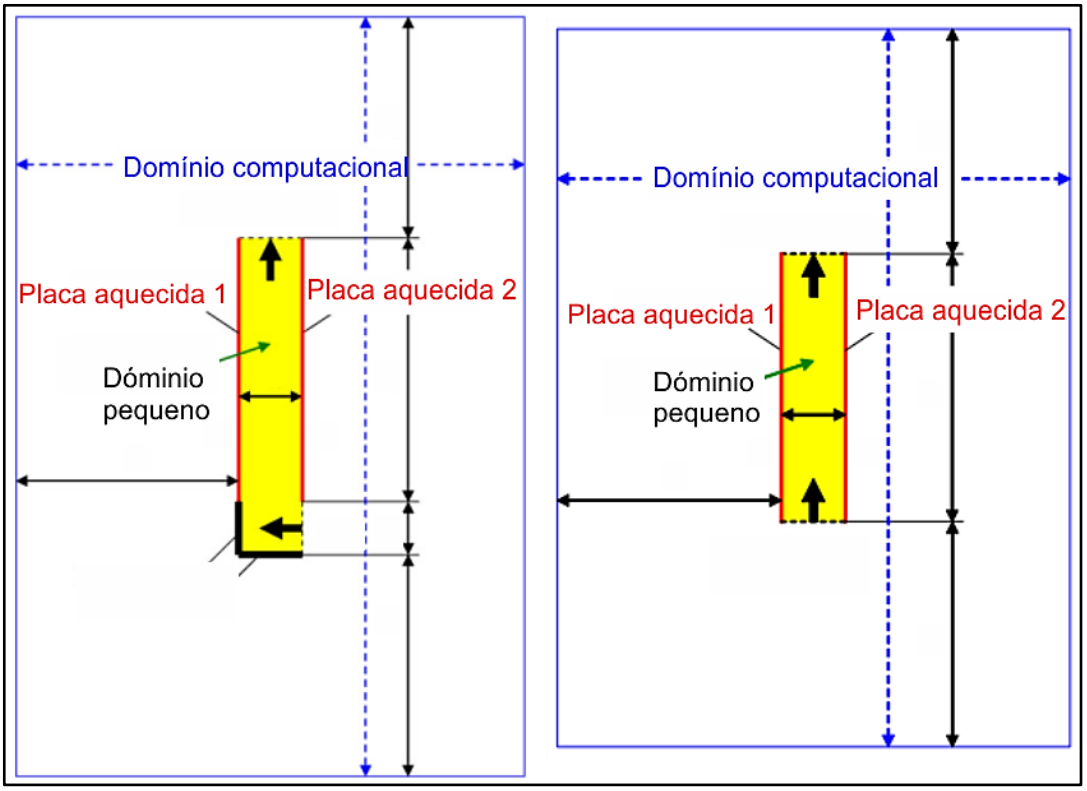


Fonte: Adaptado de Gan, 2006

O autor relata que o aumento da profundidade induz um aumento na vazão até um certo limite, comprovando as observações de (BOUCHAIR, 1994). No caso, para as chaminés verticais de única entrada, o aumento da profundidade acima deste limite resultou em uma redução de vazão, já para a chaminé implementada em múltiplos andares, o aumento acima do limite não gerou variação da vazão. Partindo destas observações, o autor foi capaz de identificar uma relação de *gap-to-height* ótima para os arranjos, retornando uma relação de 550/6000 a 600/6000 para as chaminés verticais de única entrada e de 700/12000 para a chaminé solar de múltiplas entradas (múltiplos andares).

Em 2010, Gan publica dois artigos analisando a influência do domínio computacional na análise de sistemas de escoamento natural. Desta forma, o autor pôde analisar a configuração de uma chaminé solar vertical cuja entrada era disposta na vertical (GAN, 2010a) ou na horizontal (GAN, 2010b), bem como a influência de um domínio computacional pequeno (somente a cavidade da chaminé) ou grande (cavidade da chaminé e ambiente ao redor), de acordo com a Fig. 49.

Figura 49 – Domínios e configurações estudadas em 2010



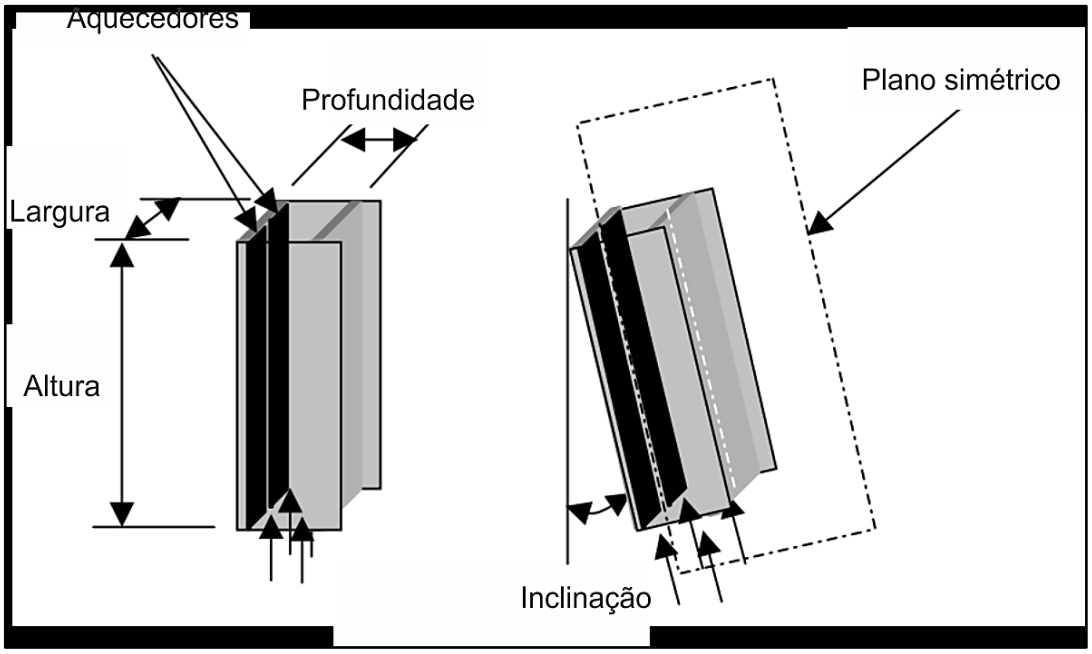
Fonte: Adaptado de Gan, 2010a e Gan, 2010b

Uma análise da distribuição de calor ao longo da cavidade foi realizada, ao qual chegou-se na conclusão de que uma boa distribuição reflete à um aumento de vazão, independentemente da geometria de entrada. Entretanto, a configuração com entrada horizontal revelou-se ser capaz de provocar uma assimetria da distribuição de calor, gerando um aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção, sendo para estes casos recomendado a utilização de um domínio maior (que contemple a análise da cavidade e do ambiente).

Dentre todas as simulações, pôde-se notar que a entrada horizontal possui grande perda de carga, reduzindo a vazão mássica escoada na cavidade, sendo assim preferível a configuração com entrada vertical.

As simulações e levantamentos teóricos do grupo britânico se baseiam em diversos trabalhos experimentais, utilizando-os como forma de validação do modelo. Fica clara, a extrema importância de se ter um trabalho experimental que contemple diversas variações e configurações do dispositivo, bem como as situações climáticas e de incidência de radiação solar. Neste âmbito pode-se citar os trabalhos experimentais realizados em parceria por pesquisadores australianos e chineses, que analisaram experimentalmente uma chaminé solar em 2003 (CHEN; BANDOPADHAYAY; HALLDORSSON; BYRJALSEN; HEISELBERG; LI, 2003). O dispositivo possibilitava alterações na profundidade da cavidade e em sua inclinação (vide Fig. 50), sendo submetido à diversas intensidades de calor.

Figura 50 – Chaminé solar com variações geométricas estudada em 2003



Fonte: Adaptado de Chen, Bandopadhayay, Halldorsson, Byrjalsen, Heiselberg e Li, 2003

Os resultados evidenciaram um aumento da temperatura próximo de ambas as superfícies da cavidade, sendo atrelado pelo autor à radiação emitida de uma superfície para a outra, assim como comentado anteriormente por outros autores na literatura (MOSHFEGH; SANDBERG, 1996)(MOSHFEGH; SANDBERG, 1998).

O aumento de intensidade de calor imposto no dispositivo repercutiu em um aumento linear de vazão na cavidade, correspondendo com o que fora encontrado por Mathur, Bansal, Mathur, Jain e Anupma (2006). Já o gradiente de temperatura ao longo da altura do dispositivo se mostrou ser similar ao observado por Hirunlabh, Kongduang, Namprakai e Khedari (1999), possuindo um pico máximo de temperatura próximo a metade da altura da chaminé e temperaturas menores próximas das aberturas da cavidade, indicando que nessas regiões o coeficiente de transmissão de calor por convecção é acentuado.

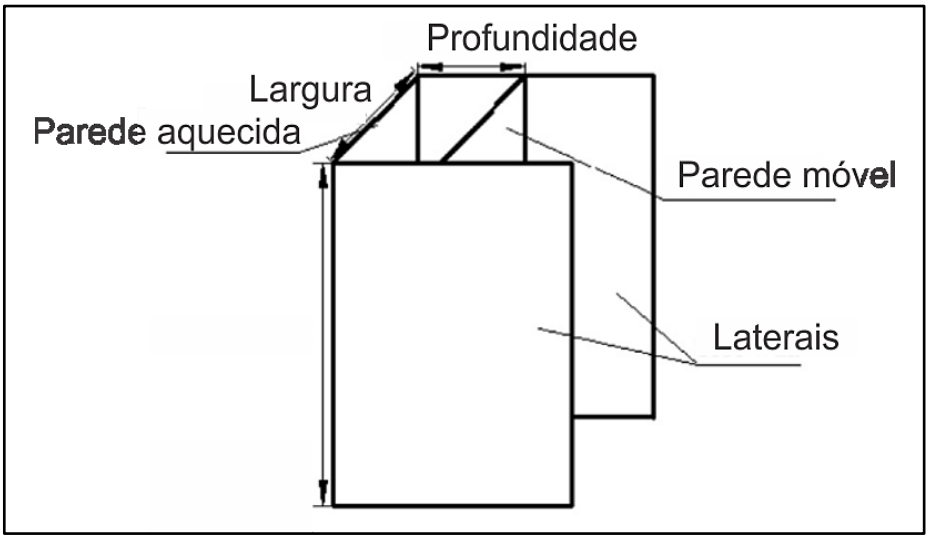
O escoamento reverso descrito por Bouchair (1994) pôde ser identificado a partir da profundidade de 300 milímetros através de uma visualização por fumaça, ao passo que o aumento da profundidade acima desse valor provocou uma penetração maior do escoamento reverso através da abertura de saída, atingindo alturas mais baixas da chaminé, mesmo assim, a vazão não foi comprometida pois o aumento da profundidade da cavidade, neste aparato em particular, gerava um aumento involuntário da área de entrada da cavidade, reduzindo a perda de carga.

Dentre todos os arranjos testados, os autores relatam o melhor como sendo um arranjo à 45° de inclinação, com 200 milímetros de profundidade, sendo que nesta condição, a vazão é 45% maior se comparado com a chaminé vertical sob mesmas condições. Tal fato foi analisado e pôde-se concluir que em ambas as situações a velocidade do ar na cavidade se manteve praticamente igual, significando que a perda de carga é semelhante mesmo a vazão sendo maior.

Os autores compararam os resultados com equações analíticas presentes na literatura, e diante disto, afirmaram que as aproximações analíticas baseadas em balanços energéticos costumam superestimar a vazão, principalmente para chaminés verticais com profundidades elevadas, o motivo está nos coeficientes de perda de carga utilizados para a geometria da saída, que geralmente são retirados de escoamentos forçados. Essa observação levou os autores a desenvolveram recentemente um novo trabalho, avaliando experimentalmente chaminés solares com cavidades de grandes profundidades (JING; CHEN; LI, 2015).

Neste novo estudo, os autores utilizaram uma chaminé solar similar à do projeto anterior, conforme Fig. 51., assim, diversas profundidades puderam ser testadas, bem como diferentes intensidades de calor, porém mantendo-a verticalmente.

Figura 51 – Chaminé solar estudada pelo grupo em 2015



Fonte: Adaptado de Jing, Chen e Li, 2015

O estudo contemplou a comparação entre os resultados experimentais, as equações analíticas encontradas na literatura e uma nova equação analítica sugerida, a qual leva em consideração as possíveis variações do coeficiente de perda de carga para diferentes condições de escoamento na geometria de saída da chaminé, incluindo um possível escoamento reverso.

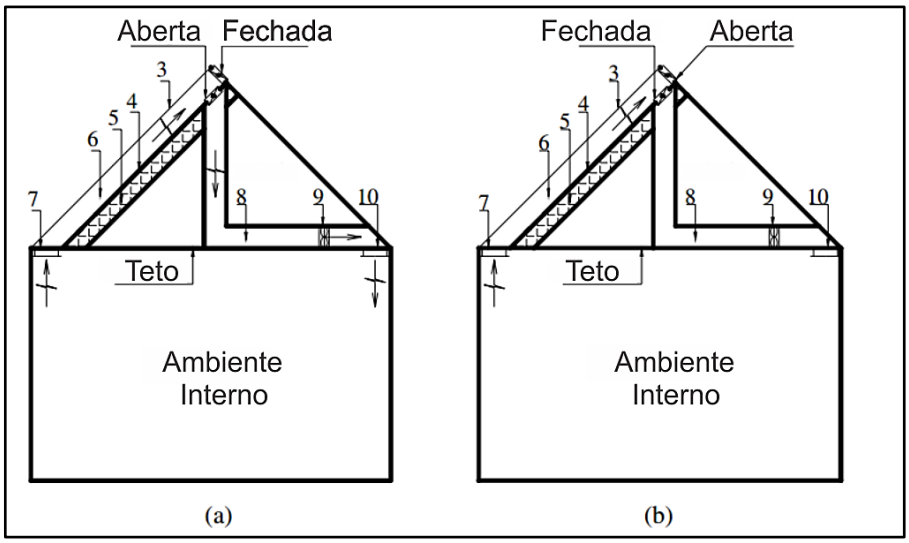
Os resultados encontrados mostram que de fato, as equações antes existentes superestimavam a vazão da chaminé, e que a nova equação sugerida é capaz de estimar a vazão não somente para chaminés com elevada relação *gap-to-height*, mas também podendo ser aplicada para chaminés com baixa relação.

Dentre todas as configurações testadas, concluiu-se que a melhor condição foi a combinação com profundidade de 1 metro, resultando em uma relação *gap-to-height* ótima de 1/2, valor que difere bastante do informado por Bouchair (1994). Entretanto, o próprio autor comenta ser questionável a existência de uma relação ótima, pois assim como houveram diversos trabalhos na literatura relatando uma geometria ótima, houveram também diversos que não identificaram uma configuração única como sendo a de melhor desempenho.

Os trabalhos experimentais realizados entre a parceria do grupo australiano com o grupo chinês possibilitaram uma confirmação sobre as influências da profundidade da cavidade na dinâmica do escoamento, bem como outros autores a utilizar aparatos semelhantes para realizar seus experimentos. Tem-se por exemplo um aparato extremamente similar utilizado por um outro grupo de pesquisa chinês, que mostraram em 2005, seus estudos acerca de aquecimento e ventilação de ambientes (ZHAI; DAI; WANG, 2005a)(ZHAI; DAI; WANG, 2005b).

Os autores utilizaram um conceito no qual um coletor solar único poderia ser implementado em telhados a fim de realizar um aquecimento do ambiente ou mesmo uma ventilação, apenas comutando algumas aberturas da cavidade conforme Fig. 52.

Figura 52 -Configuração para aquecimento do ambiente (a) ou ventilação (b)



Fonte: Adaptado de Zhai, Dai e Wang, 2005a

O experimento foi realizado através do aparato ilustrado na Fig. 53., sendo que a profundidade e inclinação do aparato, bem como a intensidade de calor aplicado no dispositivo podiam ser alterados.

Figura 53 - Aparato experimental utilizado em 2005

Fonte: Zhai, Dai e Wang, 2005b

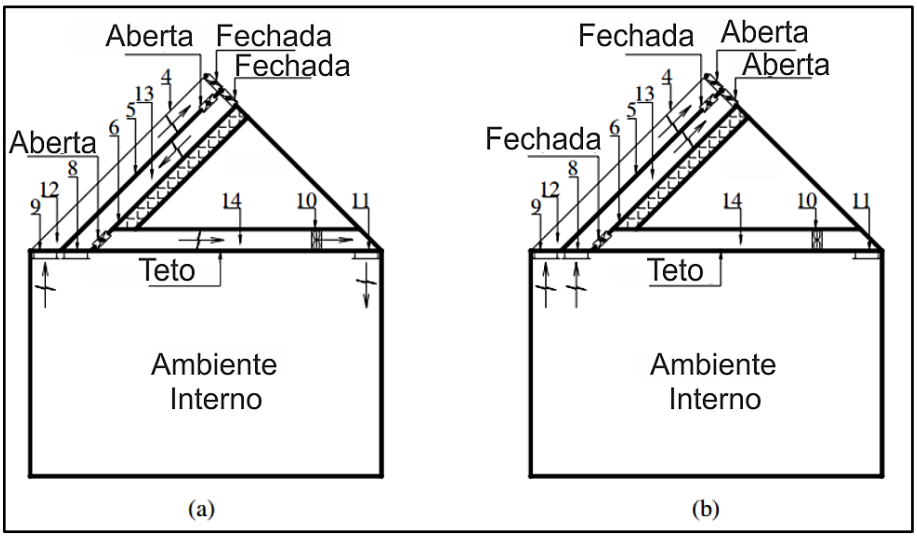
Os autores observaram que, tanto o calor coletado, quanto a vazão mássica escoada possuíam uma dependência linear com a intensidade de calor aplicada sobre o dispositivo.

O gradiente de temperatura ao longo da cavidade se mostrou similar aos observados por Hirunlabh, Kongduang, Namprakai e Khedari (1999) e Chen, Bandopadhayay, Halldorsson, Byrjalsen, Heiselberg e Li (2003), apresentando um pico máximo na altura média da cavidade, ao qual os autores atrelaram a redução de temperatura na saída à um possível escoamento reverso assim como comentado por Bouchair (1994). Assim, ao se estudar as duas configurações (aquecimento e ventilação) pôde-se concluir que a altura da cavidade deve possuir um valor ótimo, ao passo que para a configuração de aquecimento, a altura acima de 600 milímetros resultou em uma menor inclinação do gradiente de temperatura (o aumento de temperatura do ar não foi tão expressivo acima desta altura), já para a configuração de ventilação, acima de 1000 milímetros observou-se uma inflexão no gradiente de temperatura (ZHAI; DAI; WANG, 2005b).

Assim como muitos outros, os autores identificaram o aumento da vazão com o aumento da profundidade da cavidade, entretanto, para as variações realizadas, não foi encontrada nenhuma relação ótima de *gap-to-height*. De qualquer forma, entre os ângulos testados, a configuração que apresentou maior vazão mássica foi a de inclinação à 45°, conforme observado também por Chen, Bandopadhayay, Halldorsson, Byrjalsen, Heiselberg e Li (2003).

Um modelo matemático foi levantado (ZHAI; DAI; WANG, 2005a), levando os estudos acerca do conceito ainda mais adiante ao analisarem passagens duplas conforme Fig. 54. Indicando que o uso de um coletor solar de passagem dupla, sujeito à um ângulo de 30°, pode ser realmente benéfico para ambas as configurações de aquecimento e ventilação.

Figura 54 - Configuração para aquecimento do ambiente (a) ou ventilação (b) utilizando passagens duplas



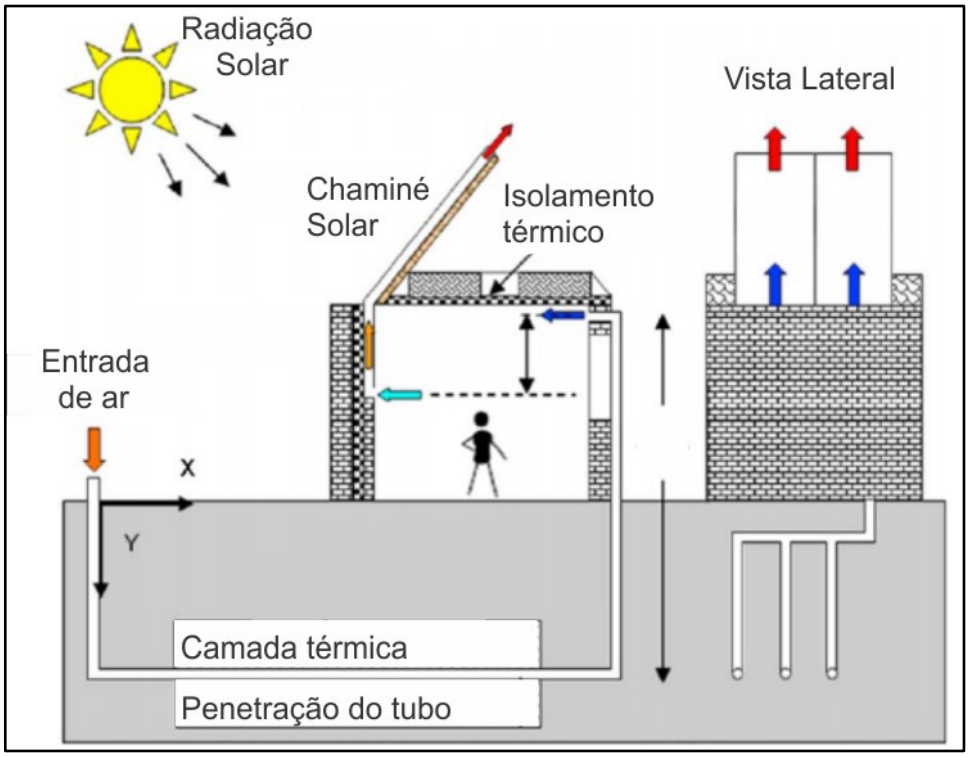
Fonte: Adaptado de Zhai, Dai e Wang, 2005a

Desta forma, o trabalho além de verificar uma possível aplicação, pôde estudar e validar as observações do trabalho de Chen, Bandopadhayay, Halldorsson, Byrjalsen, Heiselberg e Li (2003).

Os autores estiveram em contato com diversas tecnologias de aquecimento e arrefecimento solar, de maneira que em 2008 (ZHAI; WANG, 2008) e 2010 (WANG; ZHAI, 2010), realizaram algumas revisões acerca de aplicações da tecnologia na China. Já em 2011, publicaram uma revisão da literatura sobre a evolução e desenvolvimento das chaminés solares, citando os mais diversos autores (muitos deles aqui citados)(ZHAI; SONG; WANG, 2011). Diante de uma minuciosa revisão, percebe-se que a configuração de chaminé solar possui grande empregabilidade em regiões com alta incidência de radiação solar, onde geralmente os ventos possuem baixa intensidade, entretanto, os autores colocam que para climas extremamente quentes a chaminé se torna ineficiente, uma vez que a temperatura do ambiente interno é geralmente próxima da temperatura do ambiente externo.

A conclusão é de que, embora as chaminés solares sejam dispositivos economicamente viáveis e auxiliem na economia de energia ao promover a ventilação de ambientes, a utilização de apenas uma chaminé não é suficiente para promover o conforto térmico, sendo recomendada a utilização de múltiplas ou mesmo a combinação com outros sistemas naturais como o resfriamento natural evaporativo conforme sugerido por Maerefat e Haghighi (2010) ou resfriamento geotérmico conforme ilustrado na Fig. 55.

Figura 55 – Combinação com outros sistemas naturais



Fonte: Adaptado de Zhai, Song e Wang, 2011

No mesmo ano de 2011, um outro grupo de pesquisa australiano elaborou também uma revisão sobre o desenvolvimento das chaminés solares (KHANAL; LEI, 2011). Rakesh Khanal e Chengwang Lei discorreram sobre diversas características que foram ou que estavam sendo estudadas naquela época, indicando que o enfoque principal na literatura geralmente recai sobre aspectos como geometria e parâmetros climáticos, muitas vezes estudados experimentalmente, algo que o leitor pode perceber através dos trabalhos citados até aqui. Entretanto, os autores comentam sobre a falta de estudos acerca das propriedades dos materiais da chaminé, como por exemplo a absortividade, recomendando fortemente estudos relacionados a este tópico, algo que fora comentado também na revisão sobre paredes Trombe publicada em 2012 por Saadatian, Sopian, Lim, Asim e Sulaiman (2012).

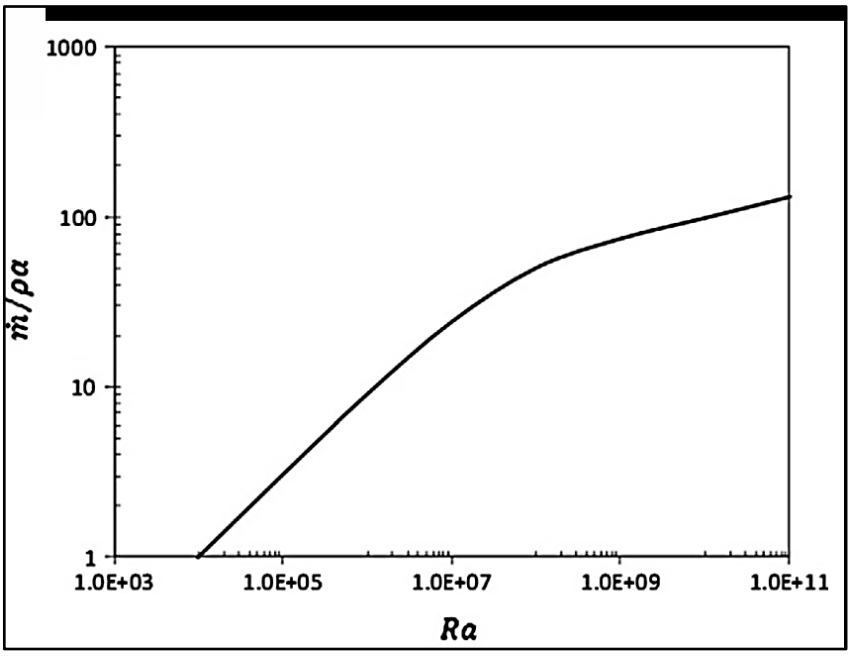
Os autores aproveitaram a revisão para relatar as influências dos parâmetros construtivos como a profundidade e geometrias de entrada e saída da cavidade, bem como a inclinação da chaminé e incidência de radiação solar. Ao analisar a literatura da época, os autores concluíram que diversos estudos relatam contradições, o que indica, segundo os autores, que o conceito da chaminé solar talvez não tenha sido completamente entendido, necessitando assim, futuras análises.

A influência de tais parâmetros geométricos afeta consideravelmente a dinâmica do escoamento na chaminé solar, sendo que o efeito de um possível escoamento reverso na saída da chaminé, pode comprometer o funcionamento da mesma. Pensando nisso, o grupo australiano após publicar esta revisão, desenvolveu um estudo detalhado sobre o efeito do escoamento reverso sobre o desempenho da chaminé solar (KHANAL; LEI, 2012).

Os autores utilizaram um modelo numérico para este estudo, considerando uma chaminé solar baseada em vidro, na qual este podia ser inclinado. Assim, os autores puderam simular a variação da profundidade ao longo da altura da cavidade, bem como o número de Rayleigh na faixa laminar através da intensidade de calor aplicada.

O estudo mostrou que a vazão mássica depende fortemente do número de Rayleigh, seguindo um padrão conforme a Fig. 56. Ao que pode ser observado, a sensibilidade da vazão escoada ao número de Rayleigh reduz a partir de um certo valor, sendo que neste instante, foi observado o surgimento de escoamento reverso através da saída de ar do aparato, ao passo que, com o aumento acima deste limite, o escoamento reverso penetra ainda mais na cavidade em direção a entrada da mesma.

Figura 56 – Comportamento da vazão mássica em função do número de Rayleigh



Fonte: Khanal e Lei, 2012

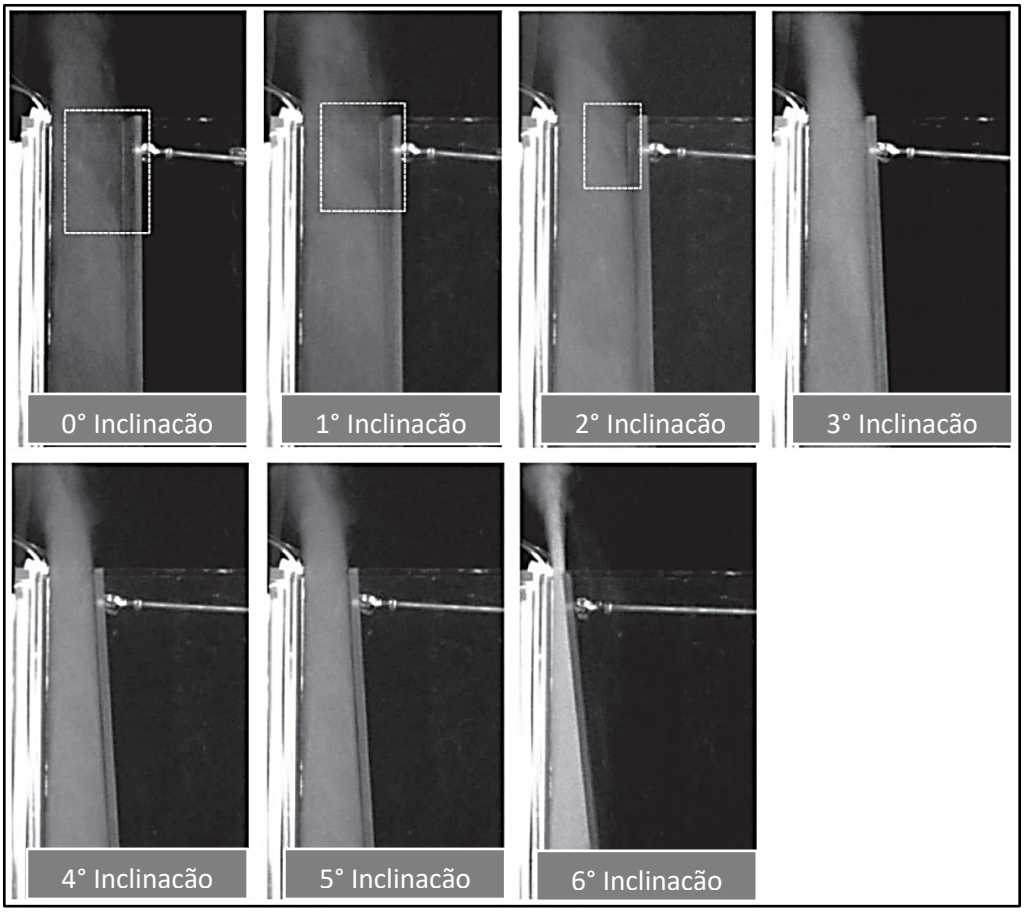
Nota-se, portanto, que o número de Rayleigh afeta diretamente o comportamento da camada limite térmica, ao passo que um número de Rayleigh maior acarreta em uma redução da espessura da camada limite térmica, promovendo uma troca maior por convecção e

facilitando o surgimento do escoamento reverso, já para números de Rayleigh baixos, a transmissão de calor se dá praticamente por condução no fluido, com uma camada limite térmica de grande espessura.

Os autores puderam ainda quantificar a penetração do escoamento reverso, utilizando a proporção de distância penetrada sobre a altura total da chaminé, desta forma, através das análises, puderam concluir que a redução da profundidade da cavidade desfavorece o surgimento do escoamento reverso, sendo recomendada a utilização de profundidades de igual dimensão da espessura da camada limite térmica a fim de se maximizar a vazão mássica. Algo similar fora utilizado em outro estudo (ARCE; JIMÉNEZ; GUZMÁN; HERAS; ALVAREZ; XAMÁN, 2009).

Em 2014 os autores validaram a chaminé solar proposta através de um estudo experimental (KHANAL; LEI, 2014). Utilizando um aparato similar ao simulado no trabalho anterior, os autores puderam avaliar a estrutura do escoamento reverso na abertura de saída da cavidade através da visualização do escoamento conforme pode ser visto na Fig. 57.

Figura 57 – Surgimento de escoamento reverso observado nas regiões demarcadas em 2014



Fonte: Adaptado de Khanal e Lei, 2014

Assim como observado no trabalho anterior, os autores puderam confirmar que a inclinação da superfície, e consequentemente, a redução da profundidade na sessão de saída, pôde reduzir o escoamento reverso e assim aumentar a vazão mássica da chaminé até um certo limite, sendo que após este, a vazão sofreu uma redução.

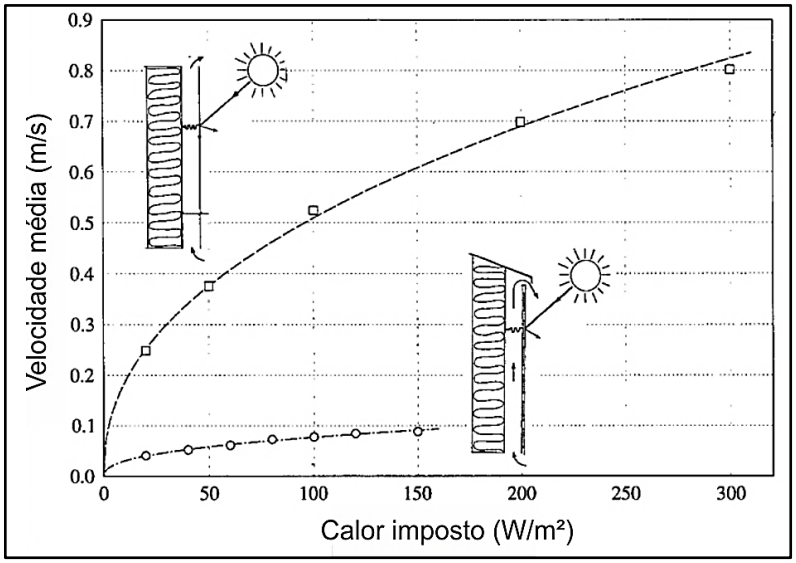
Um ano após esta publicação, os autores realizaram outra simulação numérica, contemplando desta vez, o escoamento em regime turbulento (KHANAL; LEI, 2015), revelando que a inclinação da superfície é capaz ainda de gerar uma redução da intensidade da turbulência, sendo que neste regime, a profundidade ótima não possui dependência do número de Rayleigh.

No decorrer dos anos, este grupo permitiu um estudo detalhado sobre o escoamento reverso, qualificando-o e quantificando-o.

2.4.2 Outros trabalhos de grande relevância

Outros trabalhos, realizados por grupos distintos levantaram discussões importantes, como por exemplo o trabalho realizado por Sandberg e Moshfegh (1996), no qual foram comparadas duas geometrias de saída para uma cavidade destinada ao arrefecimento de células fotovoltaicas por convecção natural, sendo que os resultados experimentais mostraram uma grande redução da velocidade média da cavidade ao se utilizar uma saída com protetor para chuvas, conforme pode ser evidenciado na Fig. 58.

Figura 58 – Variação da velocidade média em função do calor imposto para a condição de saída vertical ou saída com proteção de chuva

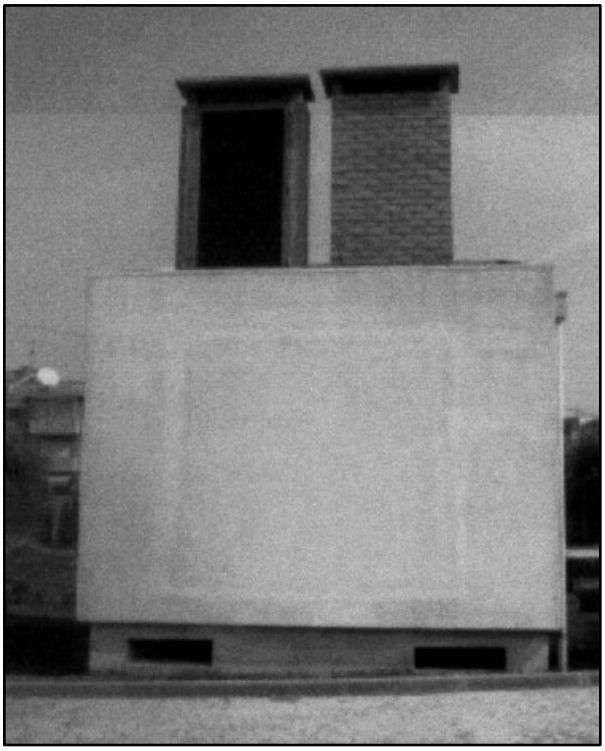


Fonte: Adaptado de Sandberg e Moshfegh, 1996

Os autores também publicaram um estudo numérico do caso (MOSHFEGH; SANDBERG, 1996), e posteriormente uma evolução experimental do trabalho (MOSHFEGH; SANDBERG, 1998), levantando o gradiente de temperatura e de velocidade ao longo das seções desta cavidade.

Clito Afonso e Armando Oliveira (AFONSO; OLIVEIRA, 2000) também contribuíram significativamente para área, ao comparar duas chaminés, sendo uma baseada em vidro e a outra baseada em alvenaria (vide Fig. 59). Os resultados encontrados mostraram uma melhor uniformização e intensidade da vazão escoada ao se utilizar a chaminé baseada em vidro.

Figura 59 – Comparação entre chaminé solar e chaminé de alvenaria no ano de 2000



Fonte: Afonso e Oliveira, 2000

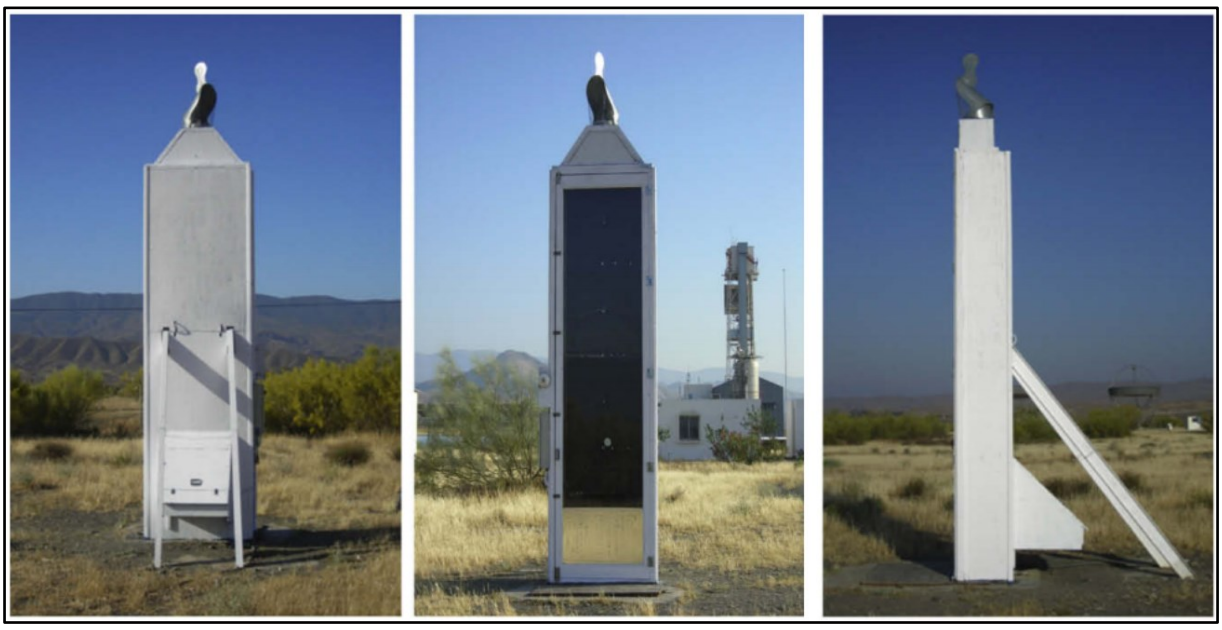
Na ocasião, os autores analisaram também a influência do isolante térmico na chaminé, relatando que, é imprescindível o uso de um isolante térmico, uma vez que a eficiência reduz drasticamente. Entretanto, um isolante com maior espessura permite um acúmulo maior de energia e favorece a ventilação em períodos sem incidência de radiação solar, porém, um isolante com espessura reduzida favorece um aumento de vazão, sendo mais indicado para a ventilação durante o dia. Fica claro, portanto que, um isolamento de menor espessura diminui a inércia térmica do dispositivo, ao passo que a ativação do mesmo se torna mais rápida, já no caso de um isolamento mais espesso, tem-se uma dinâmica térmica próxima de aparatos como

a parede de Trombe, a qual os autores Burek e Habeb (2007) comentam possuir grande dificuldade em estabelecer um regime permanente, ficando submetido exclusivamente à um transiente térmico.

Burek e Habeb (2007), por sua vez, pôde observar em seus experimentos os gradientes de temperatura, bem como as correlações entre calor e vazão, os quais resultaram em distribuições e comportamentos similares aos demais grupos de pesquisa já citados.

Em 2009, Arce, Jiménez, Guzmán, Heras, Alvarez e Xamán (2009) utilizaram uma chaminé solar baseada em vidro conforme Fig. 60 para realizar seus estudos, sendo que nesta ocasião, os autores aferiram a temperatura do vidro, da placa de absorção, do ar na entrada e na saída da cavidade, bem como a irradiação solar e vazão volumétrica ao longo do dia. Seus resultados mostraram que tais variáveis possuem grande dependência não somente da irradiação solar, como também da velocidade do vento no local.

Figura 60 - Chaminé solar testada ao longo do dia em 2009



Fonte: Arce, Jiménez, Guzmán, Heras, Alvarez e Xamán, 2009

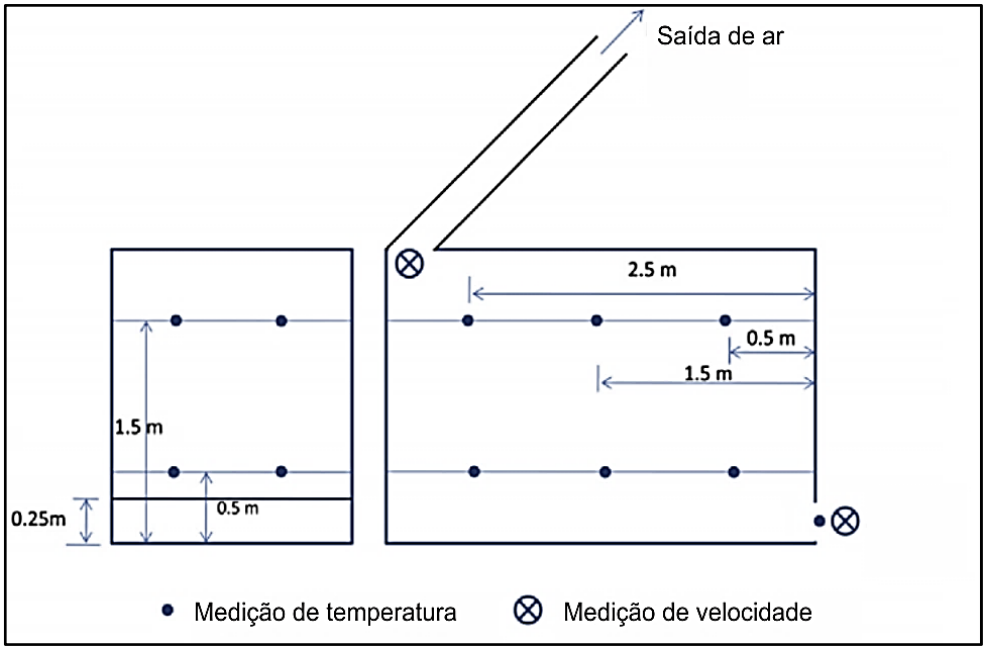
No ano seguinte uma revisão é publicada sobre ventilação e aquecimento solar (CHAN; RIFFAT; ZHU, 2010), contemplando o funcionamento de diversos dispositivos solares voltados para o controle térmico de ambientes. Os autores afirmam que o desenvolvimento de um único dispositivo capaz de promover o controle total para aquecimento e ventilação deve possuir um sistema mais elaborado, e não apenas uma comutação de aberturas da cavidade.

Além disso, é citada a importância de se aprimorar a eficiência, custo e estética do dispositivo a fim de se garantir uma melhor aceitação e implementação da tecnologia.

O aquecimento de ambientes foi alvo de discussão também para Sá (2011), que discorreu sobre o desempenho térmico de paredes Trombe em sua tese de doutorado. A autora utilizou-se de um experimento para relatar as influências das condições climáticas do ambiente interno e externo, bem como das variações de temperatura dos componentes (caixa de ar, parede acumuladora e aberturas) no desempenho do dispositivo. Cavalcanti (2013) também utilizou a parede Trombe em sua tese de doutorado para a Universidade de São Paulo, na qual foram testadas diferentes configurações e situações climáticas a fim de se desenvolver um modelo matemático que pudesse realizar a previsão da temperatura de um ambiente interno.

Imran, Jalil e Ahmed (2015) seguiram uma linha similar à de Chen, Bandopadhayay, Halldorsson, Byrjalsen, Heiselberg e Li (2003), estudando experimentalmente e numericamente as influências de geometria como a profundidade e inclinação, bem como da incidência de calor no desempenho de uma chaminé solar implementada em telhados, assim como ilustrado na Fig. 61. Os autores identificaram um ângulo ótimo de 60°, no qual o dispositivo apresentou 20% a mais de vazão se comparado com a configuração em 45°. Quanto as profundidades testadas, foi identificado o surgimento de escoamento reverso apenas acima de 150 milímetros, desta forma, os autores relataram a relação *gap-to-height* equivalente à 150/2000 como sendo ótima, resultando na maior vazão possível.

Figura 61 – Aparato experimental utilizado em 2015



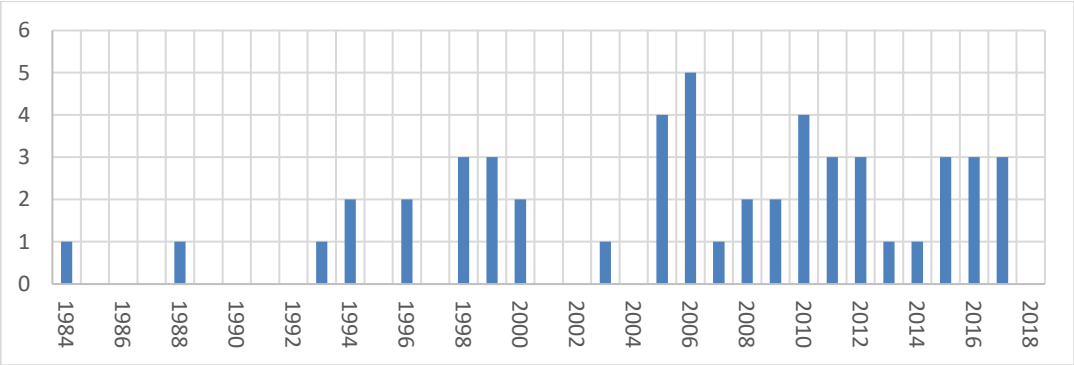
Fonte: Adaptado de Imran, Jalil e Ahmed, 2015

Em 2016, o tema da parede Trombe foi foco principal da dissertação de Bianco (2016), apresentada para a universidade de São Paulo. A autora utilizou protótipos para realizar seus experimentos e avaliar o desempenho do dispositivo no clima de São Paulo. No mesmo ano, uma nova revisão fora publicada sobre dispositivos solares voltados para a promoção de conforto térmico (KALKAN; DAGTEKIN, 2016), na qual o autor comenta que ainda há muito a se otimizar nestes dispositivos a fim de se economizar energia substancialmente e se estabelecer as condições ambientais necessárias.

Em resumo, fica claro que há uma grande procura por aplicações dos dispositivos solares e consequentemente validações e otimizações para viabilizar suas aplicações. No que tange a empregabilidade da chaminé solar em edificações, alguns autores sugeriram fortemente a utilização da chaminé solar em paredes e telhados, (KHEDARI; BOONSRI; HIRUNLABH, 2000)(MATHUR; MATHUR; ANUPMA, 2006)(ZHAI; DAI; WANG, 2005a)(ZHAI; DAI; WANG, 2005b)(SUSANTI; HOMMA; MATSUMOTO; SUZUKI; SHIMIZU, 2008)(ZHAI; SONG; WANG, 2011)(TAN; WONG, 2012)(IMRAN; JALIL; AHMED, 2015)(CHANTAWONG, 2017b), bem como nas fachadas dos edifícios, interligando os andares através de uma única cavidade de chaminé solar (DING; HASEMI; YAMADA, 2005)(MACIAS; MATEO; SCHULER; MITRE, 2006)(GAN, 2006)(PUNYASOMPUN; HIRUNLABH; KHEDARI; ZEGHMATI, 2009)(ASADI; FAKHARI; FAYAZ; MAHDAVIPARSA, 2016).

A revisão aqui realizada na sessão 2.4 contempla diversos avanços ocorridos ao longo de 30 anos de pesquisa. Os 51 trabalhos citados podem ser visualizados na Fig. 62.

Figura 62 - Distribuição dos trabalhos citados na sessão 2.4



Fonte: Autor

Os grupos de pesquisa citados na sessão 2.4.1 podem ser vistos em ordem cronológica na Tab. 3.

Tabela 3 - Ordem cronológica e divisão dos grupos de pesquisa citados na seção

Ano	Sobrenome do autor
1984	Bansal
1988	Bouchair
1993	Bansal
1994	Bouchair
1994	Mathur
1996	Sandberg
1996	Moshfegh
1998	Khedari
1998	Gan
1998	Moshfegh
1999	Bansal
1999	Hirunlabh
1999	Sandberg
2000	Khedari
2003	Chen
2005	Bansal
2005	Zhai (a)
2005	Zhai (b)
2006	Mathur (a)
2006	Mathur (b)
2006	Chantawong
2006	Gan
2008	Zhai
2009	Punyasompun
2010	Gan (a)
2010	Gan (b)
2011	Zhai
2011	Khanal
2012	Khanal
2014	Khanal
2015	Jing
2015	Khanal
2017	Chantawong (a)
2017	Chantawong (b)
2017	Chantawong (c)

Grupos	Local da pesquisa
	Índia
	Thailândia
	Reino Unido
	Austrália e China
	China
	Austrália
	Suécia

Fonte: Autor

As dimensões e variações de parâmetros utilizados pelo os autores citados podem ser vistos na Tab. 4.

Tabela 4 - Variações geométricas realizadas por alguns dos grupos de pesquisa

Milímetros		Tipo			Variacões geométricas realizadas			
		Exp	Num	Teo	Profundidade	Largura	Altura	Inclinação (°)
1994	Bouchair				100;200;300;500;1000	-	2000	90
1993	Bansal							30
2005	Bansal				130;235	1000	1000	90
2006	Mathur (a)				100;200;300	1000	1000	30;45;60
2006	Mathur (b)				100;200;300	1000	1000	90
1998	Khedari				100;140	1000	2000	90
1999	Hirunlabh				100;145	1000	1000;2000	
2000	Khedari				140;145	1000	2000	
2006	Chantawong				100	500	740	90
2009	Punyasompun				~150	1200	1000 cada andar	
2017	Chantawong (b)				80	500	600	90
2003	Chen				100;200;300;400;600	620	1500	15;30;45;60
2015	Jing				400;700;1000;1200	1000	2000	90
2005	Zhai (a)				200	4000	500 a 4000	10 a 75
2005	Zhai (b)				100;200;300;400;500	500	1500	10;20;30;45;60;75;90
1996	Moshfegh				210;230;250		6500	90
1996	Sandberg				230	1640	6500	90
1998	Moshfegh				230	1540	6500	90
1998	Gan				100;200;300;400	3000	2000	
2006	Gan				200;300;400;500;550;600;700;800		6000	
2010	Gan (a)				50;100;200;300;400;500;600		1000;2000;3000;4000;5000;6000	90
2010	Gan (b)				50;100;200;300;400;500;600		1000;2000;3000;4000;5000;6000	90

Fonte: Autor

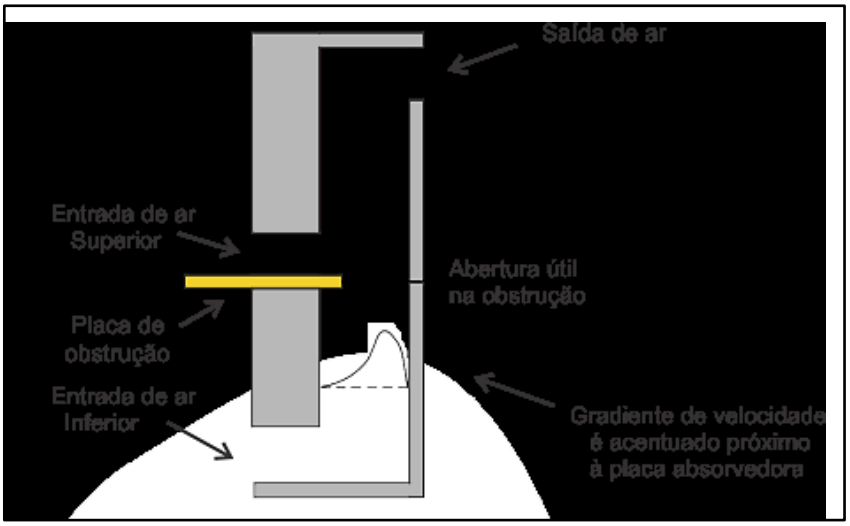
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Como visto na sessão anterior, os dispositivos solares voltados para conforto térmico geralmente utilizam-se do princípio de efeito estufa através de uma superfície transparente como um vidro ou polímero para induzir um aquecimento do ar na cavidade e assim gerar um empuxo térmico. Entretanto, com o objetivo de retirar simultaneamente o ar da parte superior e inferior do ambiente, uma nova chaminé solar é proposta neste trabalho.

A chaminé proposta é formada por uma superfície absorvedora externa, logo, este aparato não utiliza o efeito estufa como acionamento térmico, mas sim um calor proveniente da condução nesta superfície que é transferida por condução, convecção e radiação ao fluido e às superfícies internas da cavidade.

Conforme informado por Afonso e Oliveira (2000), uma chaminé com esta concepção não apresentaria o mesmo desempenho e uniformidade da vazão ao longo das horas do dia, entretanto, ao se utilizar esta configuração, o gradiente de velocidade transversal à cavidade se torna mais intenso próximo a superfície absorvedora, propiciando a implementação de um estreitamento na cavidade combinado com a inserção de uma abertura para remoção do ar da parte superior do ambiente conforme Fig. 63.

Figura 63 – Chaminé proposta indicando a acentuação do gradiente de velocidade próximo à placa absorvedora



Fonte: Autor

A inserção de um estreitamento através de uma placa de obstrução, é uma primeira abordagem, tornando o aparato simples e de baixo custo. O conceito visa utilizar boa parte da

energia cinética para promover um arraste do ar presente na abertura superior, e assim gerar ventilação na parte superior do ambiente interno, entretanto, a utilização deste mesmo mecanismo em uma chaminé solar baseada em vidro poderia não ser tão eficiente, uma vez que o gradiente de velocidade apresentaria maior intensidade próximo ao isolamento, logo, grande parte da energia cinética do escoamento seria convertida, resultando em aumento da pressão contra a placa de obstrução.

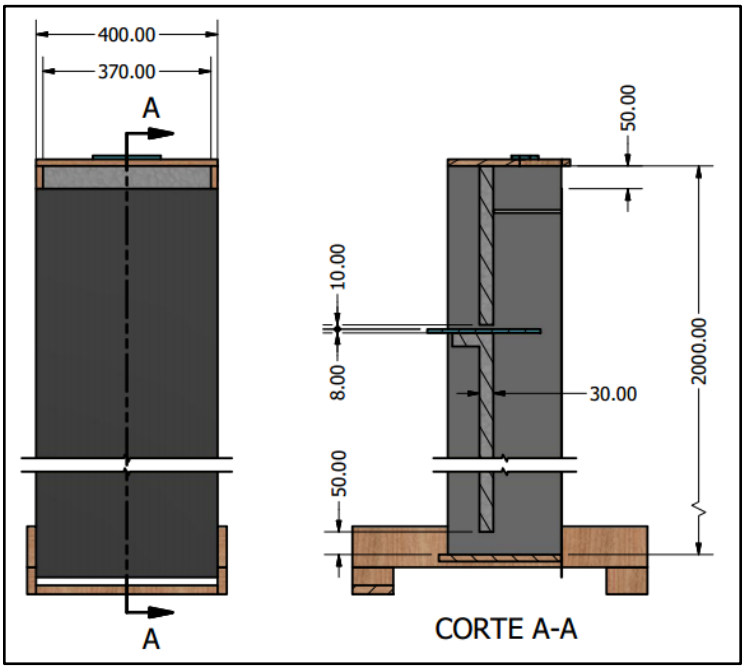
Com o intuito de se realizar os experimentos, uma chaminé solar vertical em real escala foi construída, bem como diversos auxiliares que são descritos nas sessões seguintes.

3.1 CHAMINÉ SOLAR PROPOSTA

Construída sobre uma estrutura de madeira MDF (*Medium Density Fiberboard*), a chaminé solar possui uma chapa de alumínio de 2 mm de espessura como superfície absorvedora, sendo sua largura de 400 mm e altura de 2000 mm. A superfície recebeu ainda uma pintura ao lado externo em preto fosco, otimizando sua absortividade, bem como uma vedação entre a estrutura.

Devido à espessura de 15 mm de cada lateral de MDF, a cavidade da chaminé ficou reduzida à 370 mm de largura conforme Fig. 64.

Figura 64 – Dimensões principais da chaminé solar proposta em milímetros



Fonte: Autor

A entrada superior foi ajustada para uma abertura de 370 mm x 10 mm, sendo inserida à uma altura de 1645 mm na cavidade, já as demais aberturas (entrada inferior e saída) foram ajustadas para 370 mm x 50 mm.

Um isolante térmico de poliestireno expandido fora utilizado para formar a cavidade e servir de estrutura para as entradas de ar. Sua espessura de 30 mm e largura de aproximadamente 370 mm possibilita um ajuste por interferência entre as laterais de MDF, promovendo uma melhor vedação da cavidade.

Através de um ajuste na posição do isolante térmico, é possível ainda alterar a profundidade da cavidade, permitindo assim, a análise da influência desta dimensão sobre o desempenho da chaminé solar. Para tanto, duas dimensões foram escolhidas, 50 mm e 150 mm de profundidade, retornando uma relação *gap-to-height* de 1/40 e 15/200, respectivamente, sendo esta última, similar à de Imran, Jalil e Ahmed (2015) e de Amori e Mohammed (2012).

Construída em PMMA (polimetil-metacrilato), a placa de obstrução possui 8 mm de espessura e 370 mm de largura, permitindo a passagem de luz para a visualização do escoamento não somente a jusante, como também a montante. Com este mesmo intuito, uma janela de PMMA foi inserida em uma das laterais de madeira, evidenciando o escoamento na região da entrada de ar superior conforme Fig. 65.

Figura 65 – Chaminé solar proposta e sua lateral com uma janela de PMMA

Fonte: Autor

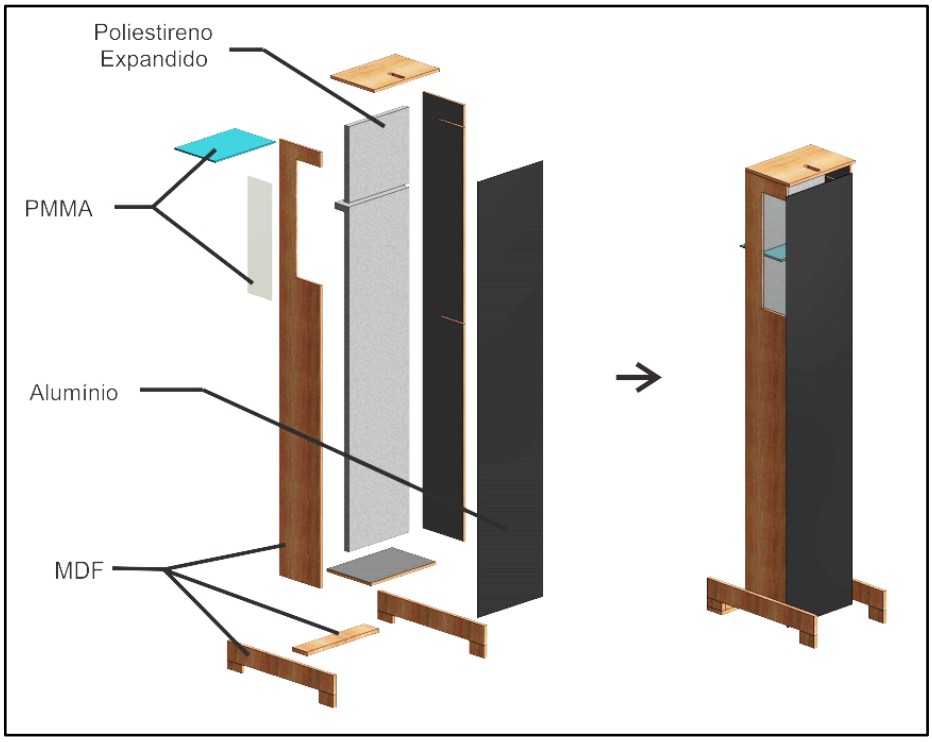
A placa de obstrução em PMMA permite uma variação da abertura útil do escoamento conforme Fig. 66, a qual é analisada neste trabalho a fim de se identificar a configuração que maximiza o desempenho da chaminé solar. A variação escolhida para esta abertura foi de 50 a 0 mm em incrementos de 10 mm para a configuração com cavidade de 50 mm de profundidade e de 150 a 0 mm em incrementos de 30 mm para a configuração com 150 mm de profundidade.

Figura 66 – Variação da abertura através da placa de obstrução

Fonte: Autor

O protótipo construído para os experimentos se assemelha de certa forma com o modelo utilizado por Arce, Jiménez, Guzmán, Heras, Alvarez e Xamán (2009), sendo construído como um módulo independente, ou seja, a chaminé solar não está vinculada com um ambiente específico. Em resumo, o protótipo possui uma cavidade de 2000 mm de altura, 370 mm de largura e profundidade variável de 50 a 150 mm. Os materiais utilizados em sua concepção podem ser vistos através da Fig. 67.

Figura 67 – Materiais da chaminé solar proposta



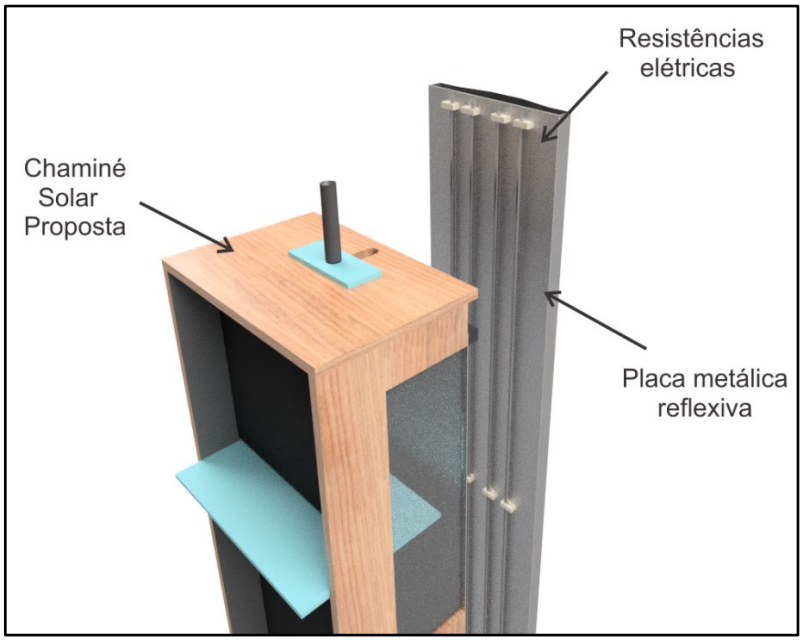
Fonte: Autor

3.2 CONSTRUÇÃO DO AQUECEDOR

Chaminés solares são geralmente expostas ao sol em condições reais, entretanto, para a realização dos experimentos, a incidência de radiação solar real apresentaria flutuações abruptas que comprometeriam todo o estudo, o qual é baseado em comparações de cenários. Portanto, é de extrema importância a utilização de uma fonte de radiação contínua como alternativa ao sol.

Inicialmente, 4 resistências elétricas ELBAC foram montadas em uma superfície metálica reflexiva sendo direcionadas para a superfície absorvedora da chaminé solar de acordo com a Fig. 68.

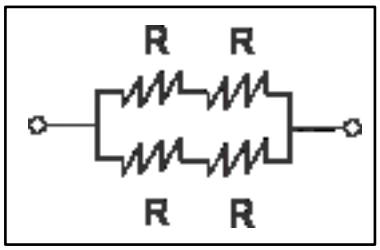
Figura 68 – Aquecedor construído direcionado para a chaminé solar



Fonte: Autor

Cada resistência possui 2200 mm de comprimento e diâmetro de 9 mm, sendo capazes de atingir a temperatura de 750 °C ou 2000 W quando alimentadas por uma fonte de 220 V. As resistências foram associadas conforme a Fig. 69, formando uma resistência equivalente de 23,3Ω.

Figura 69 - Associação das resistências para a construção do aquecedor

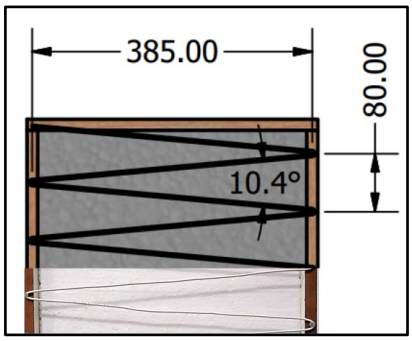


Fonte: Autor

Entretanto, identificou-se que este tipo de aquecedor não fornece um fluxo de calor adequado, visto que devido sua proximidade com a superfície absorvedora da chaminé, um fluxo ascendente externo é gerado, acarretando uma convecção natural indesejada e variável, comprometendo assim seu controle. Para tal, um conjunto de aquecimento empregado diretamente na superfície absorvedora da chaminé solar foi adotado, fornecendo calor à chaminé de um modo mais homogêneo e controlado através de um fluxo constante.

O aparato conta com um cabo resistivo da marca Tramar revestido de silicone, com comprimento total de 20 m, diâmetro de 2,5 mm e resistência de 4,75 ohm por metro, sendo distribuído em um padrão alternado conforme a Fig. 70.

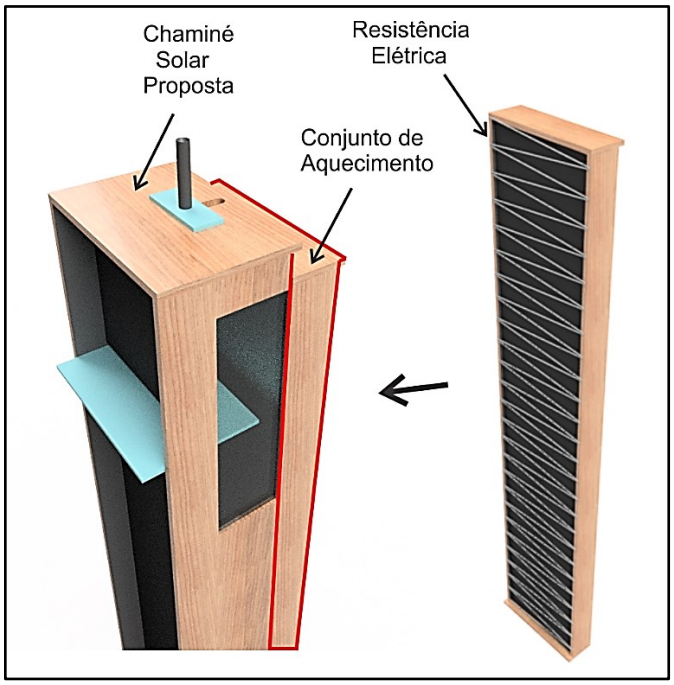
Figura 70 – Padrão de enrolamento do conjunto de aquecimento, dimensões em milímetros



Fonte: Autor

O padrão adotado tem como intuito distribuir o fornecimento de calor ao longo da superfície absorvedora, esta, em contato direto com o cabo resistivo conforme a montagem ilustrada na Fig. 71. Com um total de 51 trechos dispostos na diagonal, o conjunto de aquecimento é montado na chaminé solar tendo suas laterais isoladas para que não haja nenhum fluxo de ar devido à convecção natural.

Figura 71 – Montagem do conjunto de aquecimento na chaminé solar



Fonte: Autor

Um alicate amperímetro com funções de multímetro da marca Minipa, modelo ET3702A, foi utilizado para identificar a potência consumida pelo aquecedor quando acionado através da tensão de 127 V, indicando uma estimativa do fluxo de calor sendo fornecido à chaminé solar.

3.3 CONJUNTO DE VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTO

A visualização do escoamento não permite uma análise quantitativa, mas evidencia o comportamento do escoamento, de tal forma que, ao ser aplicada na chaminé solar proposta, a visualização pode revelar se há e como se dá o escoamento na entrada de ar superior. Para atingir esse objetivo, um arranjo similar ao de Wright, Jin, Hollands e Naylor (2006) foi implementado.

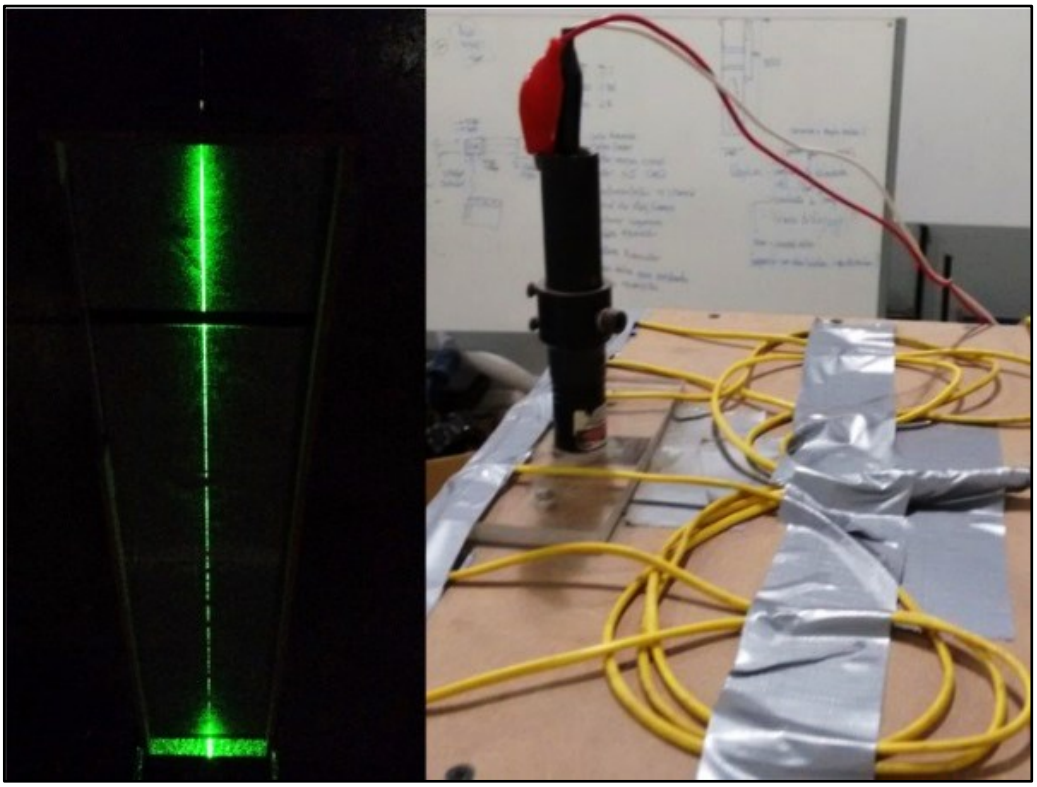
Uma máquina de fumaça de 600 W ilustrada na Fig. 72 foi empregada, fornecendo partículas de glicerina que, mediante a atuação de um plano de luz, se evidenciam no escoamento.

Figura 72 - Máquina de fumaça de 600W utilizada para a visualização do escoamento

Fonte: Autor

O plano de luz, por sua vez, é formado através de um Laser conforme Fig. 73 alimentado por uma fonte de 3,7 VDC e 0,25 A, emitindo luz visível no comprimento de onda de 532 nm, ou seja, na cor verde, o qual foi combinado com uma lente cilíndrica a fim de se planificar o feixe.

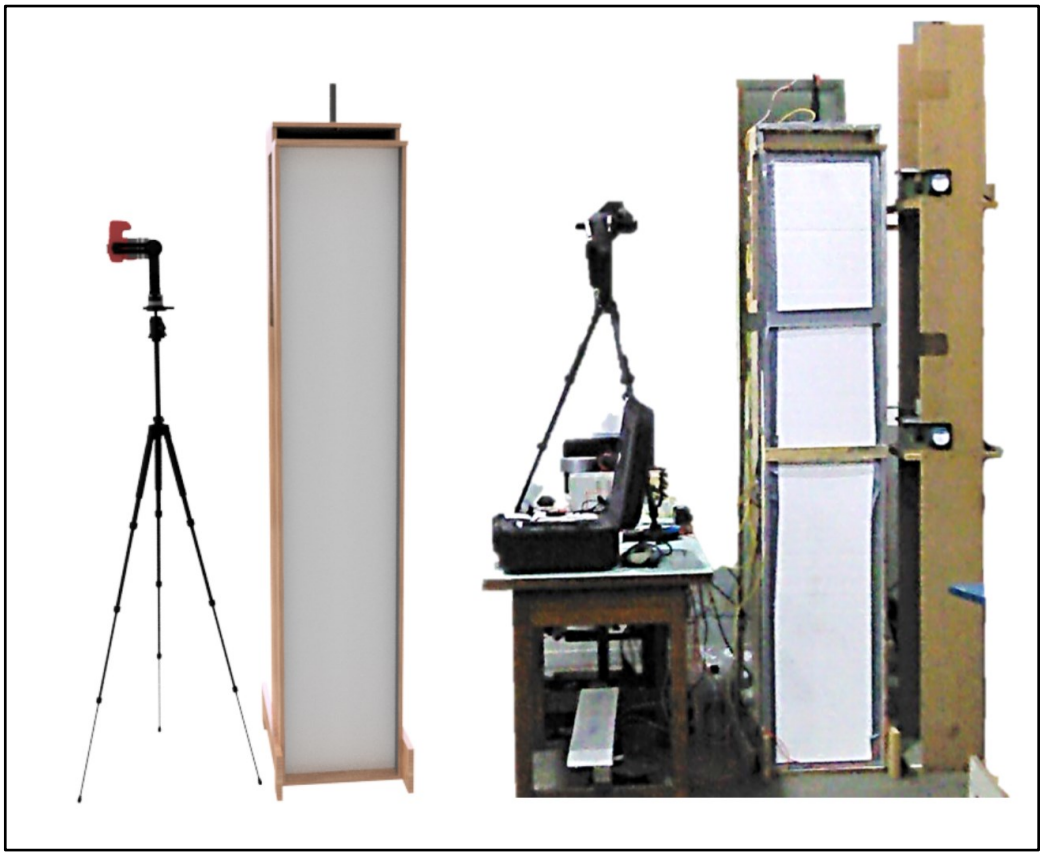
Figura 73 – Laser e lente cilíndrica posicionados na chaminé solar proposta



Fonte: Autor

Com o intuito de se capturar a interação entre o plano de luz e as partículas, uma câmera digital Canon T3i é posicionada através de um tripé pelo lado externo da chaminé solar, sendo direcionada para a lateral de PMMA conforme Fig. 74. O campo de visão (*FOV - field of view*) da câmera é então ajustado para as dimensões da janela de PMMA da chaminé e sua profundidade de campo (*DOF - depth of field*) para o plano coincidente com o plano de luz.

Figura 74 – Chaminé proposta e seus auxiliares (CAD e modelo real)



Fonte: Autor

Além disso, a câmera permite um ajuste do balanceamento da cor branca (*WB - white balance* configurado para o modo automático), velocidade do obturador (ajustada para 1/40), bem como da abertura de diafragma (utilizado f5.0) e correção ISO (ISO1600), garantindo um ajuste correto para a iluminação do ambiente e eliminando possíveis reflexos da janela de PMMA na lateral da chaminé solar.

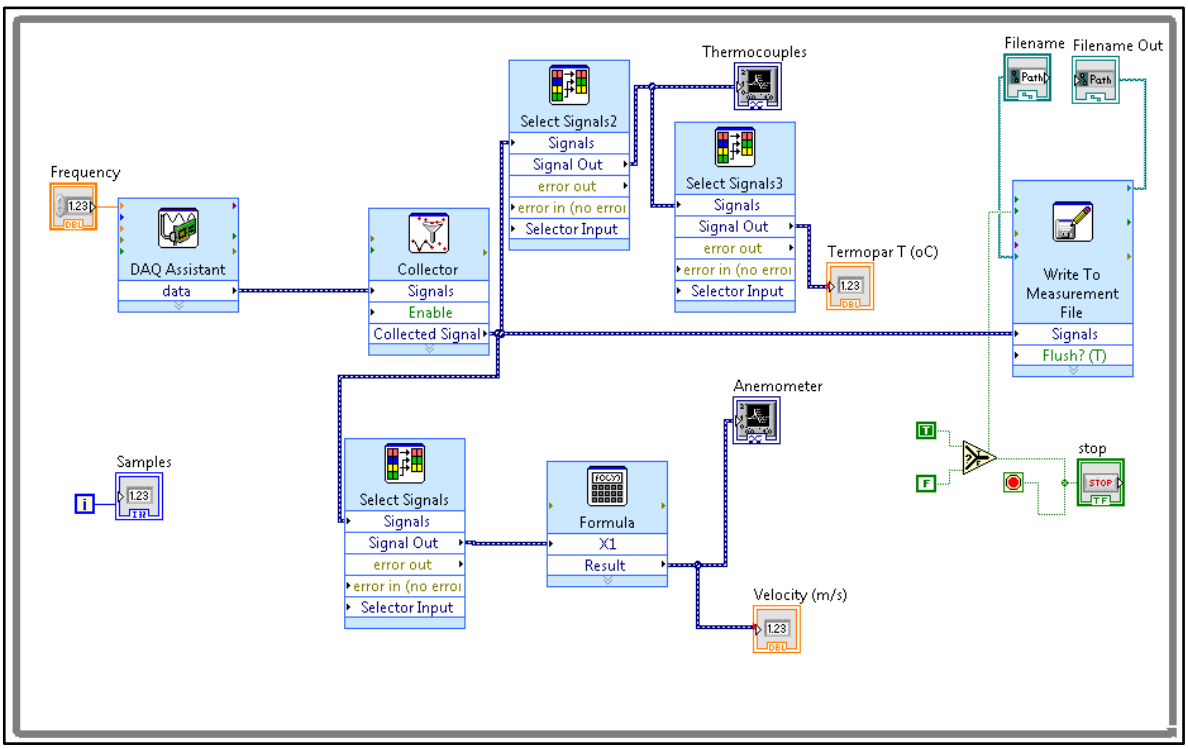
3.4 INSTRUMENTAÇÃO DA CHAMINÉ SOLAR PROPOSTA

A chaminé recebeu termopares e um anemômetro, os quais tiveram de ser calibrados para se retirar possíveis erros sistemáticos.

Localizados em pontos específicos, estes instrumentos possibilitam o levantamento dos gradientes de temperatura e velocidade ao longo do dispositivo, bem como uma análise da vazão volumétrica e mássica nas diversas configurações testadas.

A aquisição de dados dos instrumentos é realizada através de uma plataforma National Instruments CompactDAQ, modelo NI cDAQ-9172, a qual se comunica diretamente com um computador pela interface LabView. Portanto, um ambiente de aquisição foi elaborado dentro do programa, a fim de se coletar os canais corretos e permitir uma melhor visualização da aquisição conforme Fig. 75.

Figura 75 -Diagrama de blocos desenvolvido no ambiente do LabView



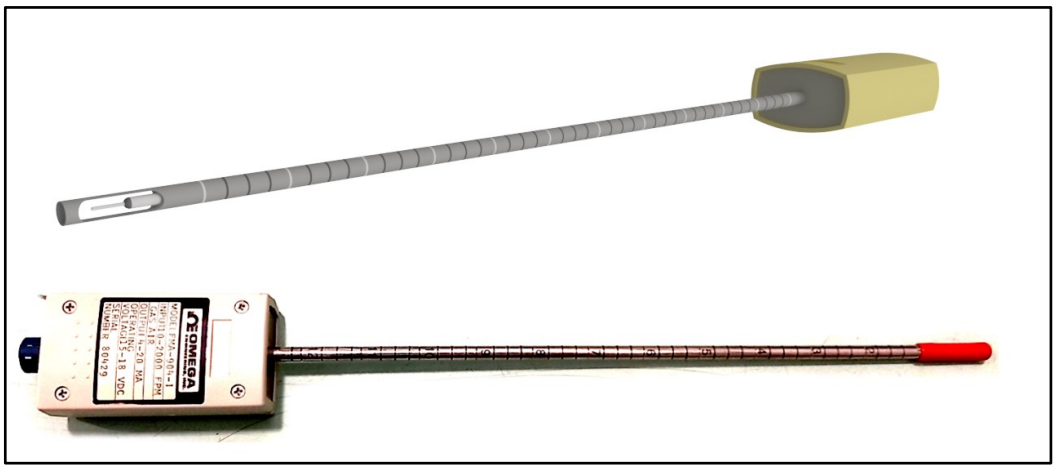
Fonte: Autor

3.4.1 Medição das velocidades

As velocidades indicadas em escoamentos naturais são geralmente baixas, já no âmbito da chaminé solar, diversos autores relatam velocidades abaixo de 1 $m.s^{-1}$, o que restringe a utilização de diversos anemômetros devido as suas resoluções.

Um transdutor de baixa velocidade da marca OMEGA, modelo FMA-904-I conforme Fig. 76 foi utilizado, sendo alimentado por uma fonte de 15 a 18 VDC, o dispositivo retorna um sinal de 4 a 20 mA. Sua sonda é constituída por uma haste rígida em aço inoxidável AISI 304 com comprimento de 13” e diâmetro de 1/4”, facilitando as medições no centro da cavidade da chaminé solar.

Figura 76 – Transdutor de velocidade OMEGA FMA-904-I



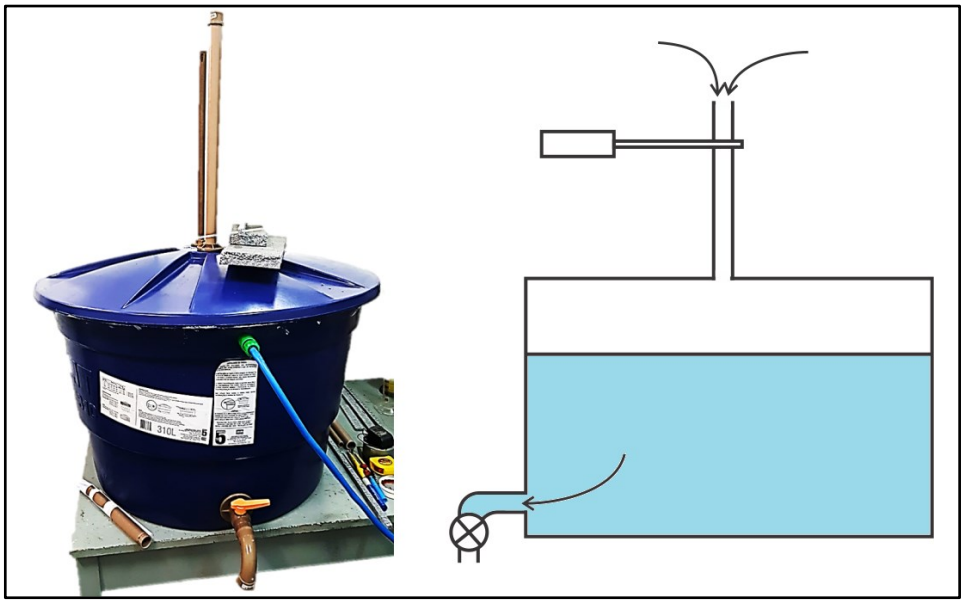
Fonte: Autor

A aquisição do sinal do transdutor de velocidade é realizada com o mesmo módulo de termopares presente na plataforma CompactDAQ, entretanto, um arranjo de resistores fora utilizado para se converter o sinal de corrente em sinal de tensão.

A calibração do transdutor foi realizada por meio de um reservatório hermético de 310 litros, o qual pode ser visto na Fig 77. Este, por sua vez, foi preenchido com água, de forma que com a abertura de uma válvula, a água é escoada para fora do reservatório e o mesmo é preenchido por ar proveniente de apenas uma única entrada, a tubulação de calibração.

A tubulação de calibração conta com uma sessão de estabilização do escoamento, evitando assim que o ar adentre de forma turbulenta, uniformizando o escoamento para a correta calibração do transdutor.

Figura 77 – Reservatório utilizado na calibração do transdutor de velocidade

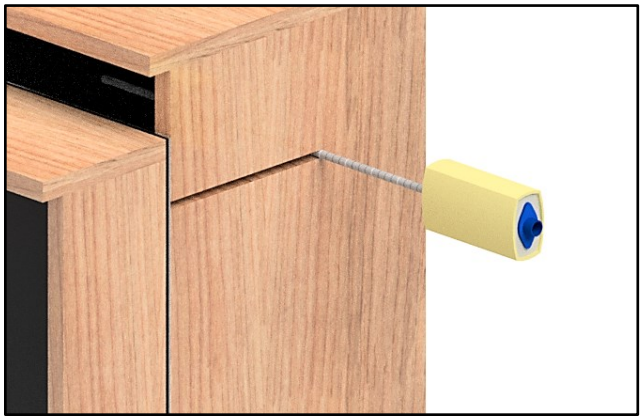


Fonte: Autor

Conhecendo-se a vazão de água drenada, pode-se inferir a velocidade de calibração utilizando-se sempre a propagação das incertezas de medição. Desta forma, identifica-se possíveis erros sistemáticos e aleatórios, comparando-os com a curva de calibração informada pelo fornecedor.

O transdutor de velocidade quando implementado na chaminé possui a função de varrer a seção transversal identificando o gradiente de velocidade do escoamento. Para atingir este objetivo, oblongos foram criados conforme a Fig. 78 em uma das laterais de madeira da chaminé solar, de tal forma que uma mesa coordenada permitisse sua movimentação precisa e suave.

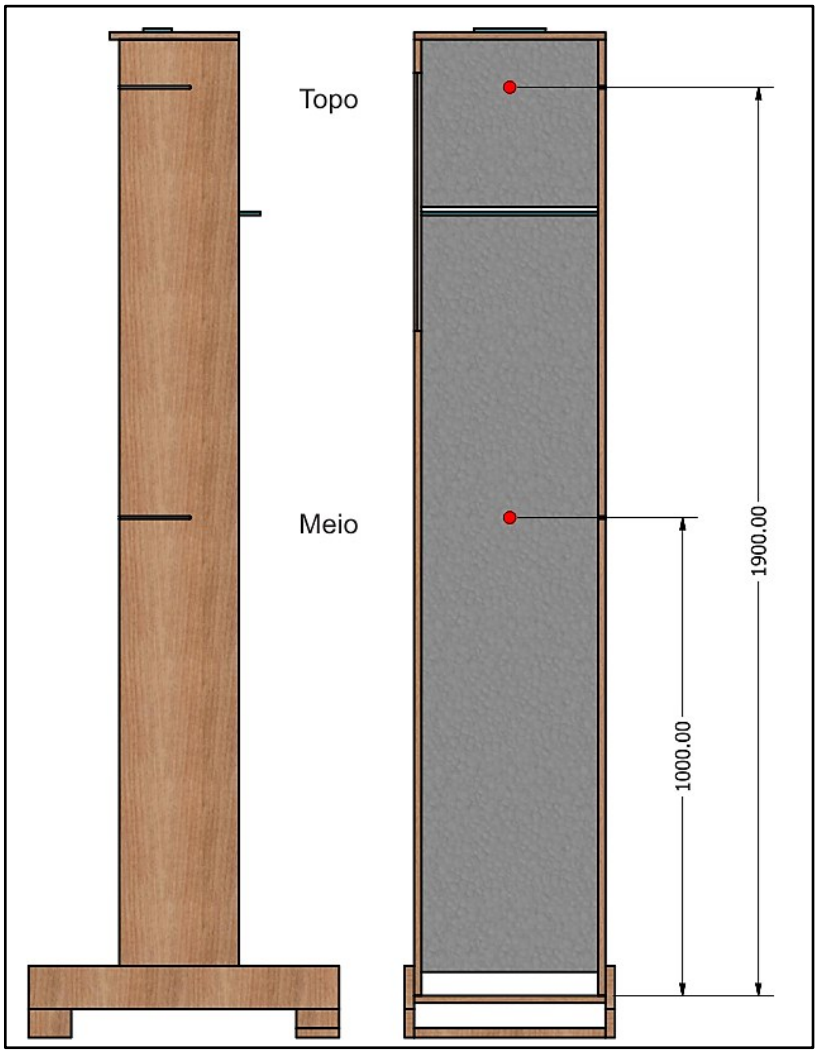
Figura 78 - Oblongo na lateral da chaminé para translação do transdutor de velocidade



Fonte: Autor

Para uma análise completa do funcionamento da chaminé proposta, os oblongos destinados à varredura foram construídos tanto a montante da obstrução (meio), quanto a jusante (topo), conforme ilustrado na Fig. 79, auxiliando no processo de verificação da vazão através da entrada superior.

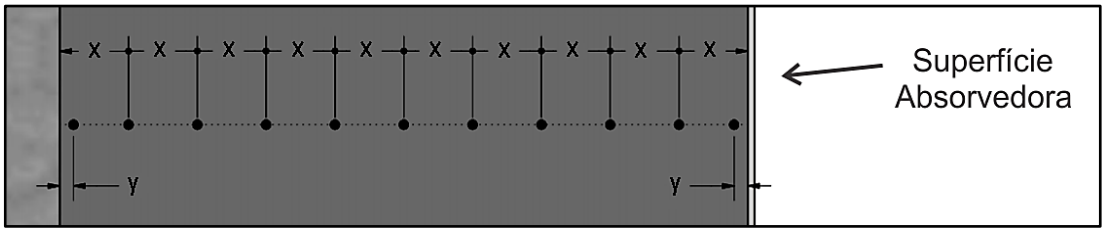
Figura 79 - Pontos de aquisição dos gradientes, dimensões em milímetros



Fonte: Autor

Durante os experimentos, foram utilizados 11 pontos para as varreduras, sendo 9 deles igualmente espaçados internamente à cavidade, e os 2 pontos restantes, sendo posicionados em ambas as extremidades de forma a obter uma varredura conforme Fig. 80 com os valores de incremento da Tab. 5 referentes as configurações com a chaminé de profundidade de 50 mm e de 150 mm.

Figura 80 - Pontos utilizados para varredura dos gradientes do escoamento



Fonte: Autor

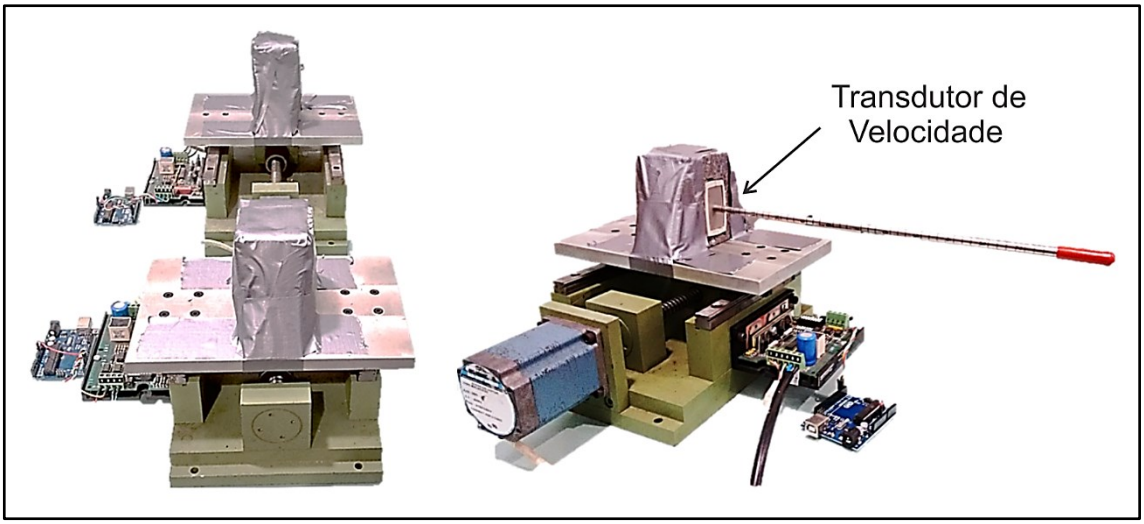
Tabela 5 - Valores dos incrementos para a varredura na cavidade

	Profundidade da cavidade	
	50 mm	**150 mm**
X	5	15
Y	3	3

Fonte: Autor

A mesa coordenada possui guias lineares em sua construção e transmissão por fuso de esferas conforme Fig. 81, sendo acionada por um motor de passo capaz de fornecer 200 passos por revolução. Sua combinação com uma placa programável Arduino UNO torna possível atingir incrementos individuais da ordem de 0,0125 mm por passo, garantindo controle total da posição da sonda.

Figura 81 – Conjunto de mesas coordenadas com seus controladores Arduino UNO



Fonte: Autor

As indicações coletadas através do transdutor de velocidade foram referenciadas neste trabalho como velocidade pontual do escoamento (VpE).

3.4.2 Medição das temperaturas

A partir de um rolo de termopar do tipo K, produziu-se sondas de acordo com os comprimentos necessários, unindo os materiais dos fios condutores, neste caso, Cromel (Cromo-Níquel) e Alumel (Alumínio-Níquel) através de uma soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*) em baixa corrente, sem adição de outros materiais, resultando em uma junção exposta de alta confiabilidade conforme mostrada na Fig. 82.

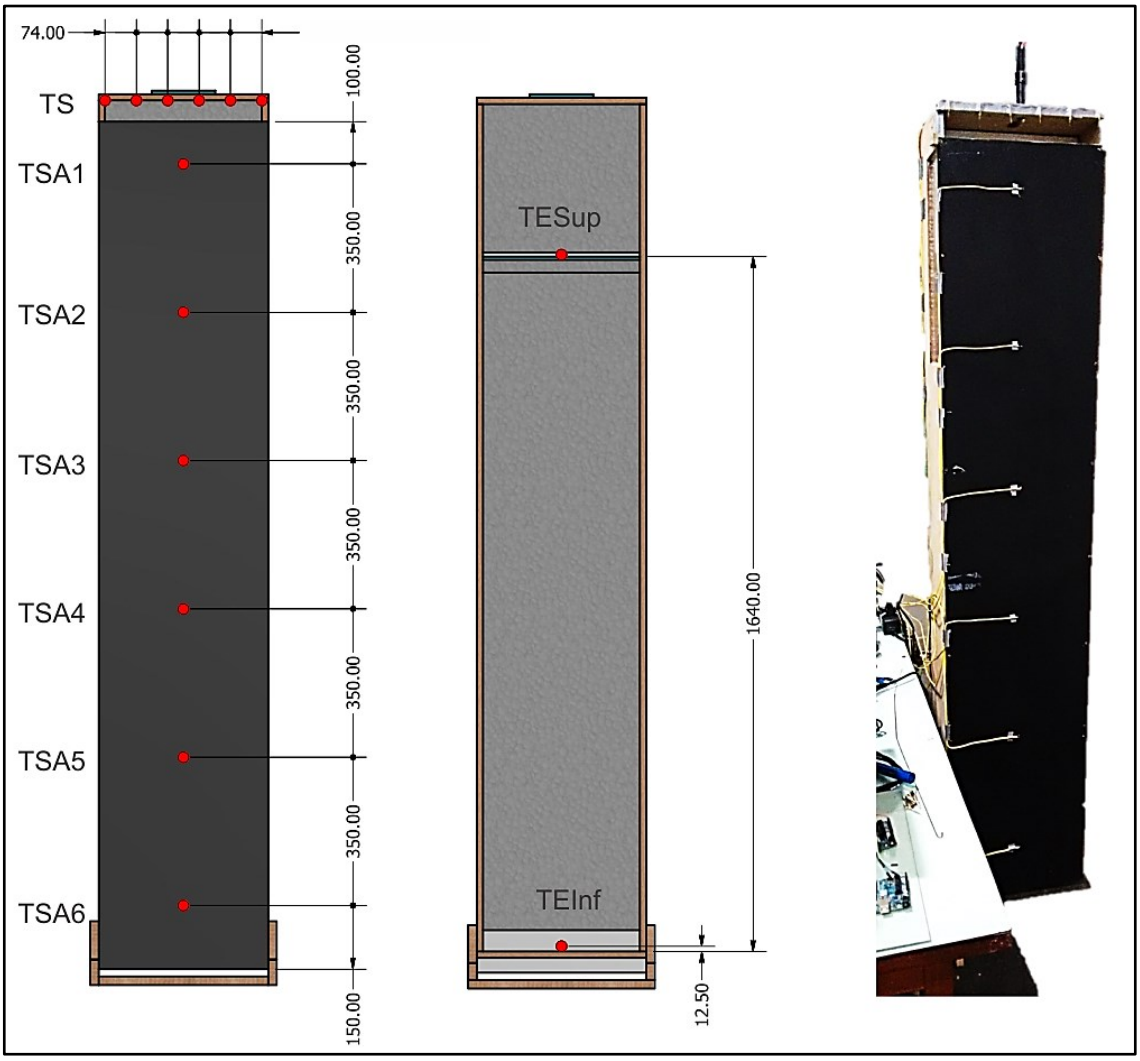
Figura 82 - Junção do Termopar desenvolvida sem adição de outros materiais

Fonte: Autor

As sondas foram então submetidas à algumas temperaturas entre 25 °C e 70 °C utilizando-se um forno de calibração e um termômetro de resistência padrão como referência. As temperaturas escolhidas buscam contemplar a faixa de operação da chaminé solar durante os experimentos, identificando-se os erros sistemáticos e aleatórios presentes, corrigindo-os posteriormente.

Tais sondas foram inseridas em pontos específicos da chaminé solar conforme Fig. 83, aferindo a temperatura nas duas entradas de ar (TESup e TEInf), saída da cavidade (TS), bem como ao longo de 6 pontos da altura da superfície absorvedora (TSA1 no topo até TSA6 na base). A temperatura ambiente (Tamb) e a temperatura da resistência de aquecimento (TRAq) também foram aferidas para fins de controle do experimento.

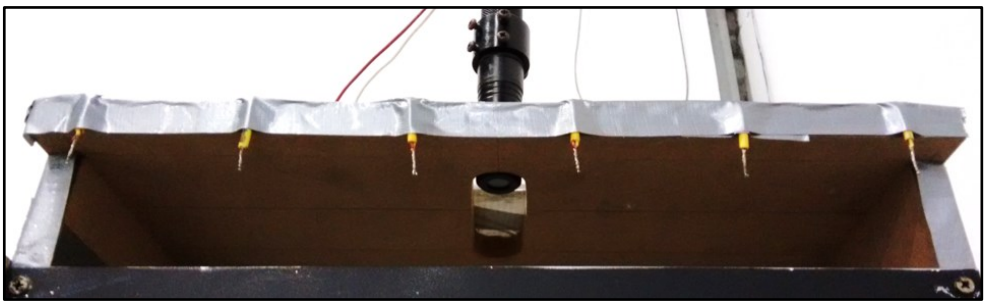
Figura 83 - Termopares na parte frontal e traseira da chaminé solar, dimensões em milímetros



Fonte: Autor

Em particular, na medição da temperatura na sessão de saída da cavidade, empregou-se o conceito de termopilha, utilizando-se de um arranjo paralelo de 6 termopares do tipo K, sendo distribuídos conforme Fig. 84 com o intuito de se registrar uma temperatura média da sessão.

Figura 84 - Distribuição dos termopares que compõem o arranjo de termopilha



Fonte: Autor

Uma sonda a partir de um rolo de termopar tipo T fino (marca Omega com 0,003” de diâmetro) foi produzida de maneira similar as demais, fundindo-se os fios de Cobre e Constantan (Cobre-Níquel) sem adição de outro material. Esta sonda em especial fora utilizada para promover uma varredura ao longo da sessão transversal da cavidade, coletando a temperatura pontual do escoamento (TpE) e levantando assim, o perfil de temperatura em duas alturas da chaminé.

Para a realização desta tarefa, o termopar tipo T fora fixado juntamente ao transdutor de velocidade, utilizando-se do mesmo mecanismo da mesa coordenada para sua translação e garantindo um excelente controle da posição da sonda. Entretanto, o transdutor de velocidade utilizado conta com dois termômetros de resistência, sendo um reservado à medição da temperatura ambiente para posterior compensação e o outro destinado a medição de velocidade do escoamento através da convecção gerada pelo mesmo, sendo aquecido inicialmente em 30 °C relativo à temperatura ambiente de referência registrada pelo primeiro sensor. Portanto, o transdutor de velocidade fora desligado no processo de aquisição dos gradientes de temperatura para que não houvesse a influência de seu aquecimento.

Para atender todas as sondas necessárias nos experimentos, 4 módulos NI 9211 foram instalados na plataforma CompactDAQ cDAQ9172, sendo cada um capaz de receber sinais de ± 80 mV de até 4 termopares, totalizando assim, 16 sinais independentes para o conjunto utilizado.

O gradiente de temperatura ao longo de algumas superfícies específicas pôde ser avaliado através da utilização de uma câmera termográfica de resolução equivalente a 320 x 240 pixels modelo FLIR T450sc, sendo posteriormente tratados a fim de se extrair informações como temperatura máxima, mínima e média de uma região em particular.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A execução dos métodos propostos foi constituída de duas etapas principais, sendo a primeira o processo de calibração de toda a instrumentação fixa ou móvel implementada na chaminé solar e a segunda a realização dos experimentos contemplando as variações propostas.

Uma análise dos resultados pôde ser realizada posteriormente, discorrendo sobre os dados coletados e comparando-os com a literatura vigente. Vale notar que, a primeira etapa é de suma importância, visto que sem o devido cuidado, comprometeria todos os resultados da segunda etapa, bem como de todo o estudo aqui mostrado.

4.1 CALIBRAÇÃO DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

Os processos de calibração foram realizados entre os dias 30 de Janeiro de 2017 e 3 de Fevereiro de 2017, ocorrendo no próprio Centro Universitário FEI.

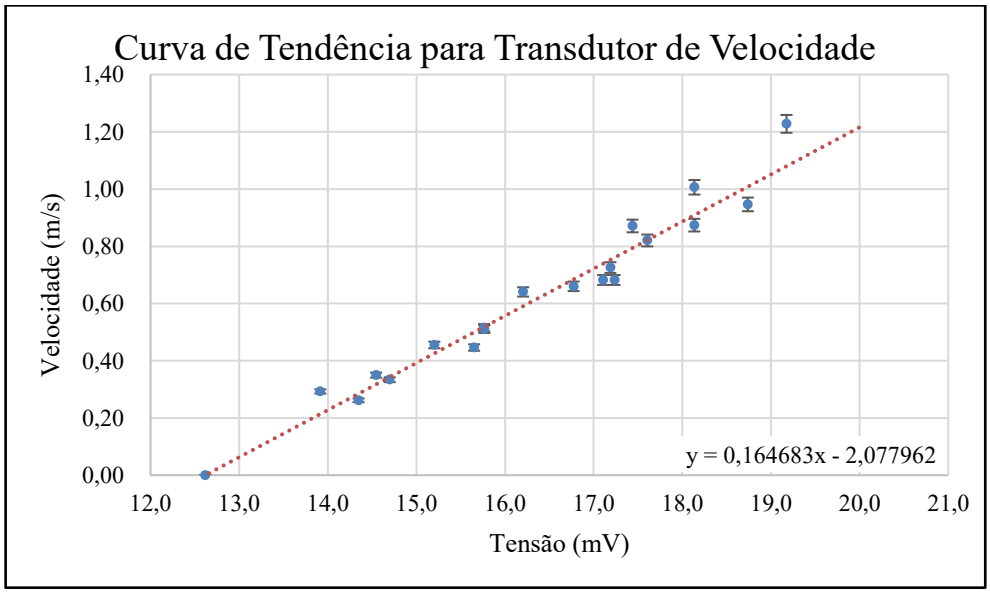
4.1.1 Calibração do transdutor de velocidade

A calibração do transdutor de velocidade foi realizada coletando-se sua tensão correspondente com o auxílio de uma associação de resistores, ao passo que a tensão foi medida sobre uma resistência equivalente de 3,237 Ω, portanto, para um sinal enviado pelo transdutor de 4 mA a 20 mA, a aquisição da tensão pela plataforma CompactDAQ fica restrita à uma indicação de 12,948 mV a 64,740 mV, podendo ser coletado pelo módulo NI 9211.

Através de cálculos preliminares, identificou-se uma variação esperada do nível do reservatório de apenas 0,16 $mm.s^{-1}$ em sua altura, o que pode ser simplificado como um tanque de grandes dimensões, sem variação significativa de pressão hidrostática na válvula.

Um volume de 20 litros de água foi coletado por vez, promovendo a aquisição de um número de indicações (*samples*) correspondente ao tempo decorrido para esta tarefa (dependente da vazão ajustada na válvula do reservatório), desta forma, pôde-se levantar uma curva de tendência transferindo-se as incertezas das indicações de tensão para a incerteza da velocidade conforme ilustrado na Fig. 85.

Figura 85 - Curva de tendência para o transdutor de velocidade OMEGA



Fonte: Autor

Devido ao processo de linearização dada pelo transdutor, a curva de tendência resultou em algo extremamente próximo à uma função linear, cujos coeficientes e suas incertezas podem ser vistos na Tab. 6.

Tabela 6 - Coeficientes e incertezas da curva de tendência do transdutor de velocidade

y=ax+b	
a	0.164683
b	-2.077962
μa	0.000960
μb	0.012111

Fonte: Autor

Através de uma comparação entre os resultados da curva de tendência e os valores calculados para a velocidade através da vazão (levando-se em consideração as incertezas atreladas), concluiu-se que a incerteza do transdutor de velocidade é de ± 0,06 $m.s^{-1}$, valor suficientemente compatível com os estudos aqui vigentes.

4.1.2 Calibração dos termopares

A calibração dos termopares contemplou a faixa esperada de temperatura para a chaminé solar, ou seja, de 25 °C à 70 °C, para tanto, com a utilização do forno de calibração, manteve-se a temperatura constante em 5 pontos nesta faixa, nos quais o termômetro de resistência utilizado como referência retornou os valores de 26,3 °C, 35,8 °C, 45,9 °C, 55,9 °C e 65,8 °C. Foram coletadas cerca de 300 indicações (*samples*) ao longo do tempo para todas as sondas, bem como para todos os 5 pontos, possibilitando o levantamento de uma curva de calibração para cada termopar.

O erro máximo apresentado pelas sondas nesta faixa de aplicação foi de ± 0,8 °C, valor perfeitamente aceitável para utilização nos experimentos.

Já a calibração da câmera termográfica é realizada no instante que se liga o equipamento, aguardando-se 5 minutos até o término da rotina de calibração automática. O fabricante indica que o uso adequado do equipamento resulta em uma incerteza na medição de no máximo ± 1,0 °C.

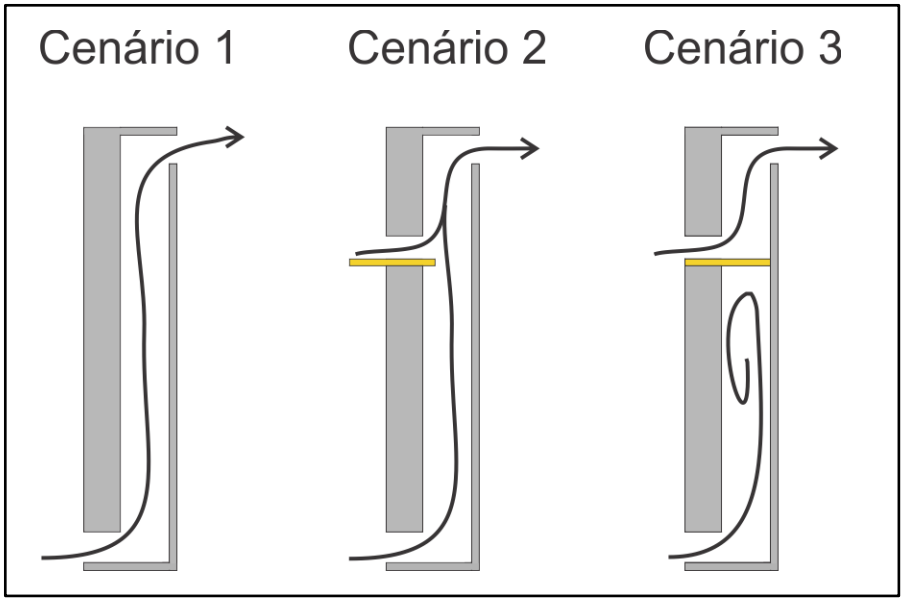
4.2 EXPERIMENTOS

Os experimentos finais foram realizados entre os dias 24 de Abril de 2018 e 28 de Abril de 2018 nas dependências do Centro Universitário FEI, contemplando as variações de profundidade da cavidade, bem como as diversas obstruções.

Uma nomenclatura será utilizada para a identificação das configurações, sendo representada pelo valor da profundidade da cavidade seguida de um hífen e do valor de abertura na sessão de obstrução ou indicação de configuração convencional, por exemplo a configuração "50-20" e "50-Convencional".

As configurações aqui estudadas podem ser divididas em 3 cenários distintos conforme Fig. 86, sendo o primeiro, um escoamento típico de uma chaminé solar vertical com uma entrada e uma saída (configuração convencional), já no segundo cenário, a chaminé proposta com duas entradas e uma saída variando-se a obstrução da cavidade e por fim, o terceiro cenário considerando a chaminé proposta, porém com abertura nula (configurações 50-0 e 150-0).

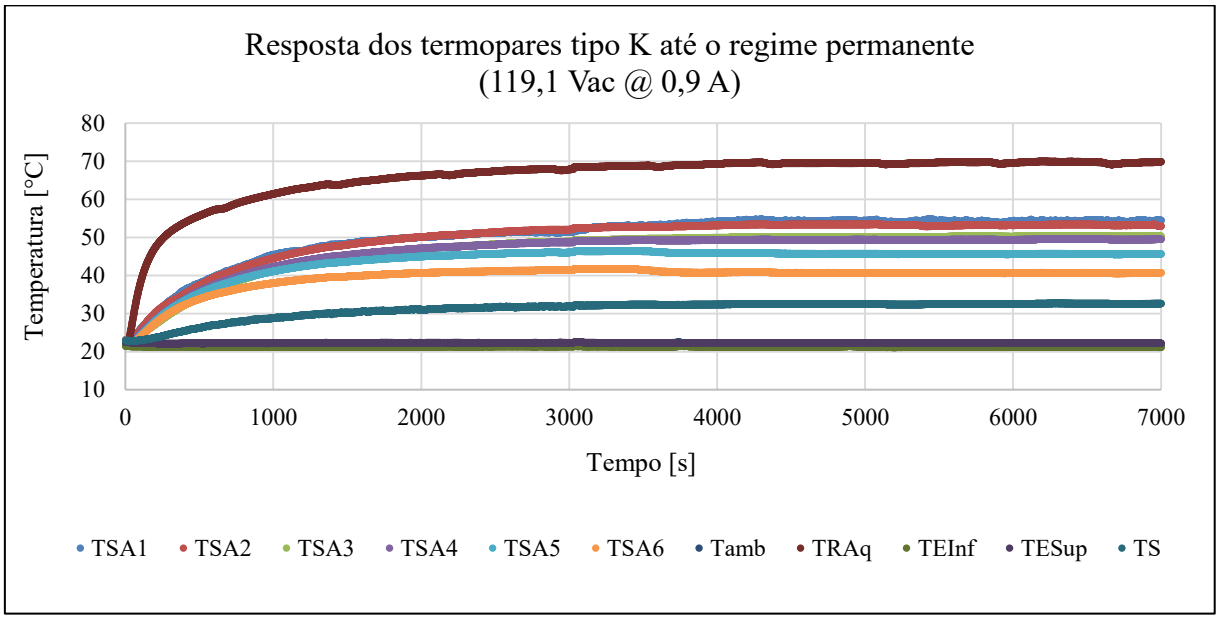
Figura 86 – Cenários propostos neste trabalho



Fonte: Autor

Para a correta comparação entre todos os cenários aqui propostos, as indicações dos termopares foram observadas em tempo real desde o acionamento do conjunto de aquecimento, de forma a se observar o transiente de transmissão de calor até a devida estabilização em regime permanente, obtendo o desenvolvimento conforme a Fig. 87.

Figura 87 – Resposta dos termopares tipo K até o regime permanente



Fonte: Autor

Pôde-se, portanto, notar que o regime permanente se estabelece após cerca de 4500 segundos, ou seja, 1 hora e 15 minutos após o acionamento do conjunto de aquecimento.

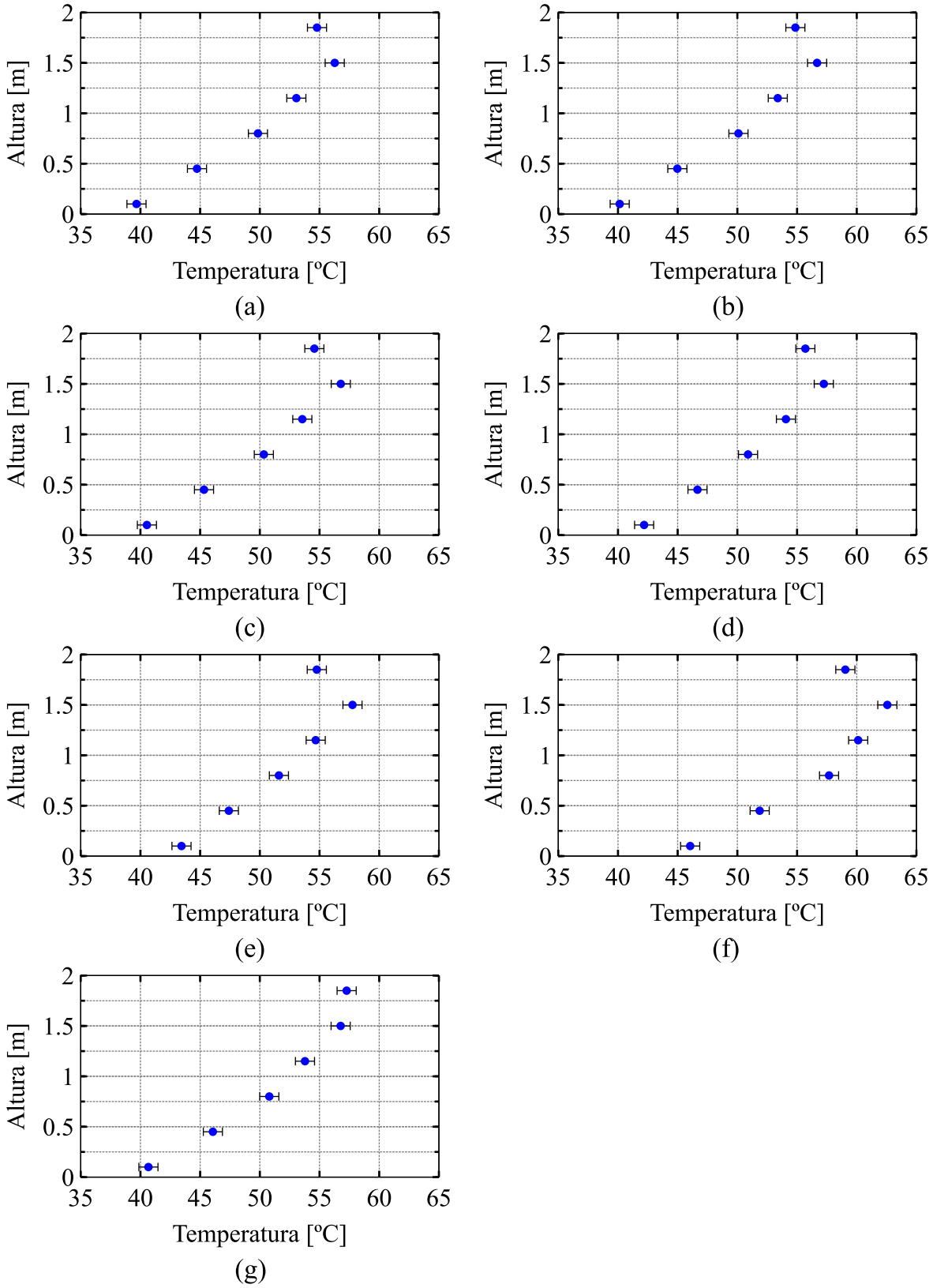
Este procedimento de verificação do regime permanente foi executado a cada variação física realizada na chaminé solar, esperando-se o tempo necessário para que o sistema se estabilizasse após a perturbação causada.

4.2.1 Perfis de temperatura

Com o regime permanente garantido, os testes puderam ser realizados, iniciando-se com a chaminé solar com profundidade de cavidade em 50 mm e depois em 150 mm.

Ambos os casos foram testados com as configurações de chaminé convencional e com as devidas variações da placa de obstrução para aa chaminé proposta. Os perfis de temperatura ao longo da superfície absorvedora, formados pelos termopares TSA1, TSA2, TSA3, TSA4, TSA5 e TSA6 puderam ser coletados para a configuração de 50 mm, resultando na Fig. 88.

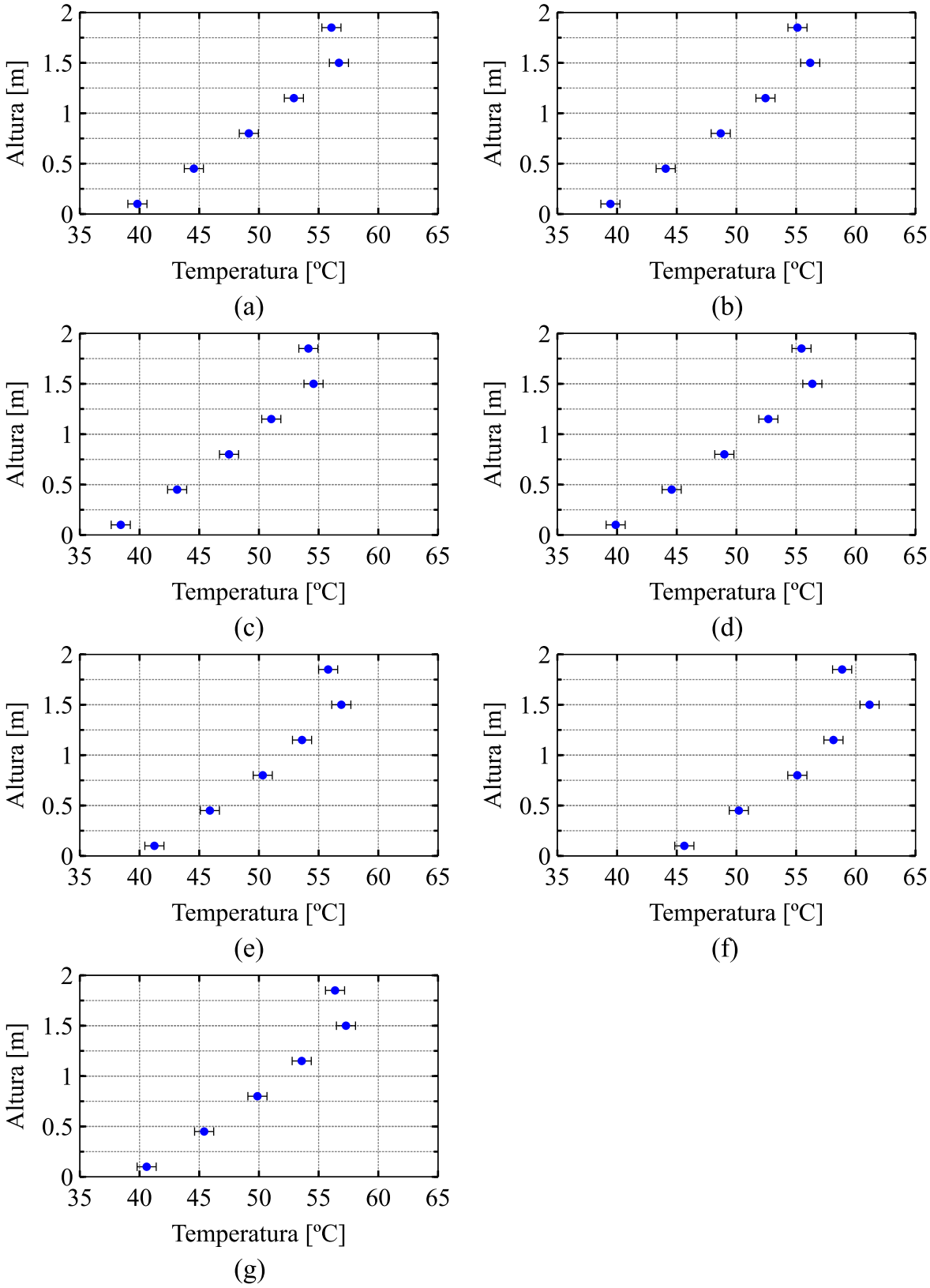
Figura 88 – Perfil de temperatura na superfície absorvedora para chaminé com profundidade de 50 mm e abertura na obstrução de 50 mm (a), 40 mm (b), 30 mm (c), 20 mm (d), 10 mm (e) e 0 mm (f), bem como configuração convencional (g)



Fonte: Autor

Analogamente, tem-se para a configuração de 150 mm a distribuição da Fig. 89.

Figura 89 – Perfil de temperatura na superfície absorvedora para chaminé com profundidade de 150 mm e abertura na obstrução de 150 mm (a), 120 mm (b), 90 mm (c), 60 mm (d), 30 mm (e) e 0 mm (f), bem como configuração convencional (g)



Fonte: Autor

Já as temperaturas das entradas e saída da cavidade (TEInf, TESup e TS), bem como a temperatura da resistência de aquecimento (TRAq) para a chaminé solar com profundidade de 50 mm e 150 mm podem ser vistas na Tab. 7 e Tab. 8, respectivamente.

Tabela 7 - Temperaturas das entradas, saída e da resistência de aquecimento para as configurações com chaminé solar de profundidade 50 mm

		TRAq	TEInf	TESup	TS
		[°C]			
Convencional	Média das Indicações	71.16	21.81	22.55	31.91
	Incerteza	0.80	0.80	0.80	0.80
Abertura 50 mm	Média das Indicações	70.15	21.62	23.08	31.16
	Incerteza	0.80	0.80	0.80	0.80
Abertura 40 mm	Média das Indicações	70.63	21.34	21.59	30.87
	Incerteza	0.80	0.80	0.80	0.80
Abertura 30 mm	Média das Indicações	70.64	21.24	21.45	31.06
	Incerteza	0.80	0.80	0.80	0.80
Abertura 20 mm	Média das Indicações	70.03	22.18	23.24	33.42
	Incerteza	0.80	0.80	0.80	0.80
Abertura 10 mm	Média das Indicações	70.94	21.95	22.41	34.20
	Incerteza	0.80	0.80	0.80	0.80
Abertura 0 mm	Média das Indicações	76.06	21.81	21.86	32.40
	Incerteza	0.80	0.80	0.80	0.80

Fonte: Autor

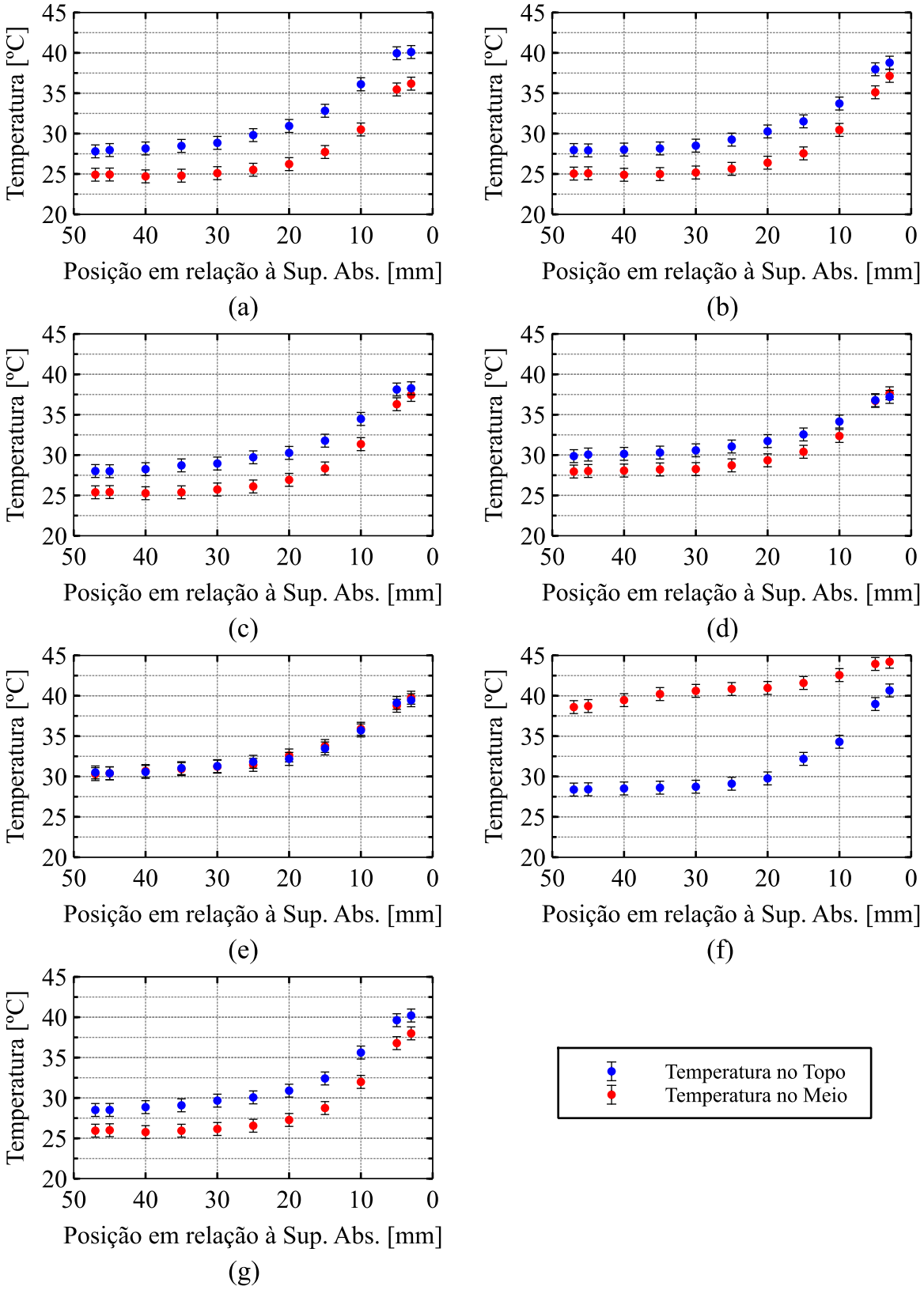
Tabela 8 - Temperaturas das entradas, saída e da resistência de aquecimento para as configurações com chaminé solar de profundidade 150 mm

		TRAq	TEInf	TESup	TS
		[°C]			
Convencional	Média das Indicações	69.69	23.15	23.77	31.91
	Incerteza	0.80	0.80	0.80	0.80
Abertura 150 mm	Média das Indicações	69.35	22.31	23.60	31.08
	Incerteza	0.80	0.80	0.80	0.80
Abertura 120 mm	Média das Indicações	68.75	22.13	23.58	30.87
	Incerteza	0.80	0.80	0.80	0.80
Abertura 90 mm	Média das Indicações	67.26	21.58	23.31	29.92
	Incerteza	0.80	0.80	0.80	0.80
Abertura 60 mm	Média das Indicações	68.59	22.49	24.08	31.78
	Incerteza	0.80	0.80	0.80	0.80
Abertura 30 mm	Média das Indicações	69.86	23.16	23.86	34.10
	Incerteza	0.80	0.80	0.80	0.80
Abertura 0 mm	Média das Indicações	74.23	23.31	23.83	32.92
	Incerteza	0.80	0.80	0.80	0.80

Fonte: Autor

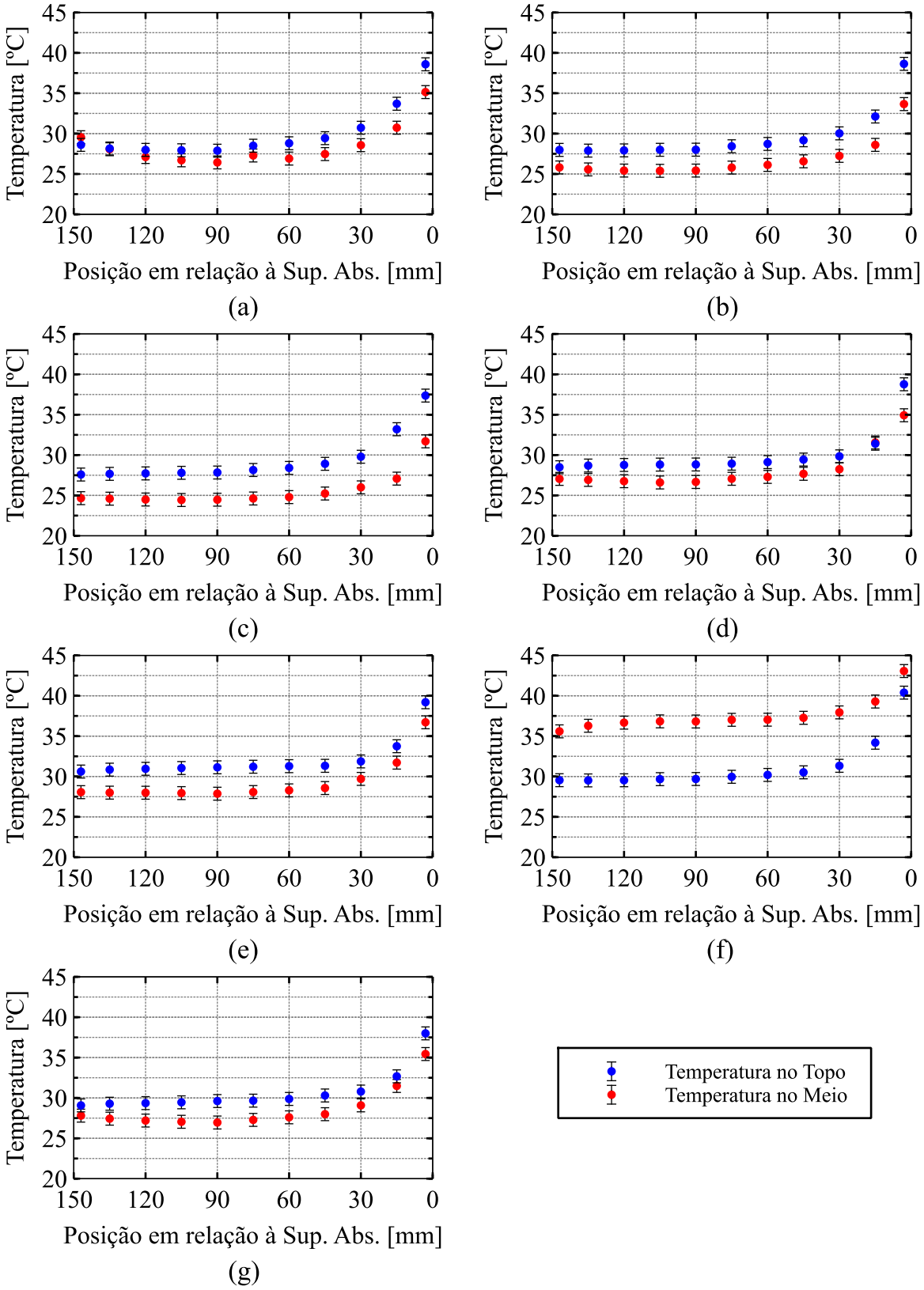
Com a utilização do termopar tipo T em conjunto com a mesa coordenada, pôde-se levantar o perfil de temperatura do escoamento na sessão transversal da cavidade, tanto para a porção à montante da obstrução (localizado próximo ao meio da altura da chaminé), quanto à jusante (localizado na porção do topo), resultando nos perfis da Fig. 90 e Fig. 91 para as configurações de 50 mm e 150 mm, respectivamente.

Figura 90 - Perfil de temperatura no escoamento para chaminé com profundidade de 50 mm e abertura na obstrução de 50 mm (a), 40 mm (b), 30 mm (c), 20 mm (d), 10 mm (e) e 0 mm (f), bem como configuração convencional (g)



Fonte: Autor

Figura 91 - Perfil de temperatura no escoamento para chaminé com profundidade de 150 mm e abertura na obstrução de 150 mm (a), 120 mm (b), 90 mm (c), 60 mm (d), 30 mm (e) e 0 mm (f), bem como configuração convencional (g)

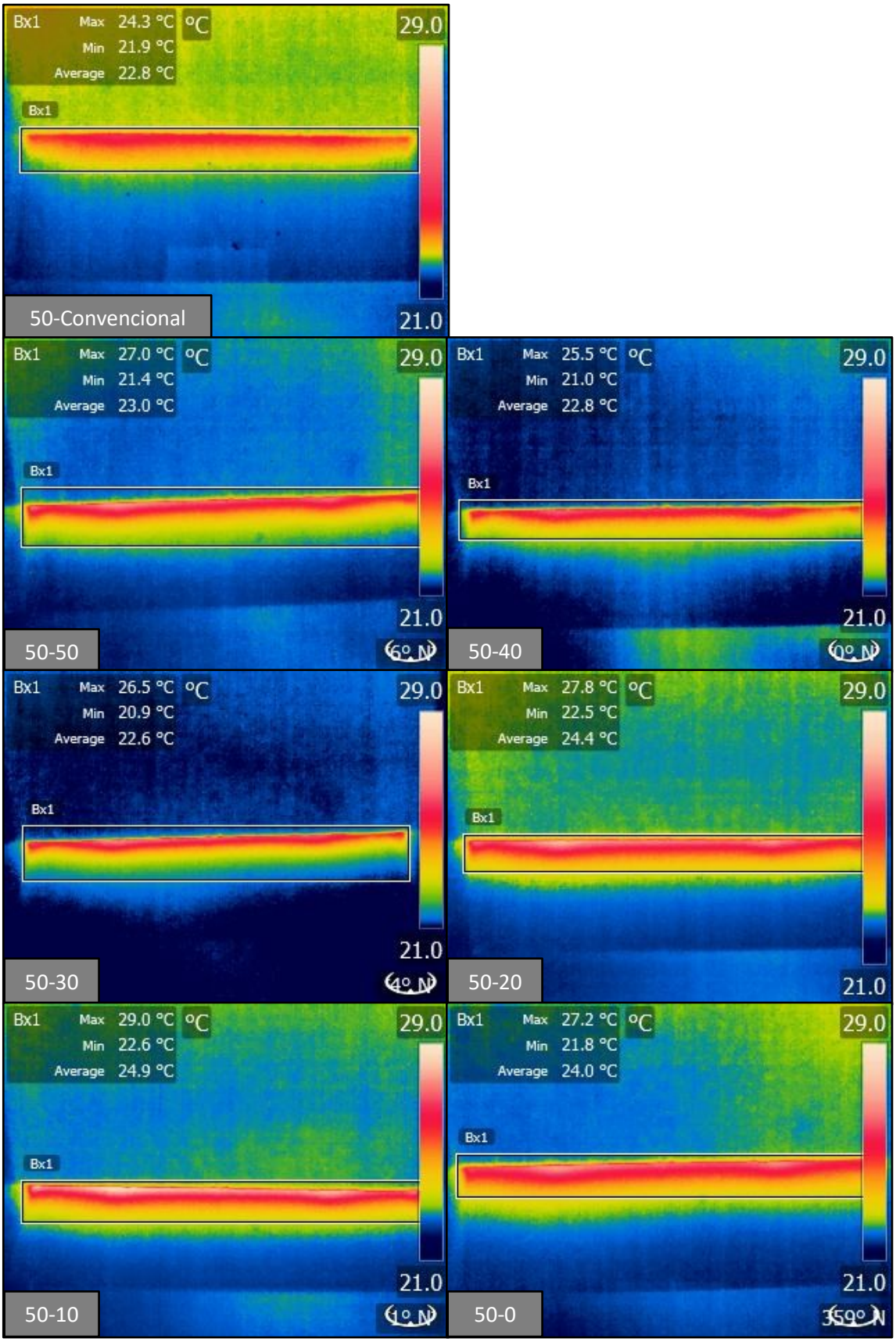


Fonte: Autor

A câmera termográfica possibilitou o registro da distribuição de temperatura em algumas superfícies da chaminé solar. As imagens coletadas foram tratadas no software do fabricante (FLIR) com o intuito de se ajustar a região de interesse e as escalas de cor.

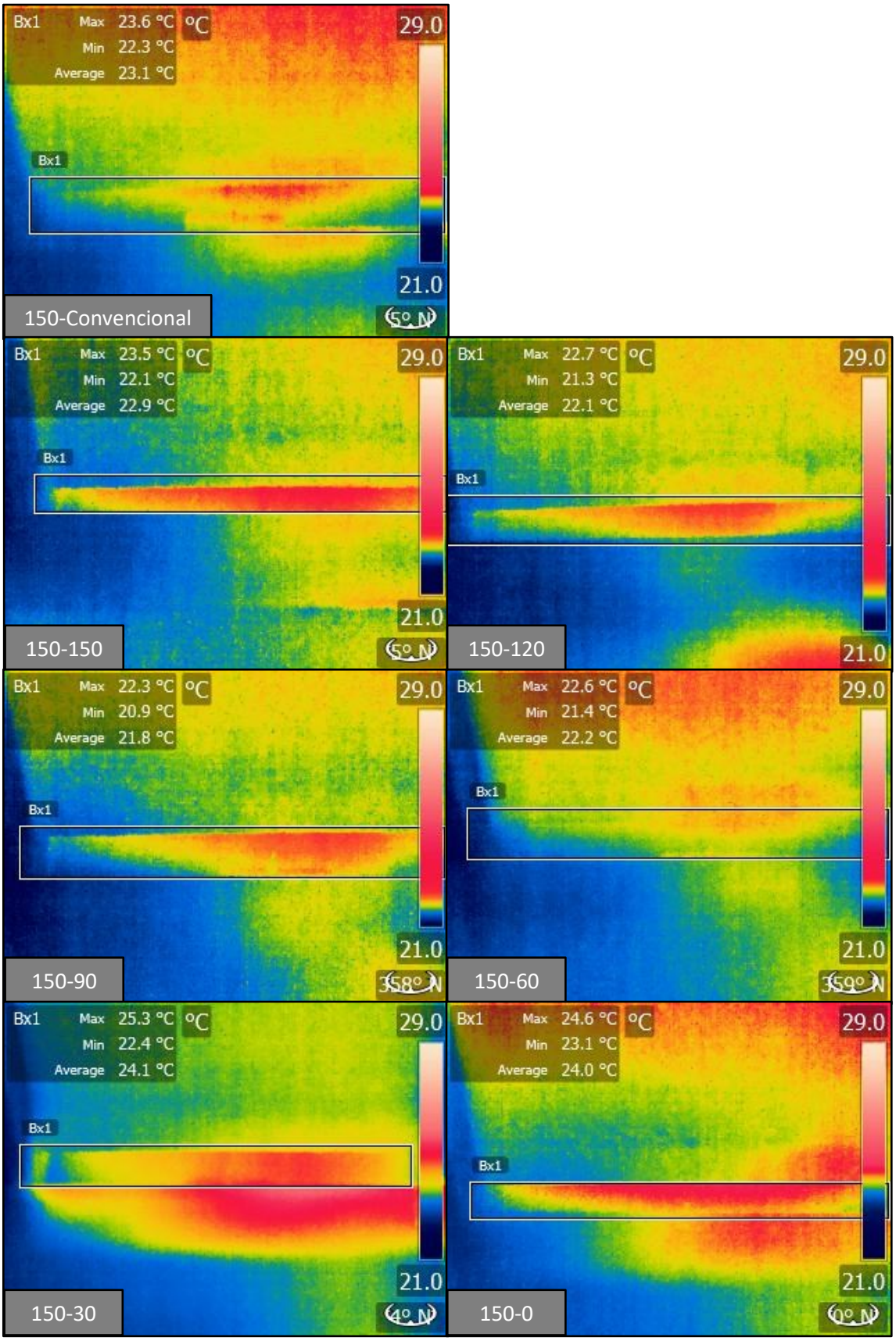
As Fig. 92 e Fig. 93 mostram a distribuição de temperatura na geometria de entrada inferior para a chaminé solar com cavidade de 50 mm e 150 mm de profundidade, respectivamente. Para facilitar o entendimento, uma legenda foi adicionada as imagens, com o primeiro número sendo a profundidade da cavidade e o segundo número a configuração utilizada (chaminé convencional ou o valor de abertura com a placa de obstrução).

Figura 92 - Distribuição de temperatura na entrada inferior para profundidade de 50 mm



Fonte: Autor

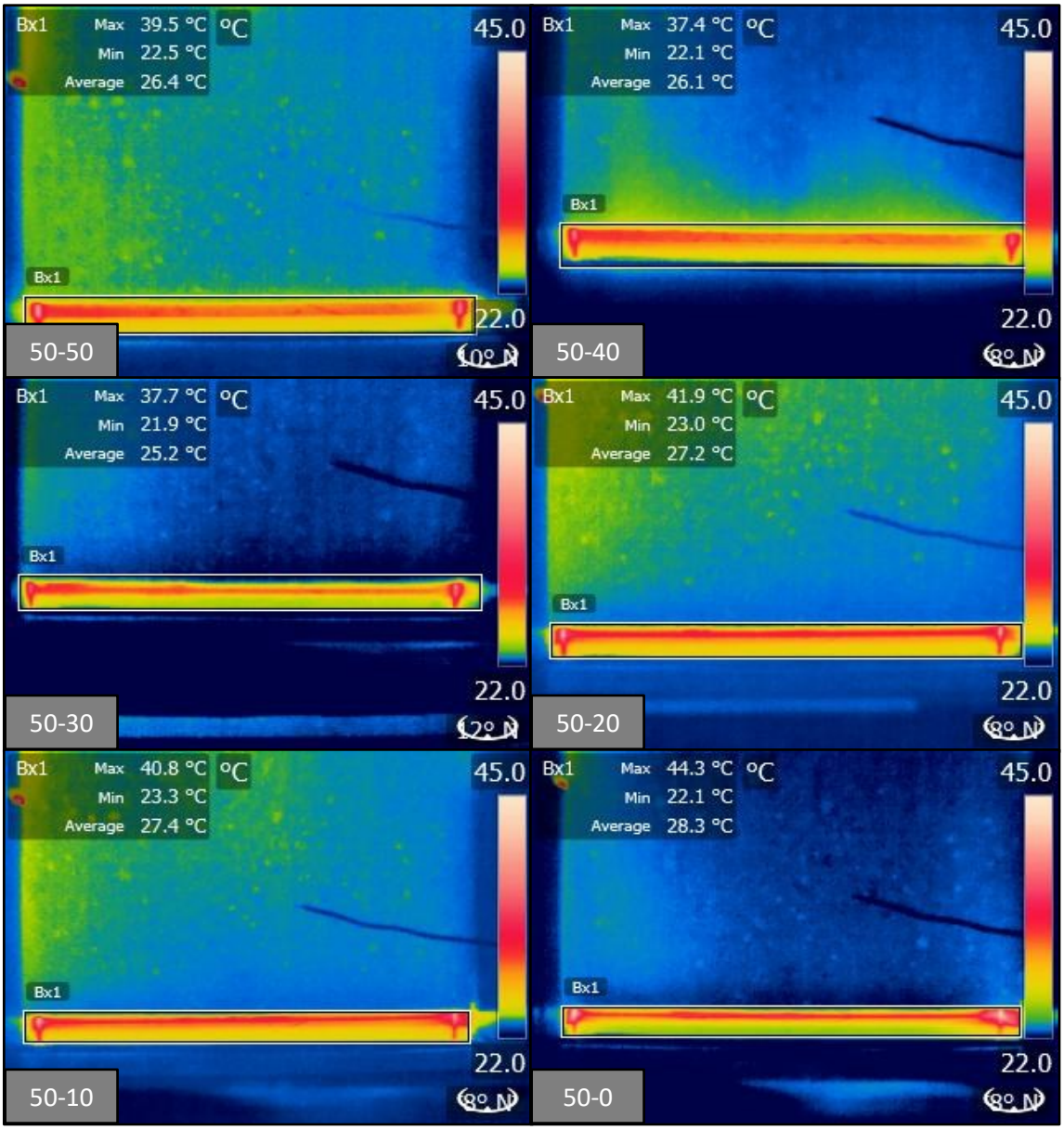
Figura 93 - Distribuição de temperatura na entrada inferior para profundidade de 150 mm



Fonte: Autor

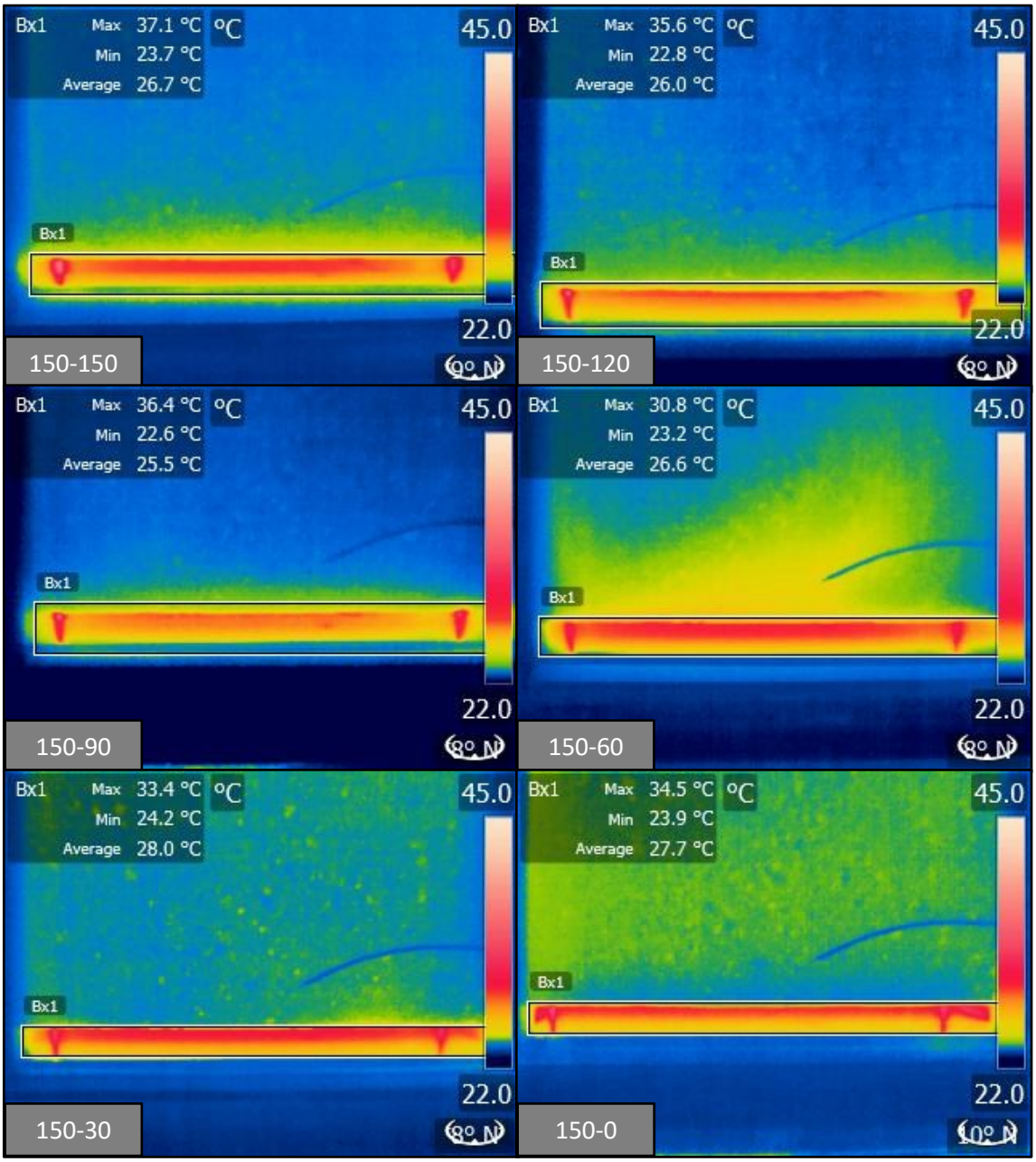
Em seguida, a Fig. 94 e Fig. 95 mostram as distribuições de temperatura para a entrada superior da chaminé solar com profundidade da cavidade de 50 mm e 150 mm, respectivamente.

Figura 94 - Distribuição de temperatura na entrada superior para profundidade de 50 mm



Fonte: Autor

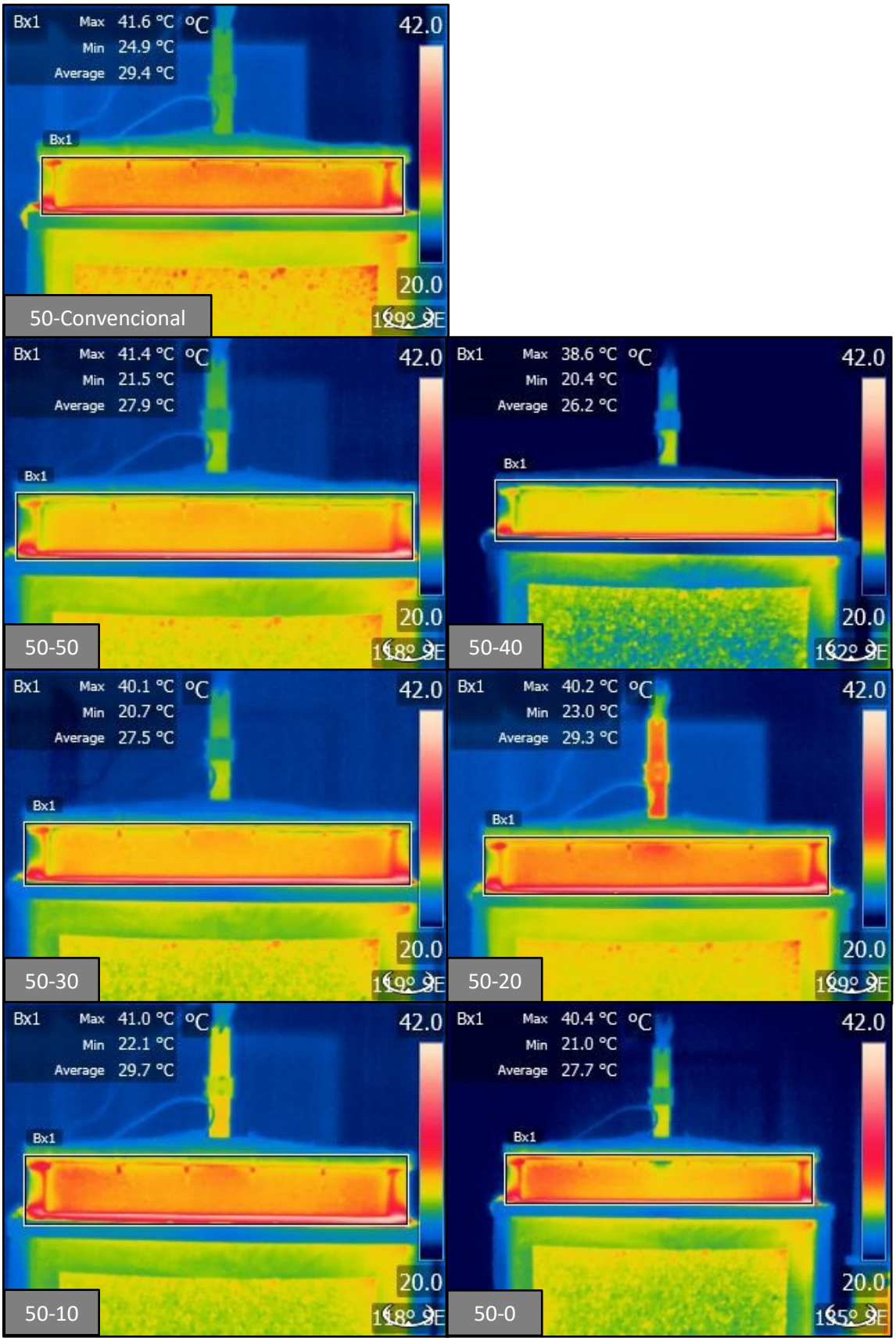
Figura 95 - Distribuição de temperatura na entrada superior para profundidade de 150 mm



Fonte: Autor

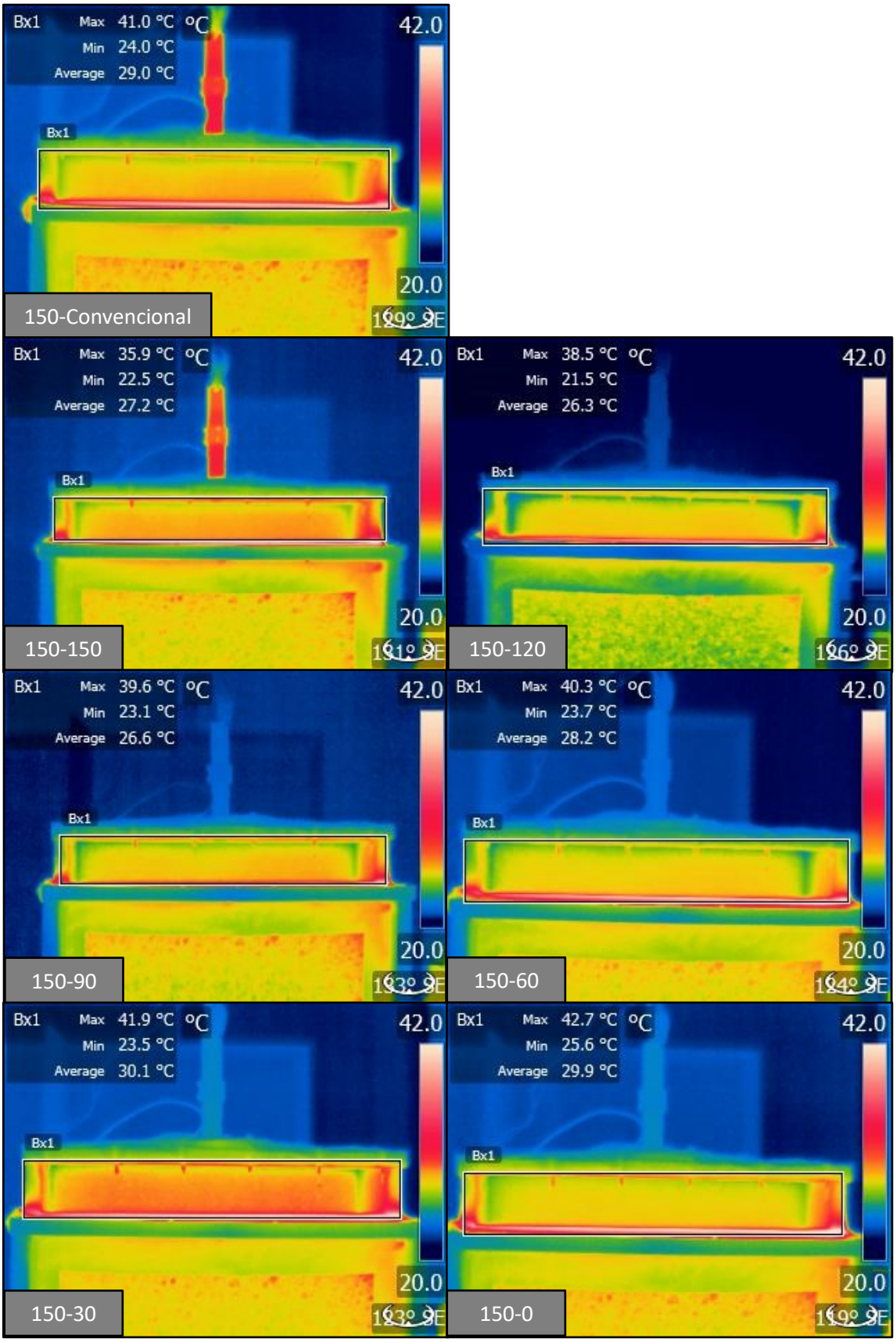
A geometria de saída também foi capturada durante os testes, resultando nas distribuições de temperatura da Fig. 96 e Fig. 97 para a chaminé solar com profundidade da cavidade de 50 mm e 150 mm, respectivamente.

Figura 96 - Distribuição de temperatura na saída para profundidade de 50 mm



Fonte: Autor

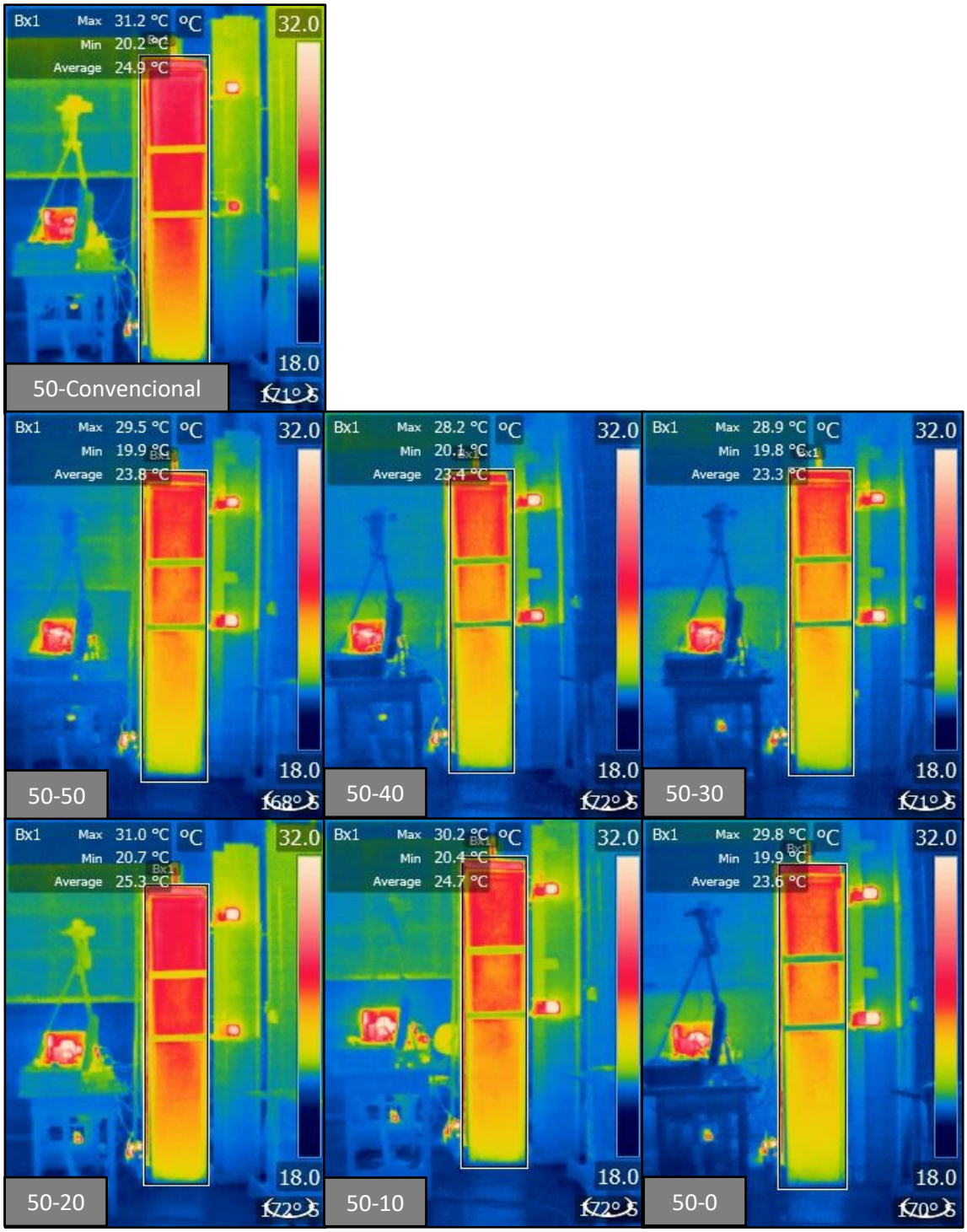
Figura 97 - Distribuição de temperatura na saída para profundidade de 150 mm



Fonte: Autor

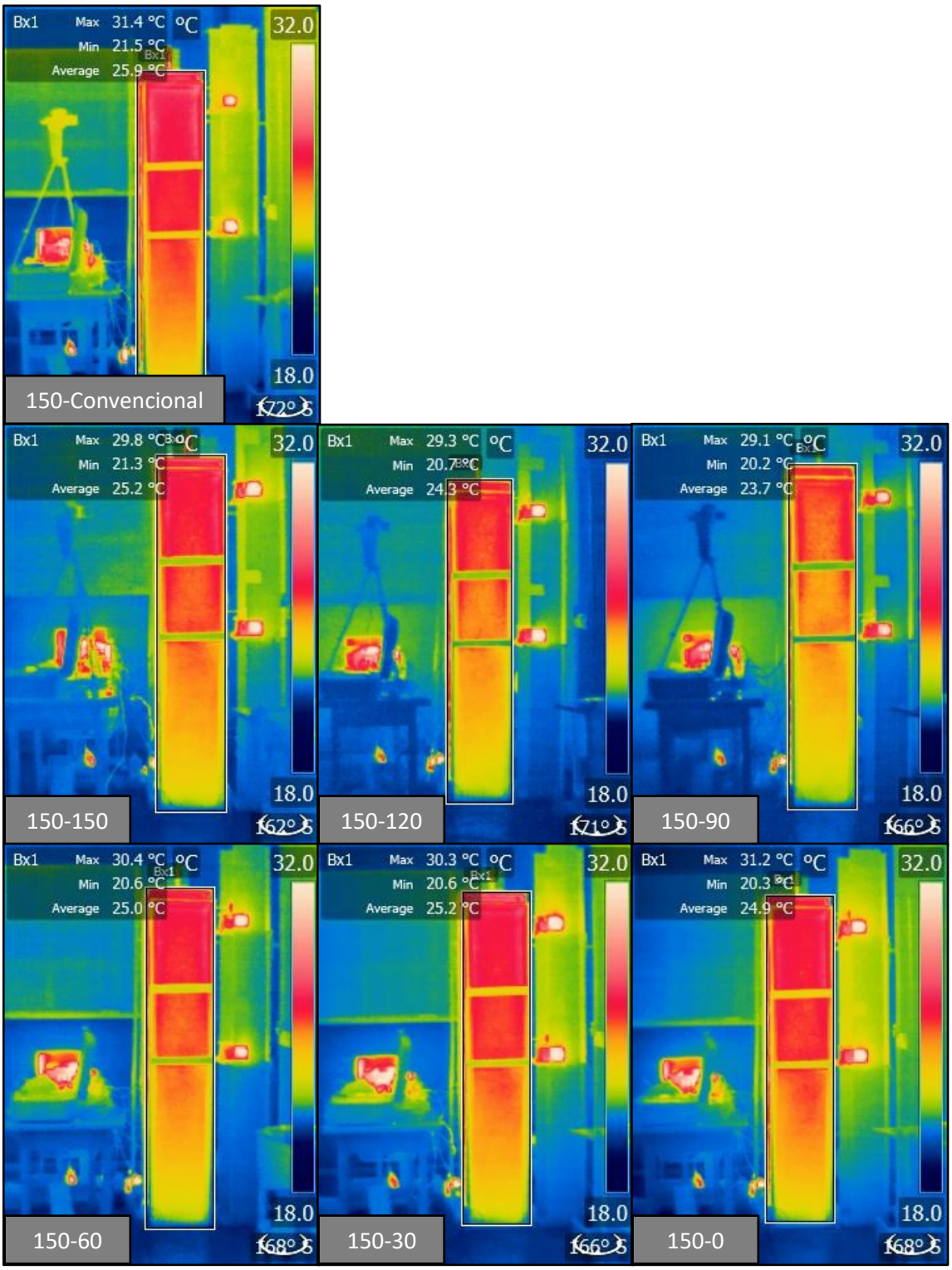
Por fim, a câmera termográfica também pôde registrar a distribuição de temperatura na superfície externa do isolante do conjunto de aquecimento, resultando nas Fig. 98 e Fig. 99.

Figura 98 - Distribuição de temperatura na superfície do isolante para profundidade de 50 mm



Fonte: Autor

Figura 99 - Distribuição de temperatura na superfície do isolante para profundidade de 150 mm

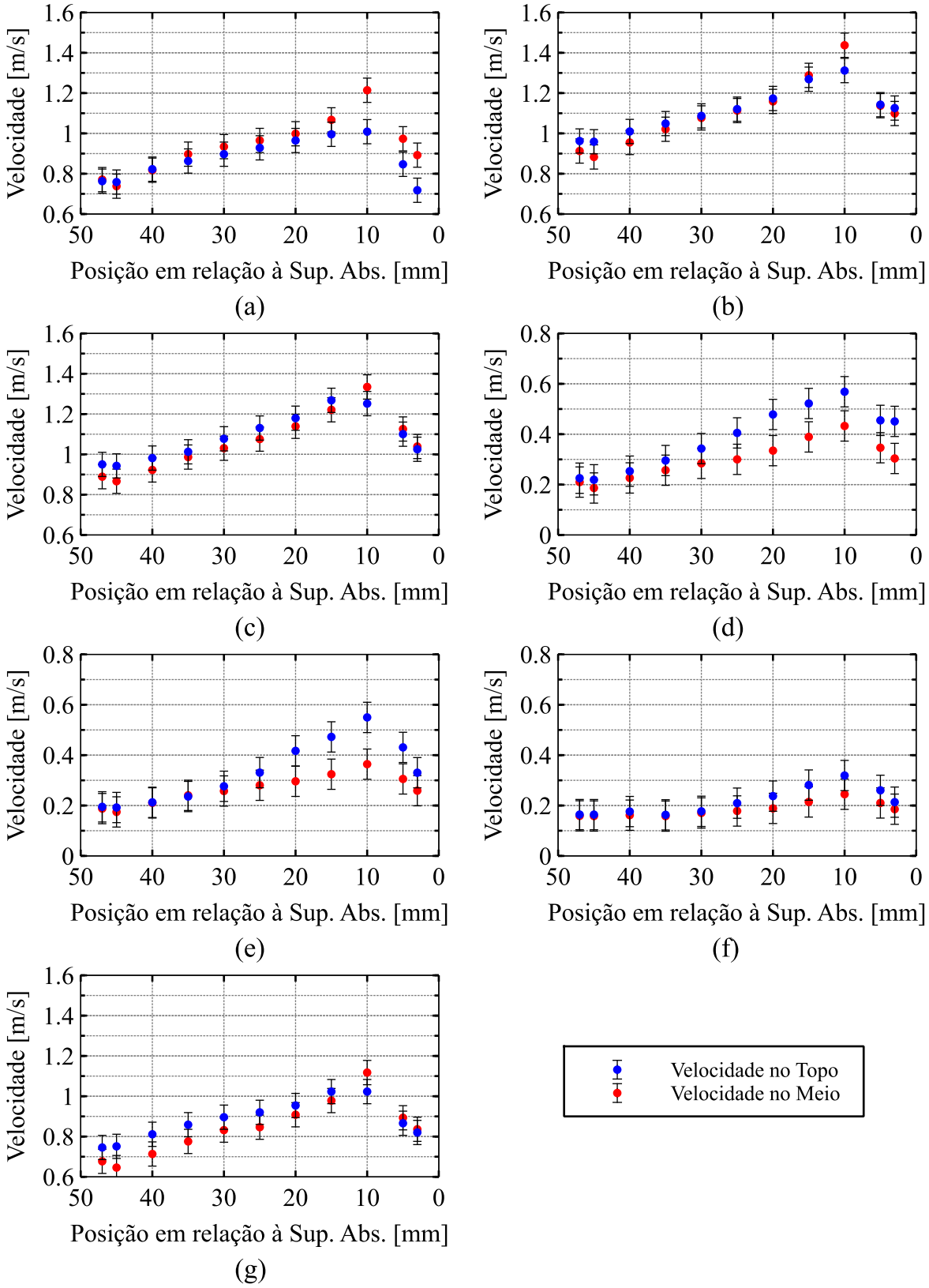


Fonte: Autor

4.2.2 Perfis de velocidade

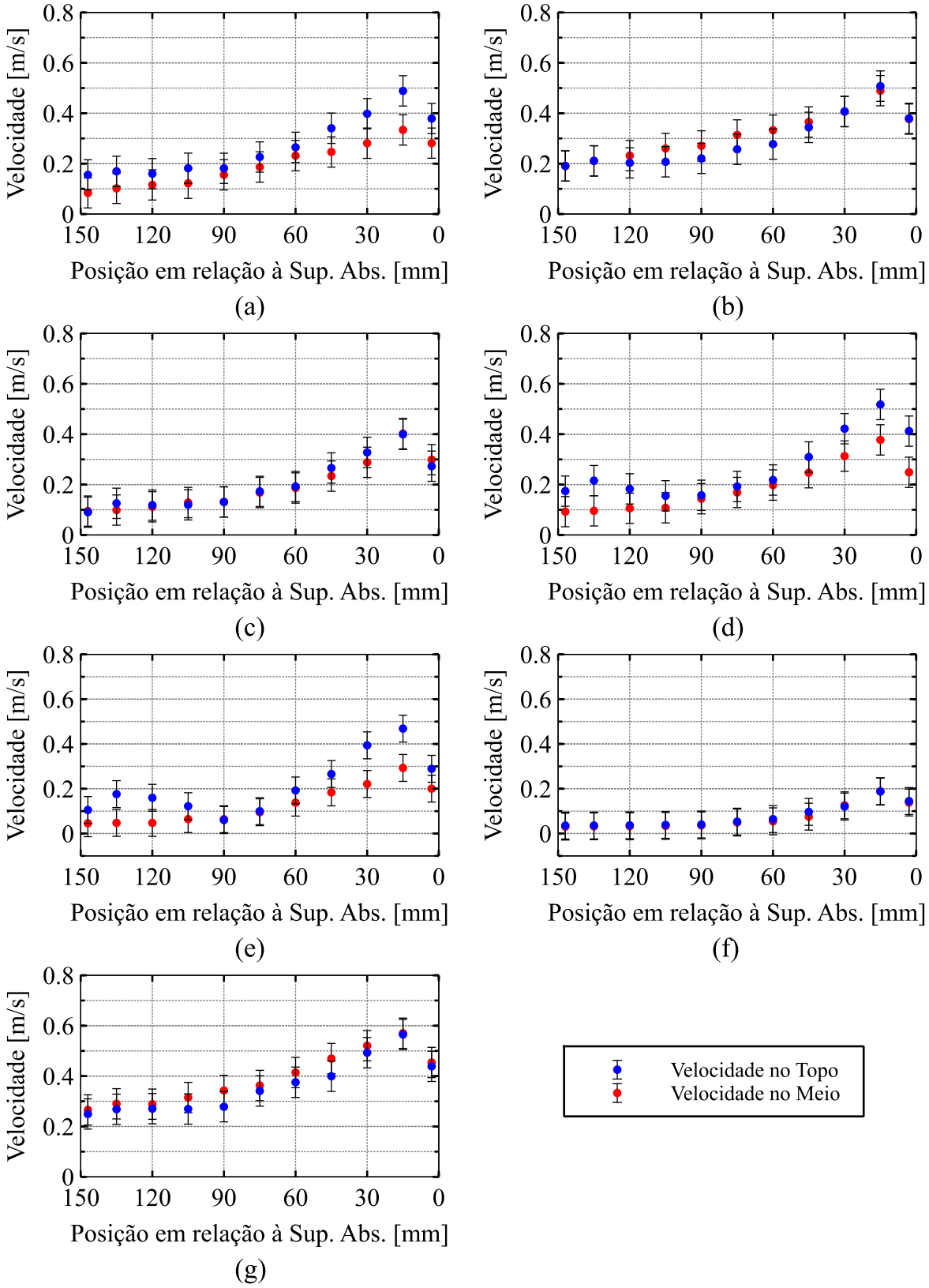
Os perfis de velocidade foram levantados para as configurações propostas com o auxílio do transdutor de velocidade em conjunto com a mesa coordenada, resultando na Fig. 100 para a chaminé com profundidade de 50 mm e Fig. 101 para configuração com profundidade de 150 mm.

Figura 100 - Perfil de velocidade no escoamento para chaminé com profundidade de 50 mm e abertura na obstrução de 50 mm (a), 40 mm (b), 30 mm (c), 20 mm (d), 10 mm (e) e 0 mm (f), bem como configuração convencional (g)



Fonte: Autor

Figura 101 - Perfil de velocidade no escoamento para chaminé com profundidade de 150 mm e abertura na obstrução de 150 mm (a), 120 mm (b), 90 mm (c), 60 mm (d), 30 mm (e) e 0 mm (f), bem como configuração convencional (g)

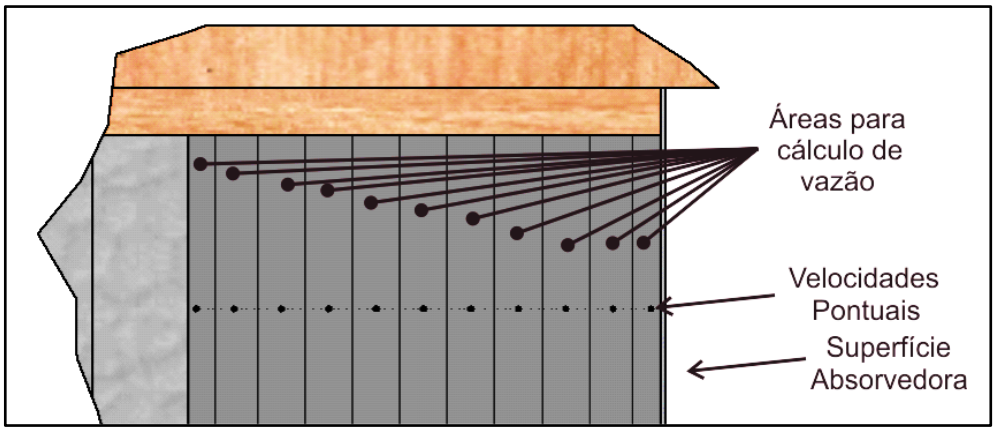


Fonte: Autor

4.2.3 Vazão volumétrica e mássica

Utilizando-se os perfis de velocidade, pôde-se estimar a vazão volumétrica dividindo-se a sessão transversal da cavidade em áreas menores que, de forma simplificada, foram correspondidas à cada uma das 11 velocidades pontuais coletadas na varredura do transdutor de velocidade. Partindo deste conceito, obteve-se as seguintes áreas da Fig. 102.

Figura 102 - Distribuição de áreas para cálculo de vazão volumétrica



Fonte: Autor

A vazão mássica por sua vez, pôde ser calculada através da temperatura pontual respectiva, levantada pelo termopar tipo T (varredura do perfil de temperatura), calculando-se a massa específica do ar em cada um dos 11 pontos de varredura.

O resultado proveniente destes métodos pode ser observado através da Tab. 9 e Tab. 10, onde são exibidos os valores de vazão obtidos para as chaminés de 50 mm e 150 mm de profundidade, bem como suas incertezas.

Tabela 9 - Vazão volumétrica e mássica para chaminé solar com 50 mm de profundidade

	Profundidade de 50 mm					
	Profundidade mm	Abertura mm	QS m^3/h	μQS m^3/h	$\dot{m}$S kg/h	μ $\dot{m}$S kg/h
Convencional	50	-	59.1	7.9	62.4	8.4
50-0	50	0	14.4	2.3	15.2	2.4
50-10	50	10	22.3	3.3	23.4	3.5
50-20	50	20	25.8	3.7	27.2	3.9
50-30	50	30	72.7	9.7	77.0	10.3
50-40	50	40	74.3	9.9	78.8	10.5
50-50	50	50	58.5	7.8	61.9	8.3

Fonte: Autor

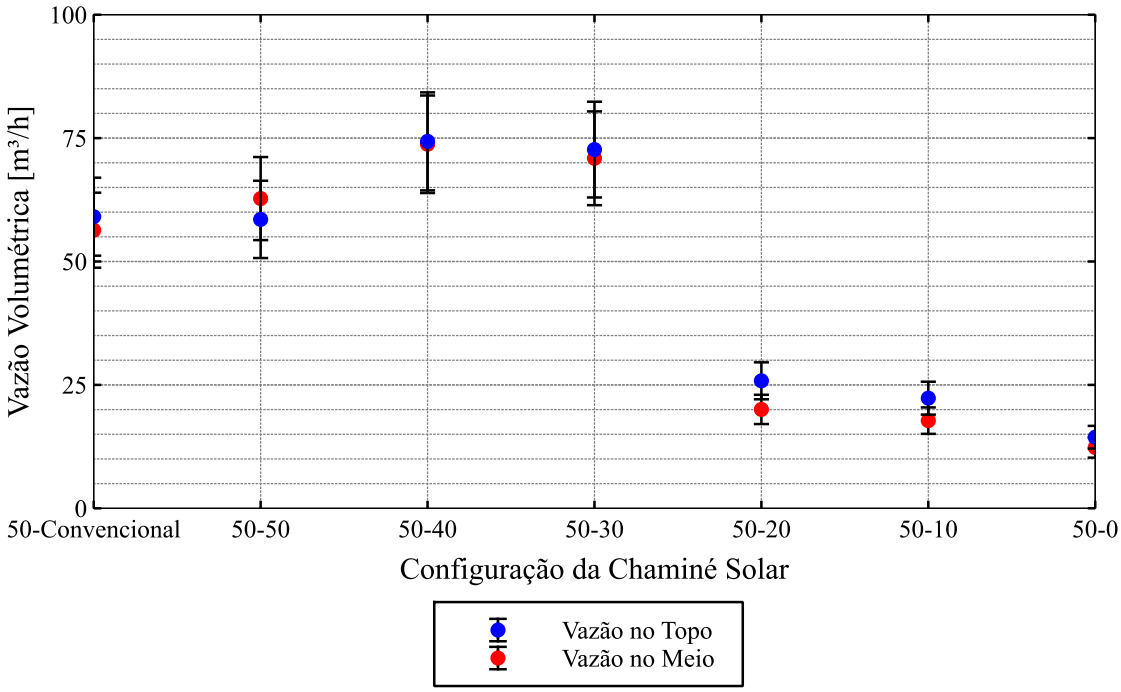
Tabela 10 - Vazão volumétrica e mássica para chaminé solar com 150 mm profundidade

	Profundidade de 150 mm					
	Profundidade mm	Abertura mm	QS m³/h	μQS m³/h	ṁS kg/h	μ ṁS kg/h
Convencional	150	-	71.7	4.9	76.1	5.3
150-0	150	0	15.2	3.8	16.0	4.0
150-30	150	30	42.2	4.3	44.5	4.5
150-60	150	60	52.9	4.5	56.2	4.8
150-90	150	90	40.3	4.2	42.9	4.5
150-120	150	120	58.1	4.6	61.7	4.9
150-150	150	150	53.3	4.5	56.5	4.8

Fonte: Autor

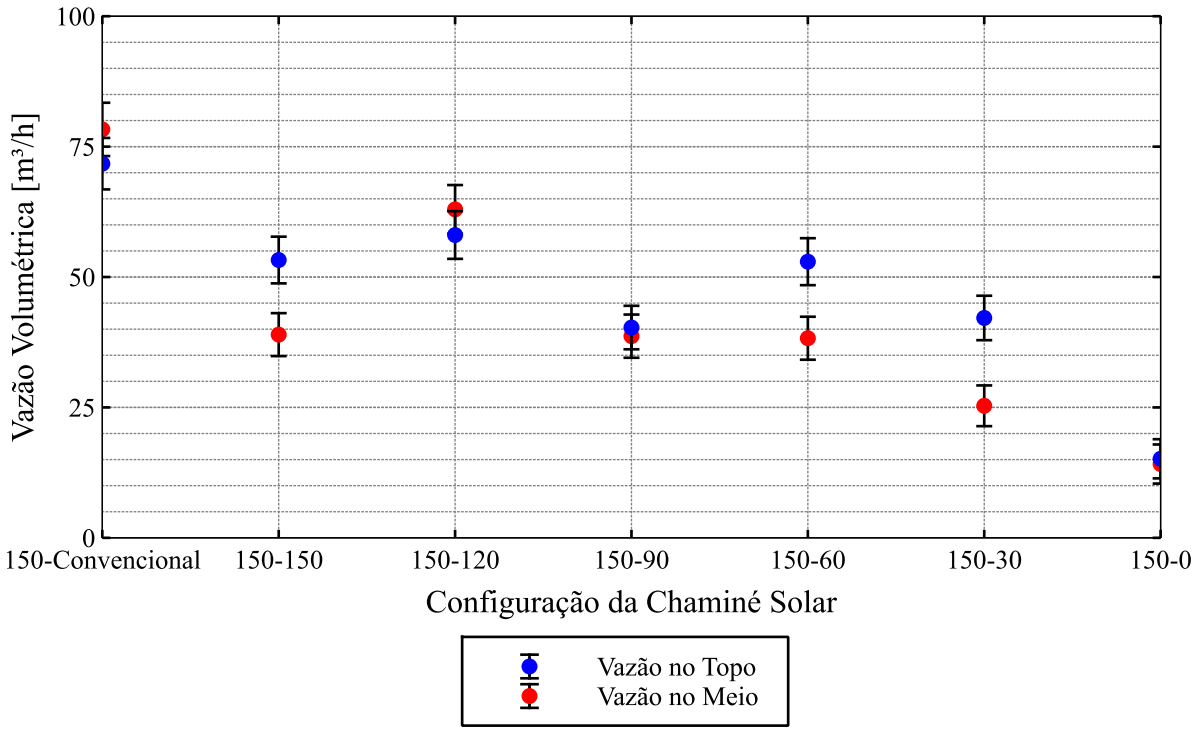
Com os perfis de velocidade, é possível levantar um gráfico comparativo a fim de se identificar a configuração que promoveu a maior vazão nos experimentos para cada geometria. Além disso, utilizando não somente a vazão de saída, medida a jusante da obstrução, mas também a vazão à montante da obstrução, pode-se identificar se a inserção da entrada superior promoveu um aumento de vazão (funcionando como entrada) ou uma fuga da mesma (funcionando como saída), resultando, portanto, na Fig. 103 para a cavidade com 50 mm de profundidade e na Fig. 104 para a cavidade com 150 mm.

Figura 103 - Vazão de saída devido à obstrução da cavidade para 50 mm de profundidade (autor)



Fonte: Autor

Figura 104 - Vazão de saída devido à obstrução da cavidade para 150 mm de profundidade (autor)



Fonte: Autor

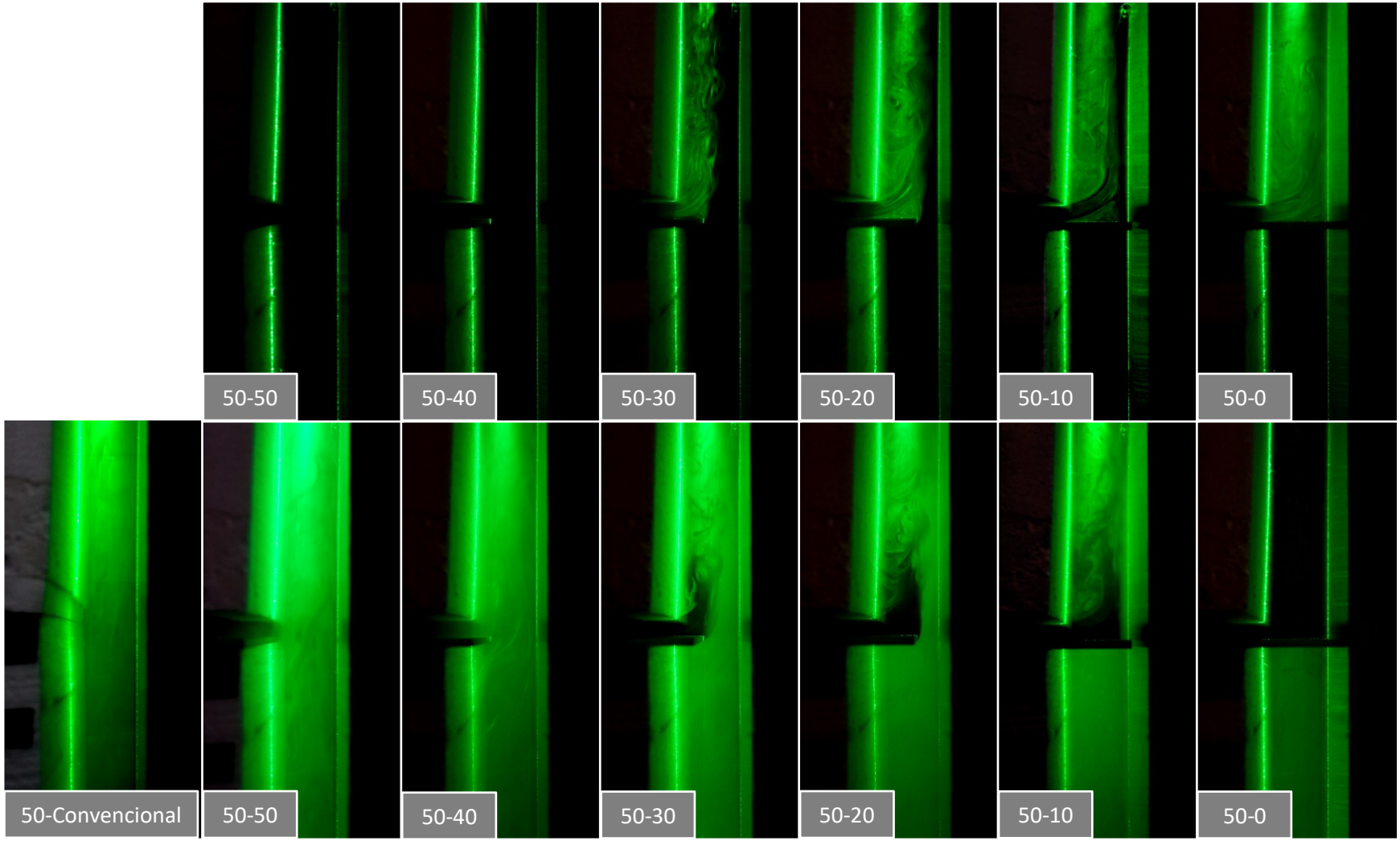
4.2.4 Visualização do escoamento

O sistema de visualização do escoamento fora utilizado em todas as configurações aqui propostas com o intuito de se identificar de forma qualitativa o comportamento da chaminé solar e assim confrontá-lo com os dados coletados.

Foram coletadas 2 imagens do escoamento para cada uma das configurações, sendo a primeira com a máquina de fumaça fornecendo partículas de glicerina para o escoamento da entrada de ar inferior e a segunda com as partículas de glicerina sendo fornecidas para o escoamento da entrada de ar superior.

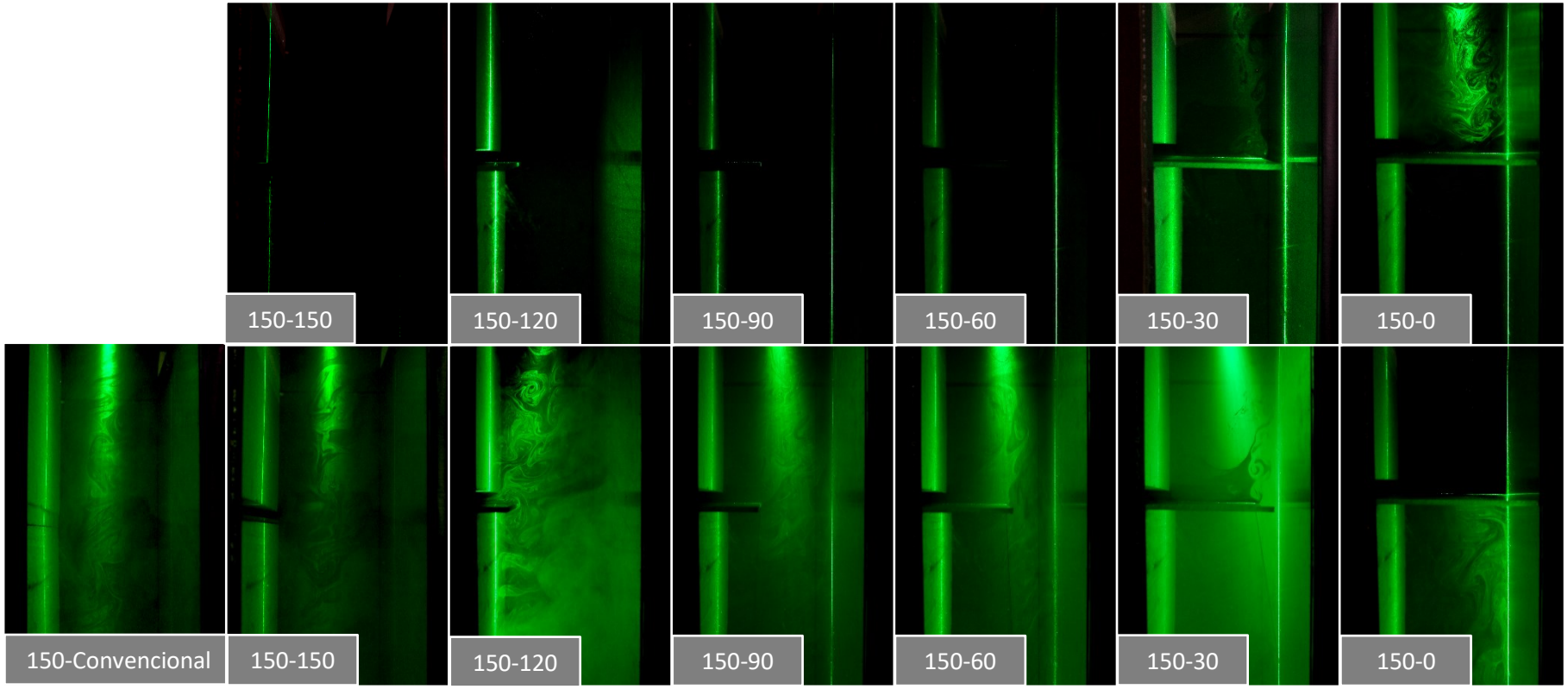
Na Fig. 105 pode se identificar o escoamento da chaminé solar tanto proveniente da entrada superior, quanto da entrada inferior, para a configuração de chaminé solar com profundidade da cavidade em 50 mm. Analogamente, na Fig. 106, tem-se o escoamento da chaminé solar para a chaminé solar com profundidade de cavidade em 150 mm.

Figura 105 - Visualização do escoamento da entrada superior e entrada inferior para chaminé com profundidade de 50 mm



Fonte: Autor

Figura 106 - Visualização do escoamento da entrada superior e entrada inferior para chaminé com profundidade de 150 mm



Fonte: Autor

4.3 DISCUSSÃO

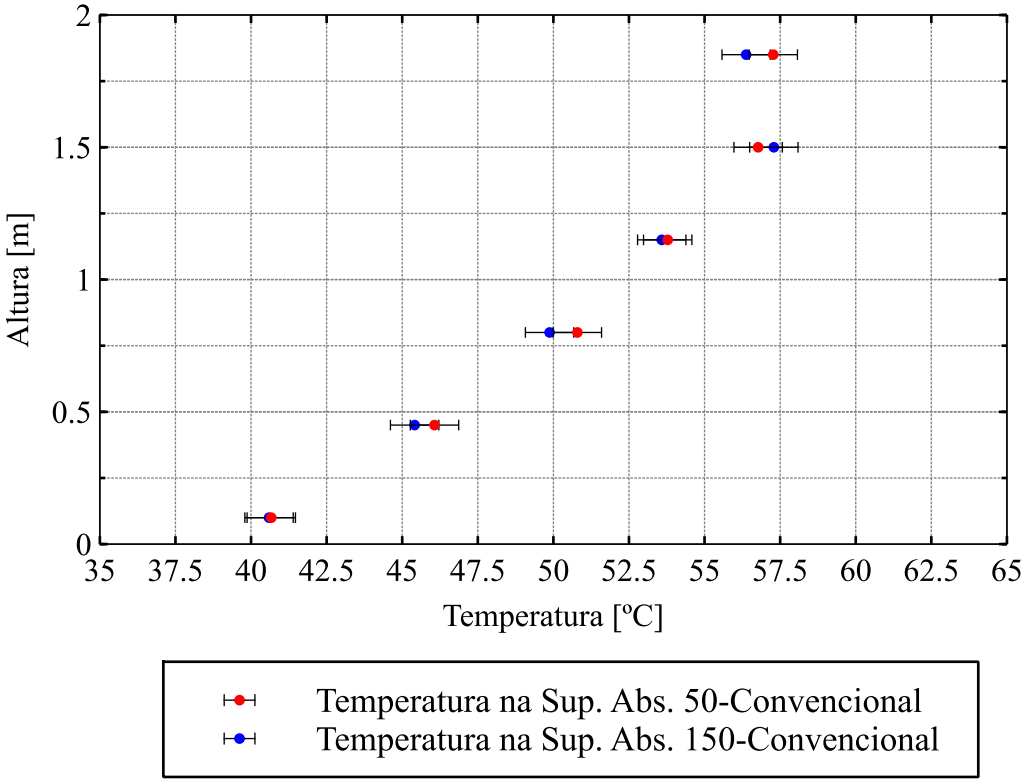
As informações levantadas permitem uma análise detalhada sobre o comportamento de cada geometria, bem como a identificação dos fenômenos relatados na literatura. Inicia-se, portanto, a análise com as chaminés convencionais “50-Convencional” e “150-Convencional”, comparando-as e avaliando o impacto da profundidade no comportamento geral da chaminé.

4.3.1 Comparação entre as chaminés convencionais

Através da Fig. 88 (g) e Fig. 89 (g), nota-se uma pequena variação de temperatura da superfície absorvedora, o que em uma primeira análise condiz com os relatos na literatura (SANDBERG; MOSHFEGH, 1996), indicando uma temperatura maior das superfícies da cavidade em virtude da intensificação da radiação interna ao se utilizar profundidades menores. Entretanto, nada se pode concluir a cerca desta análise uma vez que a tal variação se apresentou próxima aos valores de incerteza dos instrumentos de medição.

Quanto ao perfil de temperatura encontrado na superfície absorvedora, pode-se perceber claramente através da Fig. 107 o efeito da convecção nas proximidades da saída da cavidade relatada na literatura (HIRUNLABH; KONGDUANG; NAMPRAKAI; KHEDARI, 1999)(CHEN; BANDOPADHAYAY; HALLDORSSON; BYRJALSEN; HEISELBERG; LI, 2003)(CHANTAWONG; HIRUNLABH; ZEGHMATI; KHEDARI; TEEKASAP; WIN, 2006).

Figura 107 - Comparação entre os perfis de temperatura na Sup. Abs. para as chaminés convencionais de 50 mm e 150 mm de profundidade

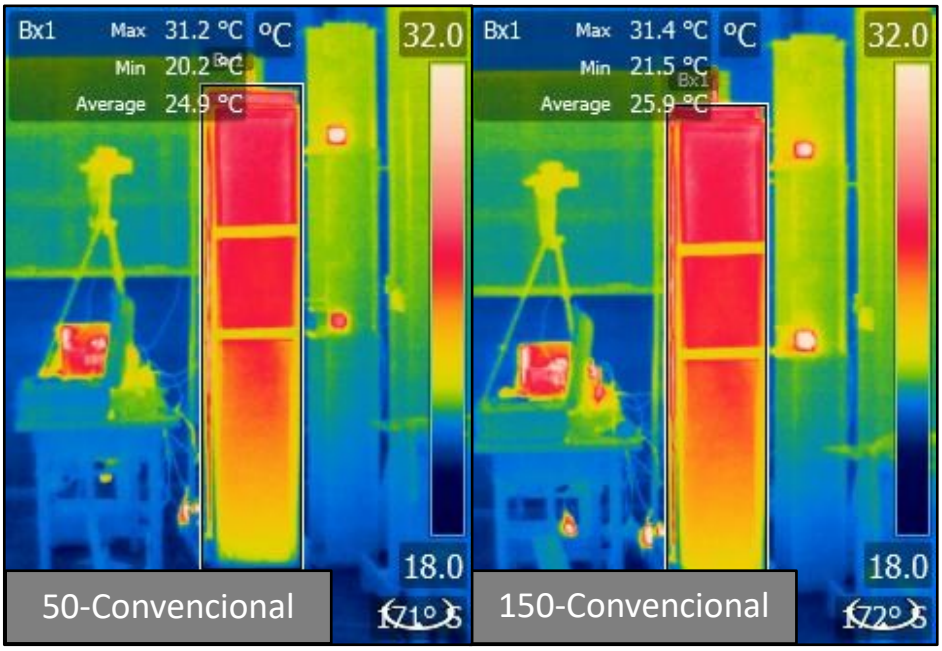


Fonte: Autor

Isto também pode ser notado através da indicação dada pelo termopar TS na Tab. 7 e Tab. 8 comparando-as com a temperatura média observada na Fig. 96 e Fig. 97 para as configurações convencionais, onde percebe-se que na geometria de saída, o escoamento possui uma temperatura maior (TS) se comparado com a temperatura média indicada pela câmera termográfica (proveniente das temperaturas superficiais) para esta região de interesse, indicando claramente que, as superfícies que formam a geometria de saída da cavidade possuem uma temperatura menor que a do escoamento.

Através da Fig. 98 e Fig. 99, percebe-se que o aumento da profundidade da cavidade não teve grande impacto na distribuição de temperatura ao longo do isolante do aquecedor, isto fica claro através da Fig. 108 e das Tab. 7 e Tab. 8, onde as temperaturas para a resistência de aquecimento não se alteraram significativamente, estabilizando-se em torno de 70 °C e retornando uma temperatura do escoamento na saída exatamente igual para ambos os casos, de 31,91 °C.

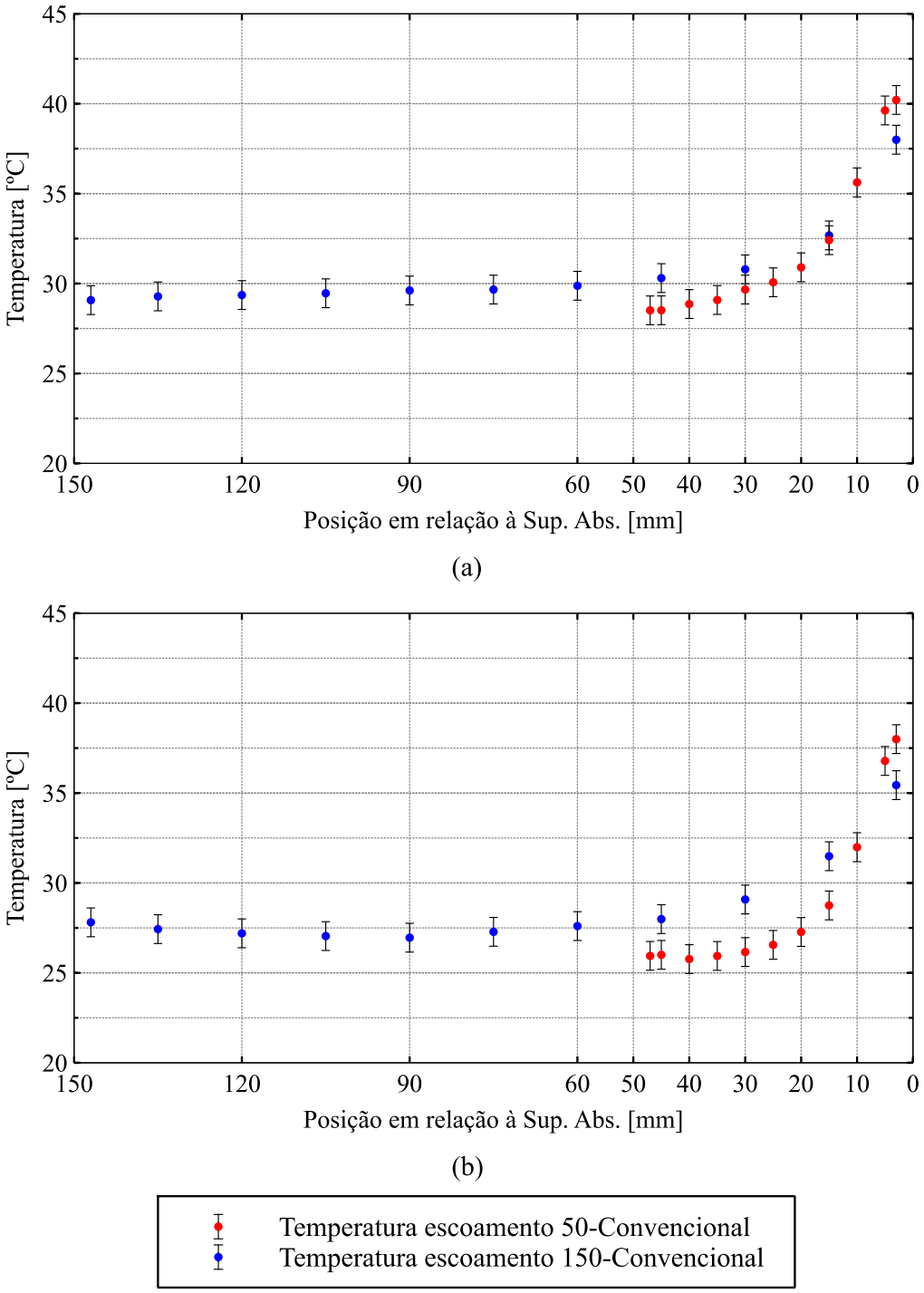
Figura 108 - Comparação entre as distribuições de temperatura do isolante do sistema de aquecimento para as chaminés convencionais de 50 mm e 150 mm de profundidade



Fonte: Autor

Ao analisar a Fig. 90 (g) e Fig. 91 (g), verifica-se que ambas as configurações sofreram aumento de temperatura com a altura da chaminé (conforme o desenvolvimento do escoamento), entretanto, nota-se que esta variação é mais expressiva quando utilizando cavidades de profundidade menor, no caso, a configuração de 50 mm obteve uma variação muito mais significativa em função da altura se comparada com a configuração de 150 mm. A Fig. 109 ilustra claramente a rápida mudança do perfil de temperatura do escoamento ao compararmos a varredura do meio e do topo da cavidade.

Figura 109 - Comparação dos perfis de temperatura nos escoamentos do topo (a) e meio (b) para as chaminés convencionais de 50 mm e 150 mm de profundidade



Fonte: Autor

Tal comportamento é de fato esperado, visto que a massa de ar em uma certa altura infinitesimal é maior para a configuração de 150 mm, portanto, considerando-se o mesmo fluido (ar), com o mesmo calor específico e mesmo fluxo de calor, tem-se uma intensidade de

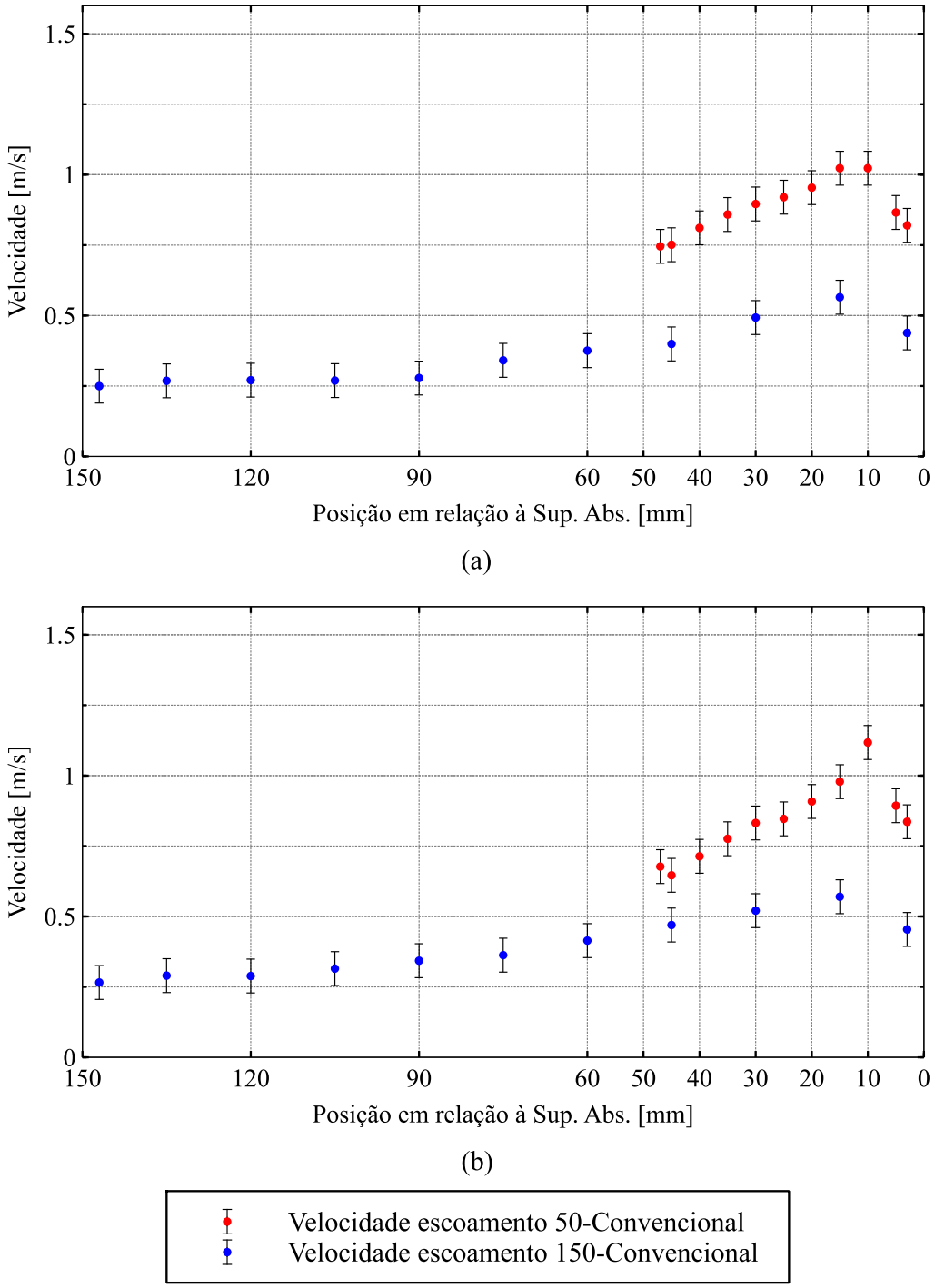
transmissão de calor menor para a configuração de 150 mm. De qualquer modo, pode-se perceber também que, embora o perfil de temperatura não tenha se modificado substancialmente para a configuração de 150 mm, revelam-se maiores valores de temperatura para esta condição, o que de fato teve grande impacto no empuxo térmico e por fim nos valores de vazão volumétrica obtidos (59,1 $m^3.h^{-1}$ para a configuração de 50 mm e 71,7 $m^3.h^{-1}$ para a de 150 mm de profundidade).

Vale notar a existência de um pico de temperatura próximo a superfície do isolante da chaminé de 150 mm na porção à montante da obstrução, coincidindo com as observações de diversos autores na literatura (MOSHFEGH; SANDBERG, 1998)(HIRUNLABH; KONGDUANG; NAMPRAKAI; KHEDARI, 1999)(CHEN; BANDOPADHAYAY; HALLDORSSON; BYRJALSEN; HEISELBERG; LI, 2003). Tal fato pode, portanto, indicar que a radiação interna é um fenômeno relevante nesta região. Entretanto, mesmo que o fluido tenha apresentado uma temperatura maior próximo ao isolante, o empuxo térmico não foi suficiente para que pudesse ser observado na Fig. 101 (g), ao passo que se pode observar os perfis de velocidade sem a presença de um pico de velocidade próximo a superfície do isolante da chaminé.

A Fig. 110 por sua vez, evidencia os perfis de velocidade na chaminé, comparando ambas as configurações convencionais de 50 mm e 150 mm de profundidade. Nota-se que, embora os valores de temperatura para o perfil no escoamento tenham sido maiores para a configuração de 150 mm, obteve-se na realidade maiores valores de velocidade para a configuração de 50 mm. Isto se deve ao fato de que a área transversal para esta configuração é equivalente à 1/3 da área da configuração de 150 mm de profundidade, acentuando significativamente a velocidade média do escoamento (0,85 $m.s^{-1}$ para a cavidade com 50 mm e 0,39 $m.s^{-1}$ para a cavidade com 150 mm), entretanto, esta intensificação do perfil de velocidade não significa diretamente um aumento de vazão, pois mesmo que a velocidade seja maior, o volume deslocado acabou sendo menor, resultando em uma vazão volumétrica de apenas 59,1 $m^3.h^{-1}$ para a configuração de 50 mm e 71,7 $m^3.h^{-1}$ para a de 150 mm de profundidade.

Logo, pode-se dizer que a vazão volumétrica seguiu o aumento de profundidade da cavidade, coincidindo com o encontrado por diversos autores na literatura (Sandberg & Moshfegh 1996), (KHEDARI; LERTSATITTHANAKORN; PRATINTHONG; HIRUNLABH, 1998)(CHEN; BANDOPADHAYAY; HALLDORSSON; BYRJALSEN; HEISELBERG; LI, 2003)(GAN, 2006).

Figura 110 - Comparação dos perfis de velocidade nos escoamentos do topo (a) e meio (b) para as chaminés convencionais de 50 mm e 150 mm de profundidade



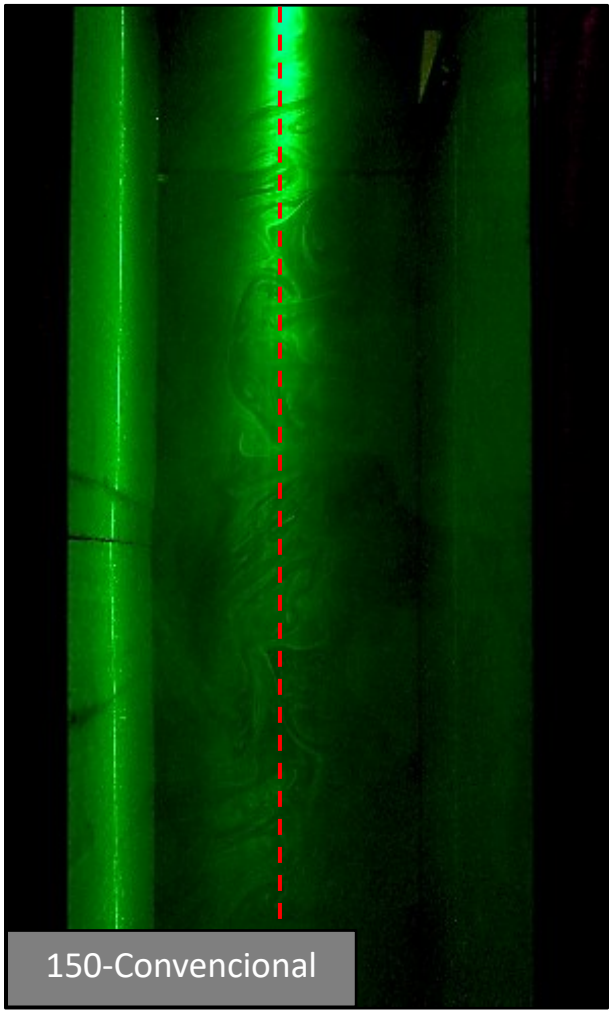
Fonte: Autor

Do ponto de vista experimental, percebe-se que, embora a redução da profundidade da cavidade intensifique a velocidade média do escoamento, isto sempre vem acompanhado de um

aumento de perda de carga distribuída na cavidade, o que limita a vazão máxima que se pode obter com uma configuração deste tipo.

Em relação à perda de carga singular das geometrias de entrada e saída da cavidade, pôde-se observar claramente o fenômeno descrito por Bouchair (1994), pois com o aumento da profundidade da cavidade, notou-se através da Fig. 105 e Fig. 106 (para as chaminés convencionais) o surgimento do escoamento reverso (*backflow*) na configuração com profundidade de 150 mm, o que justificaria a baixa intensidade do perfil de velocidade próximo ao isolante da chaminé (em posições maiores que 90 mm em relação à superfície absorvedora). Nota-se, portanto, o surgimento de diversos vórtices na configuração de 150 mm em virtude da interface entre o escoamento principal e o escoamento reverso conforme ilustrado na Fig. 111.

Figura 111 - Vórtices no escoamento da configuração convencional com 150 mm de profundidade



Fonte: Autor

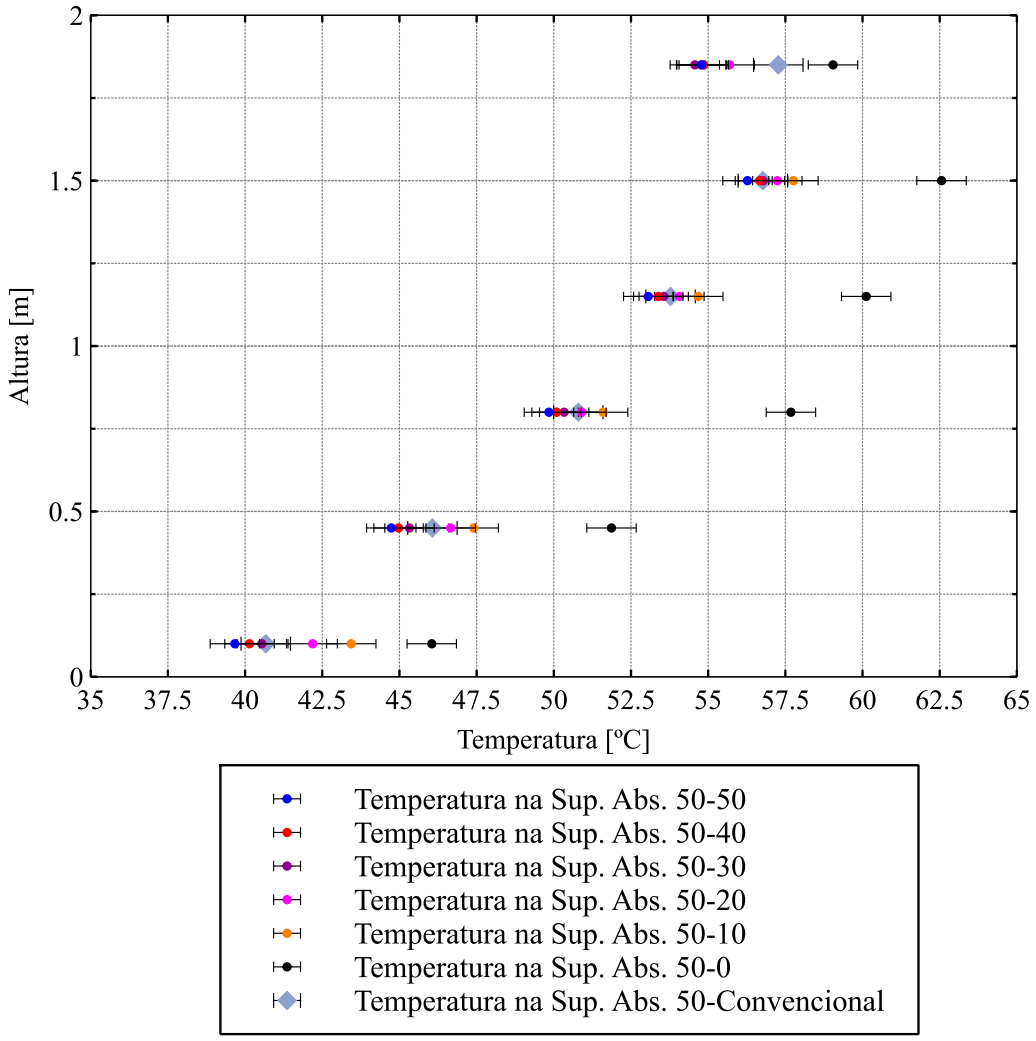
Constata-se nesta análise das configurações convencionais que, a configuração com profundidade de 150 mm, ao ser comparada com a configuração de 50 mm, promoveu uma maior vazão, uma maior intensidade do perfil de temperatura no escoamento, menores temperaturas na superfície absorvedora, menor intensidade do perfil de velocidade no escoamento e mesma temperatura média de saída mesmo com o surgimento de escoamento reverso. Sendo assim, dentre as configurações convencionais testadas, a melhor relação *gap-to-height* encontrada foi a de 150/2000, coincidindo com o que fora encontrada na literatura por Imran, Jalil e Ahmed (2015) e próximo do informado por Hirunlabh, Kongduang, Namprakai e Khedari (1999) e Chen, Bandopadhayay, Halldorsson, Byrjalsen, Heiselberg e Li (2003).

4.3.2 Chaminé com obstrução e profundidade de 50 mm

Utilizando-se a chaminé proposta, ou seja, com a inserção de uma segunda entrada disposta em uma certa altura, é esperado que o comportamento geral da chaminé solar mude. Entretanto, por não existirem tantas referências na literatura, a discussão aqui levantada consiste em trazer um estudo detalhado deste tipo de arranjo, o que auxiliará ainda mais os diversos pesquisadores e grupos de pesquisa à desenvolverem e otimizarem este tipo de configuração.

Inicia-se, portanto, a análise dos resultados com a chaminé solar proposta ajustada com profundidade de 50 mm, onde através da Fig. 88, observa-se um aumento de temperatura da superfície absorvedora de acordo com a redução da abertura na sessão de obstrução. Tal comparação fica melhor ilustrada através da Fig. 112.

Figura 112 - Comparação entre os perfis de temperatura na Sup. Abs. para todas as configurações com 50 mm de profundidade



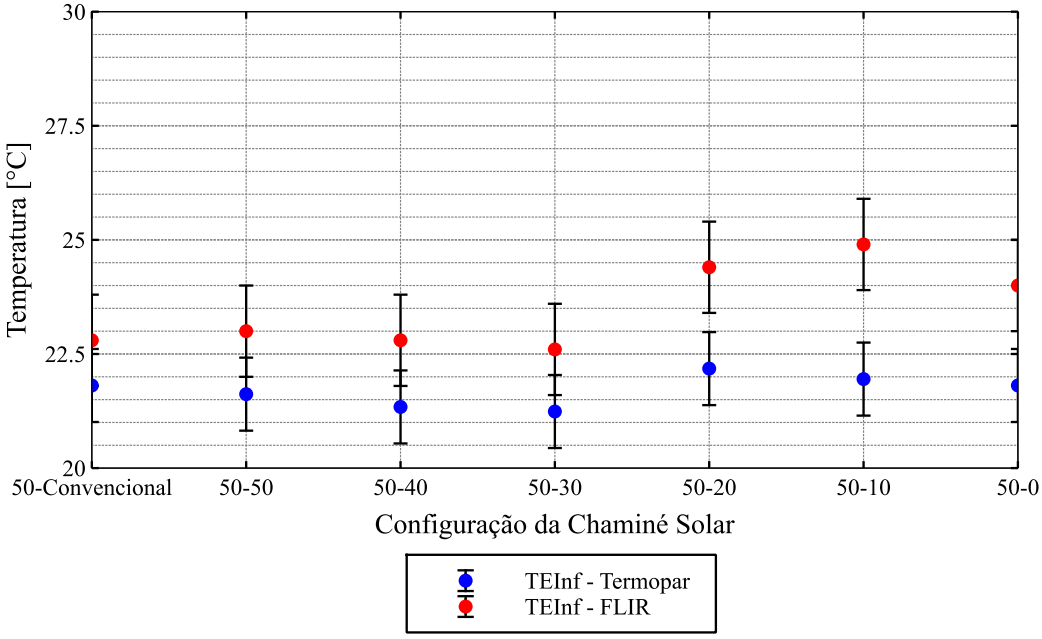
Fonte: Autor

É evidente que o aumento de perda de carga na cavidade (redução da abertura na obstrução) gera uma redução do coeficiente de transmissão de calor à montante da obstrução, elevando a temperatura da superfície de absorção, até um limite, onde tem-se a total obstrução da cavidade pela configuração 50-0, atingindo um perfil de temperatura na superfície absorvedora com maior intensidade que os demais pela falta de um escoamento convectivo suficiente. O perfil de temperatura na superfície absorvedora também demonstrou um comportamento similar ao da chaminé na configuração convencional, possuindo uma redução da temperatura nas proximidades da geometria de saída da cavidade, assim como comentado anteriormente.

É interessante observar que, a pura inserção de uma abertura (sem promoção de uma obstrução, ou seja, a configuração 50-50), assim como as configurações 50-40 e 50-30, indicam uma redução em todo o perfil de temperatura ao longo da altura da chaminé solar em relação a configuração convencional, possivelmente indicando um pequeno aumento geral de convecção na superfície absorvedora, de qualquer modo, as incertezas envolvidas não permitem grande assertividade desta hipótese, portanto, outros dados devem ser analisados.

Analisando as temperaturas obtidas na entrada inferior através da Tab. 7 e a média indicada pela câmera termográfica para a mesma região de interesse na Fig. 92, pôde-se levantar a Fig. 113, comparando-as de acordo com todas as configurações da chaminé com profundidade de 50 mm.

Figura 113 - Comparação entre as temperaturas da entrada inferior para todas as configurações com 50 mm de profundidade

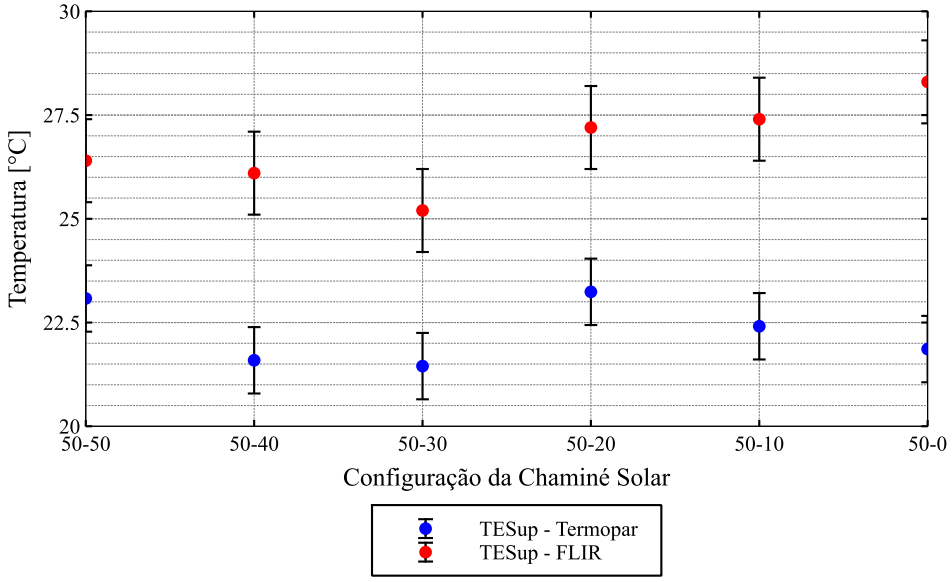


Fonte: Autor

Percebe-se uma pequena diferença de temperatura entre os dois métodos de aquisição, sendo a TEInf registrada pela câmera termográfica FLIR ligeiramente maior que a TEInf registrada pelo termopar tipo K. Tal diferença é de fato esperada, visto que a câmera termográfica registra em sua essência a temperatura superficial ao passo que o termopar registra a temperatura do escoamento em um certo ponto. De qualquer maneira, o comportamento revelado por ambos os métodos se mostrou extremamente similar, indicando inicialmente uma redução da temperatura de acordo com a redução da abertura na obstrução, até um certo limite,

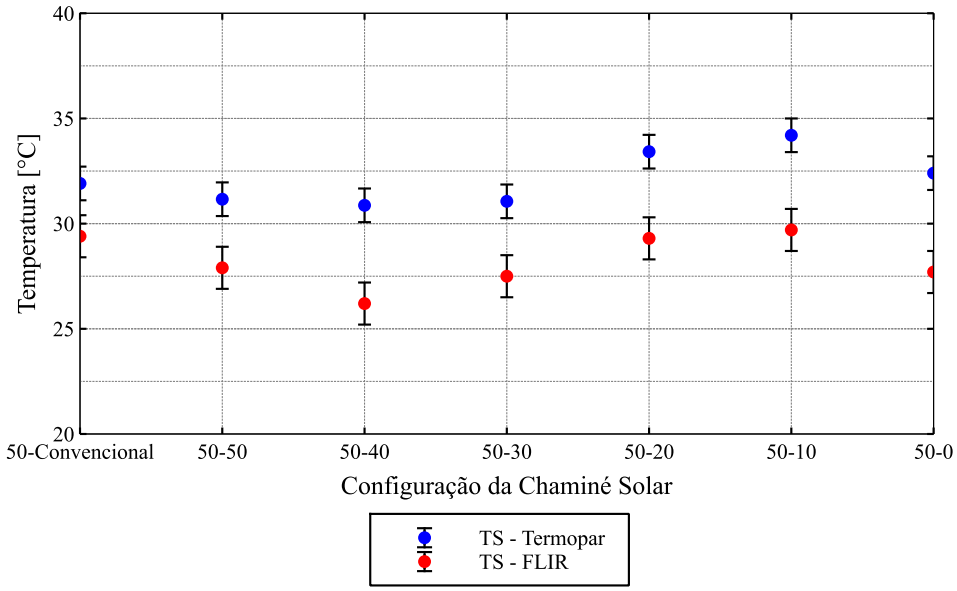
onde ocorre um salto de temperatura tanto no escoamento quanto nas superfícies para as configurações 50-20, 50-10, bem como esperado para a configuração 50-0. O mesmo ocorreu para as temperaturas da entrada superior (TESup) e de saída da cavidade (TS), como ilustrado através da Fig. 114 e Fig. 115, respectivamente.

Figura 114 - Comparação entre as temperaturas da entrada superior para todas as configurações com 50 mm de profundidade



Fonte: Autor

Figura 115 - Comparação entre as temperaturas da saída para todas as configurações com 50 mm de profundidade



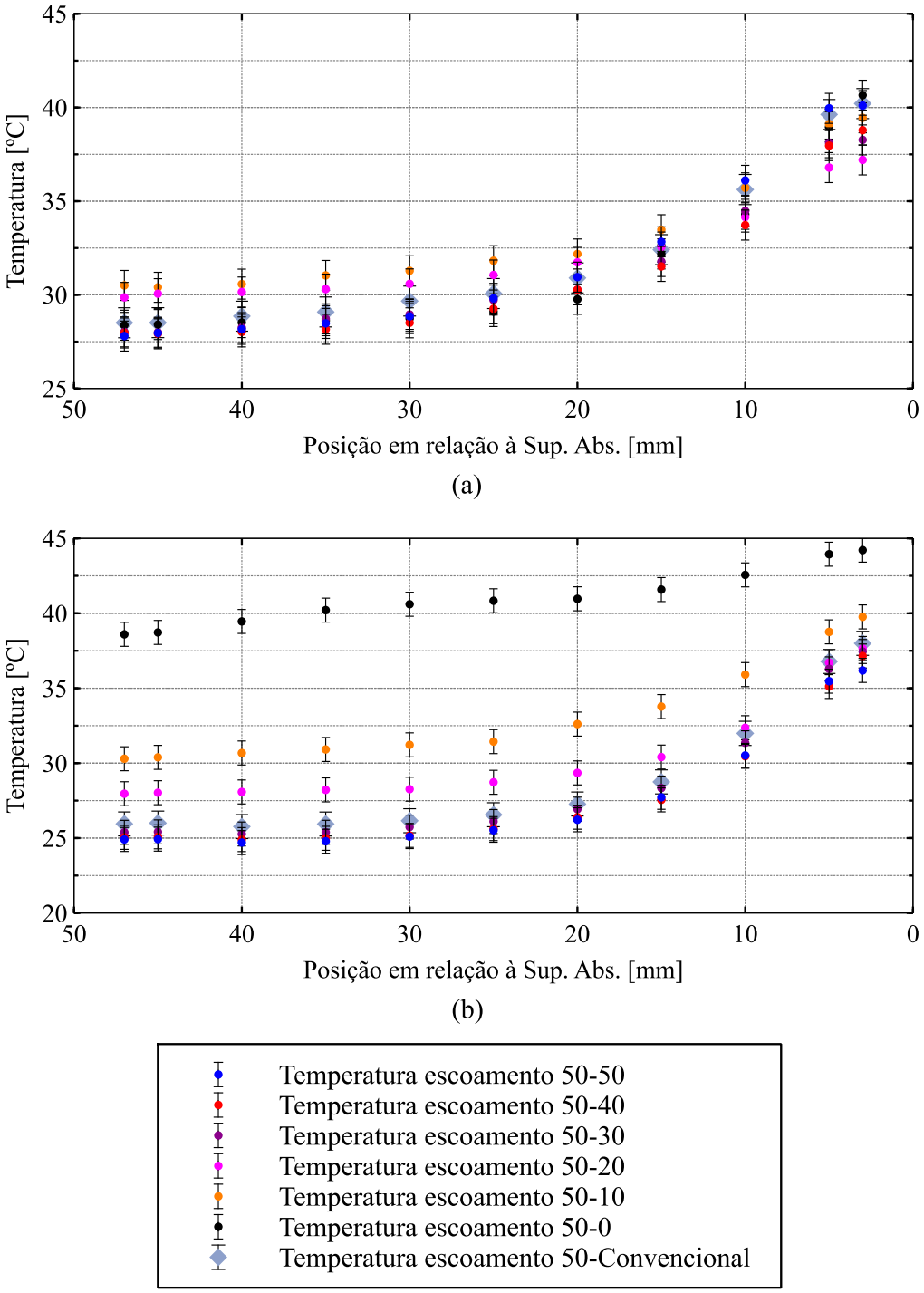
Fonte: Autor

Ao comparar a Fig. 113 e Fig. 114, é possível notar o aumento da temperatura superficial capturada pela câmera termográfica, indicando o que era de se esperar, uma temperatura maior das superfícies na entrada superior em relação à entrada inferior devido à convecção, radiação e eventual condução interna no fluido presente na cavidade ao longo da altura. Já na Fig. 115 tem-se o efeito contrário, superfícies de menor temperatura devido à convecção com o ambiente externo assim como citado por Sandberg e Moshfegh (1996), Hirunlabh, Kongduang, Namprakai e Khedari (1999), Zhai, Dai e Wang (2005a), Chantawong, Hirunlabh, Zeghmati, Khedari, Teekasap e Win (2006).

Através da Fig. 114 percebe-se também que a configuração 50-0 propiciou a maior diferença de temperatura entre as superfícies e o ar de entrada, o que influencia diretamente o empuxo térmico gerado nesta região, entretanto, esta diferença de temperatura teria maior influência apenas na vazão através da entrada superior, não necessariamente impactando na vazão de saída da cavidade.

As configurações 50-40 e 50-30 revelaram as menores temperaturas superficiais, o que a princípio pode comprovar o fenômeno observado na análise do perfil de temperatura da superfície absorvedora, indicando um aumento de convecção geral da cavidade. Para a discussão deste fenômeno é necessário analisar os perfis de temperatura no escoamento através da Fig. 116, onde percebe-se que as configurações 50-50, 50-40 e 50-30 retornaram de fato um perfil de temperatura tanto à montante quanto à jusante da obstrução de menor intensidade que os demais, até mesmo quando comparados com o perfil de temperatura no escoamento da chaminé convencional.

Figura 116 - Comparação dos perfis de temperatura nos escoamentos do topo (a) e meio (b) para todas as configurações com 50 mm de profundidade



Fonte: Autor

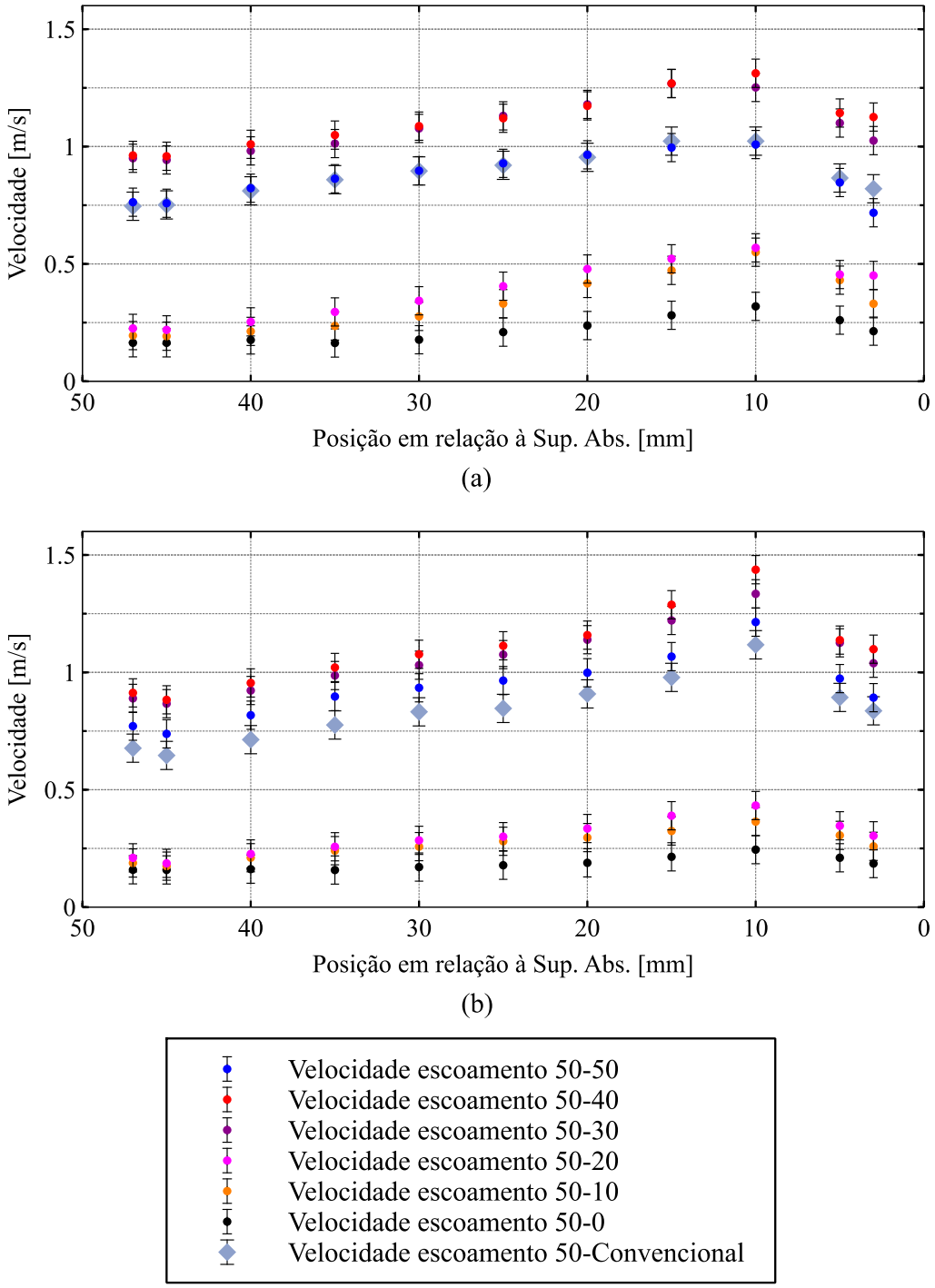
A configuração 50-0, por sua vez, apresentou um perfil similar a um patamar à montante da obstrução, como pode ser visto na Fig. 116 (b), sendo coerente com a teoria, pois nesta situação temos apenas uma recirculação de ar na porção inferior da cavidade devido ao seu

bloqueio total, homogeneizando a temperatura nesta região. Já na porção à jusante da obstrução através da Fig. 116 (a), tem-se um perfil de temperatura de baixa intensidade no escoamento visto que, com o bloqueio total da cavidade, tem-se uma chaminé de pequena altura sendo formada pela entrada superior e saída da mesma, portanto, pouco calor é fornecido ao escoamento.

É interessante observar que os dados da Fig. 116 (a) seguem fielmente o comportamento indicado na Fig. 115, confirmando as observações acerca das indicações da termopilha.

Com relação à radiação interna da cavidade, nota-se claramente a presença de um segundo pico de velocidade localizado próximo ao isolante na Fig. 100 (na porção do meio) e Fig. 117 para a maioria das configurações, o que poderia indicar um empuxo térmico devido à radiação interna na cavidade. Tal análise coincide com os relatos na literatura, ao passo que alguns autores comentam a intensificação da radiação na cavidade em função da redução da profundidade (SANDBERG; MOSHFEGH, 1996)(HIRUNLABH; KONGDUANG; NAMPRAKAI; KHEDARI, 1999)(CHEN; BANDOPADHAYAY; HALLDORSSON; BYRJALSEN; HEISELBERG; LI, 2003).

Figura 117 - Comparação dos perfis de velocidade nos escoamentos do topo (a) e meio (b) para todas as configurações com 50 mm de profundidade



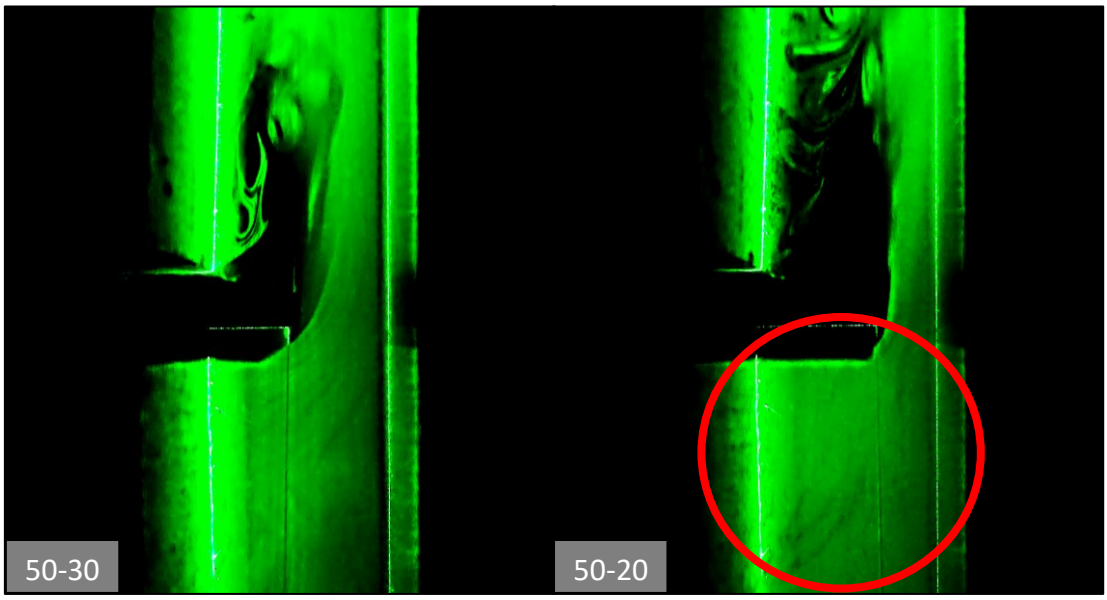
Fonte: Autor

Verifica-se também através dos perfis de velocidade da Fig. 117 que, as configurações 50-50, 50-40 e 50-30 retornaram uma intensidade maior quando comparadas com a configuração da chaminé solar convencional, o que refletiu diretamente na vazão volumétrica

ilustrada na Fig. 103. Logo, fica claro que as configurações 50-40 e 50-30 foram as que apresentaram melhor desempenho, escoando uma vazão respectivamente de 74,3 $m^3.h^{-1}$ e 72,7 $m^3.h^{-1}$, o que representa um aumento de até 25,8% em relação a vazão da chaminé com configuração convencional (59,1 $m^3.h^{-1}$), confirmando as observações iniciais de que estas configurações geram de fato uma maior convecção na cavidade.

Pode-se dizer, portanto que, com a redução da abertura na obstrução, há um aumento de vazão até o limite de 30 mm de abertura, sendo que abaixo deste valor, a perda de carga singular devido à obstrução se eleva substancialmente prejudicando a vazão. Este limite é facilmente observado através da Fig. 116 (b), pois pode-se notar que os perfis de temperatura para as configurações 50-Convencional, 50-50, 50-40 e 50-30 possuem praticamente a mesma forma e grandeza, entretanto, com a redução da abertura para as configurações 50-20, 50-10 e 50-0, surge este aumento de perda de carga singular resultando não só em uma redução de vazão mas também em uma homogeneização da temperatura no escoamento à montante, indicando que o fluido começou a estagnar abaixo da placa de obstrução nas proximidades do isolante térmico, o que de fato pôde ser notado através do sistema de visualização para a configuração 50-20. O fenômeno pôde ser visto facilmente durante os experimentos, porém as imagens coletadas não ilustraram fielmente, para tal, a Fig. 118 ilustra as duas configurações em alto contraste para melhor identificação.

Figura 118 - Estagnação do escoamento à montante da obstrução na configuração 50-20



Fonte: Autor

Também é interessante observar que a chaminé solar possui grande sensibilidade com a perda de carga singular da obstrução, ao passo que as configurações 50-20 e 50-10, mesmo possuindo uma área de passagem reduzida, retornaram um perfil de velocidade de grandeza comparável ao da configuração 50-0, com escoamento obstruído. Portanto, por mais que não tenha sido avaliada a influência das geometrias de entrada (inferior e superior) e saída da cavidade, é sensato comentar que tal influência pode ser significativa, e que tais vazões obtidas nos experimentos possam ser otimizadas com o ajuste das geometrias de entrada e saída da cavidade.

Esta ideia pode ser reforçada com auxílio da literatura estudada, visto que Ding, Hasemi e Yamada (2005) realizaram experimentos sobre a influência da área de entrada em uma chaminé similar (com múltiplas entradas), demonstrando que esta geometria de fato possui grande influência sobre o desempenho geral da chaminé.

Analisando as imagens coletadas com o sistema de visualização do escoamento, percebe-se que a inserção apenas de uma abertura na cavidade (configuração 50-50) gera uma ligeira perturbação do escoamento, não o suficiente para gerar estruturas vorticosas à jusante, mas sim o suficiente para intensificar o coeficiente de transmissão de calor por convecção (como comentado anteriormente). Já para a configuração 50-40, o escoamento inicia-se a contrair e claramente pode-se verificar a variação de direção do mesmo, entretanto, como a obstrução não é elevada, o escoamento expande à jusante da obstrução retornando sua forma original sem provocar o surgimento de vórtices (vide Fig. 119).

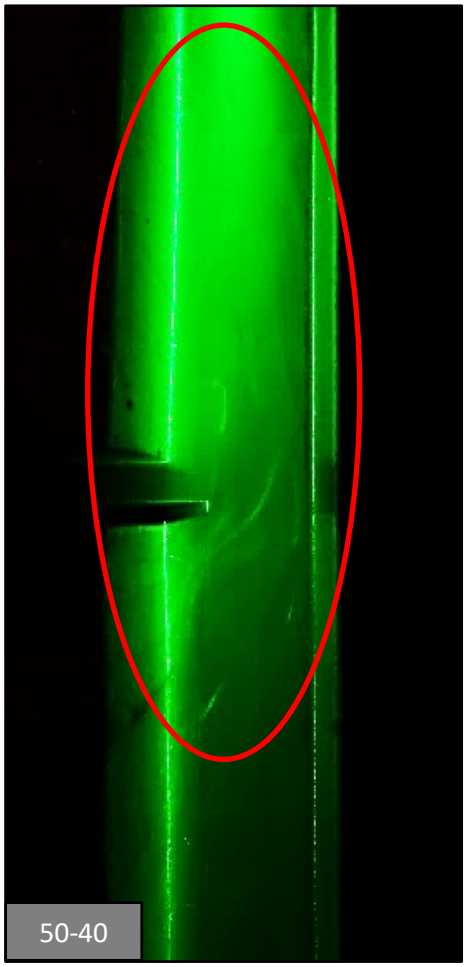
Com uma abertura cada vez menor, começam a surgir vórtices à jusante da cavidade provenientes do descolamento após a obstrução, isto pôde ser nitidamente observado nas configurações 50-30, 50-20 e 50-10. Uma atenção especial para a configuração 50-30 deve ser tomada, pois mesmo reduzindo abruptamente a energia cinética do escoamento, tais vórtices de certa forma ajudaram na transmissão de calor entre as superfícies internas e o fluido, homogeneizando o escoamento e promovendo um aumento de empuxo térmico à jusante da obstrução, o que resultou não somente em um arraste do fluido pela entrada superior devido à ligeira queda de pressão, como também seu rápido aquecimento conforme visto através dos perfis de velocidade e temperatura.

Como já comentado, o surgimento de vórtices não fica reservado apenas após à obstrução, sendo que para os casos 50-20 e 50-10 houveram também a presença de vórtices e pontos de estagnação do fluido na parte inferior da placa de obstrução. Já a configuração 50-0, por sua característica particular de promover a obstrução total do escoamento, pode ser

classificada como o limite deste fenômeno, onde tem-se um ponto de estagnação e uma completa recirculação do fluido.

A existência de uma recirculação na configuração 50-0 não significa velocidade nula na cavidade, pois uma vez que as superfícies da cavidade possuem temperaturas distintas, o fluido sofre variações de empuxo ao longo de sua variação de posição, o que resulta em um pequeno escoamento de recirculação. Prova disto é o perfil de temperatura para esta configuração, que embora se aproxime de um patamar, ainda assim possui um pequeno gradiente de temperatura.

Figura 119 - Constrição e posterior expansão do escoamento na configuração 50-40

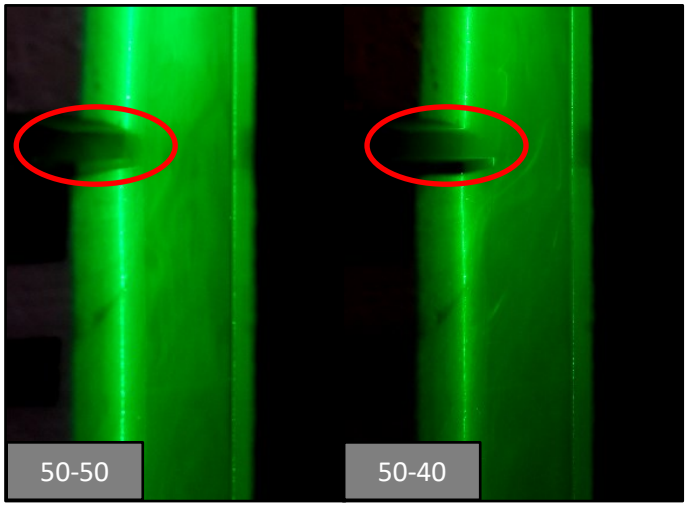


Fonte: Autor

Nenhum escoamento reverso ("*backflow*") fora identificado durante os testes das configurações com a chaminé solar de 50 mm de profundidade, isto se deu pelo fato de o escoamento possuir velocidade suficiente para se ajustar aos obstáculos da cavidade sem sofrer variação significativa de direção ou mesmo de um gradiente adverso de pressão.

A abertura superior proposta neste trabalho tem o intuito de servir como entrada secundária para a chaminé solar, promovendo um arraste do fluido presente na porção superior do ambiente, entretanto, para as configurações 50-50 e 50-40 foi identificado um escoamento contrário (vide Fig. 120), ou seja, parte do escoamento proveniente da entrada inferior fora direcionado para fora da chaminé através desta abertura, o que é indesejável, pois acarreta um aquecimento do ambiente interno.

Figura 120 - Fuga parcial do ar proveniente da entrada inferior nas configurações 50-50 e 50-40



Fonte: Autor

Portanto, somente as configurações 50-30, 50-20, 50-10 e 50-0 puderam remover ar do ambiente interno em sua porção superior. Um resumo prático do que fora observado durante os experimentos visualmente, bem como pelas imagens capturadas e dados coletados, pode ser visto na Tab. 11.

Tabela 11 – Identificação das configurações com 50 mm de profundidade que promoveram remoção de ar da porção superior do ambiente

Configuração	50-Convencional	50-50	50-40	50-30	50-20	50-10	50-0
Visualização durante os experimentos	-	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Imagens capturadas do escoamento	-	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Dados coletados	-	✗	✓	✓	✓	✓	✓

Fonte: Autor

De acordo com a Tab. 12, nota-se claramente um aumento de desempenho geral da chaminé solar com a utilização da configuração 50-30, sendo esta capaz de promover uma

vazão até 23,0% maior que a chaminé convencional de mesma profundidade e ainda realizar o arraste do fluido na entrada superior, a qual diante das incertezas poderia representar no máximo 28,8% da vazão da saída (21,0 $m^3.h^{-1}$).

Tabela 12 - Vazão através da entrada superior (valores negativos representam um escoamento contrário) e porcentagem da vazão de saída em relação à configuração 50-Convencional

Configuração	50-Convencional	50-50	50-40	50-30	50-20	50-10	50-0
Vazão pela entrada superior [m³/h]	-	-4.22	0.58	1.76	5.79	4.55	14.40
% de vazão em relação à convencional	100.0%	99.1%	125.8%	123.0%	43.7%	37.8%	24.4%

Fonte: Autor

4.3.3 Chaminé com obstrução e profundidade de 150 mm

Analogamente as análises já realizadas, tem-se nesta sessão o estudo detalhado da chaminé solar proposta com 150 mm de profundidade, que de certa forma evidenciará a influência desta dimensão no desempenho do conceito aqui proposto.

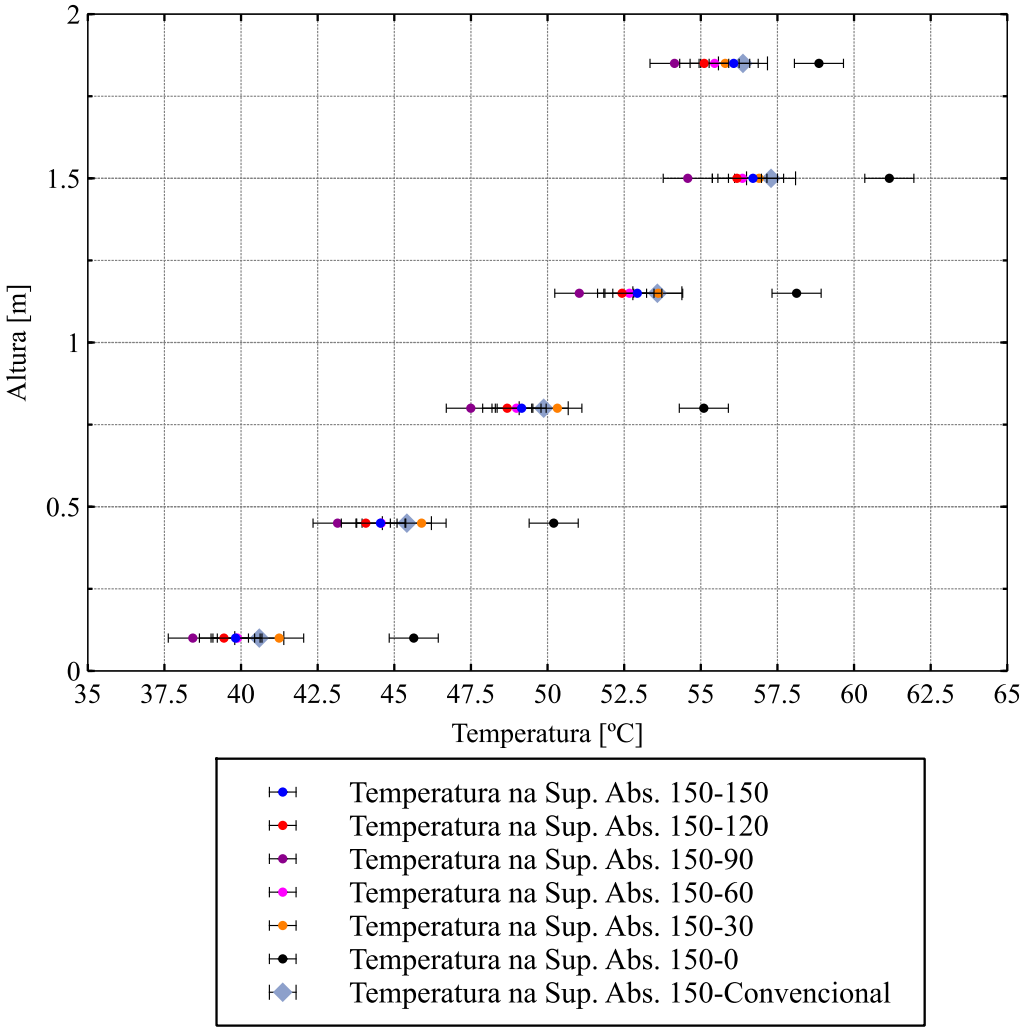
Primeiramente, ao se analisar o perfil de temperatura da superfície absorvedora na Fig. 89, nota-se um comportamento diferente do observado nas variações com a chaminé solar proposta com profundidade de 50 mm, ao passo que, com a redução da abertura na obstrução, tem-se inicialmente uma redução de intensidade do perfil de temperatura ao longo da altura até um certo limite, sendo que para aberturas menores que 90 mm, o perfil inicia-se à aumentar de intensidade novamente, atingindo seu máximo com a configuração 150-0 (cavidade totalmente obstruída e com baixa convecção interna) como pode ser visto na Fig. 121.

Não é possível ter grande assertividade acerca do fenômeno pois as incertezas possuem grandeza similar às diferenças de temperatura envolvidas, entretanto, este comportamento poderia revelar inicialmente uma baixa influência da perda de carga singular até este limite de 90 mm, sendo que abaixo deste, o escoamento inicia-se a ser restringido, prejudicando o desempenho da chaminé. Os perfis de temperatura de menor intensidade podem estar associados ao aumento de velocidade média na abertura devido à leve obstrução e insignificante aumento de perda de carga da cavidade, além disso, o fenômeno de escoamento reverso também pode estar associado a isto, uma vez que foi identificado o surgimento deste na configuração 150-Convencional e que o mesmo ocupa a porção próxima do isolante entre as posições de 150 mm até aproximadamente 90 mm.

De qualquer modo, é interessante notar que a configuração 150-30 apresentou um perfil de temperatura próximo do perfil para a configuração 150-Convencional, entretanto, devido à

obstrução, o perfil se apresentou ligeiramente mais intenso à montante e ligeiramente menos intenso à jusante, até mesmo pelo fato de que nesta configuração foi identificado o arraste de ar do ambiente (de menor temperatura) através da entrada superior, reduzindo a temperatura média da porção superior da chaminé.

Figura 121 - Comparação entre os perfis de temperatura na Sup. Abs. para todas as configurações com 150 mm de profundidade



Fonte: Autor

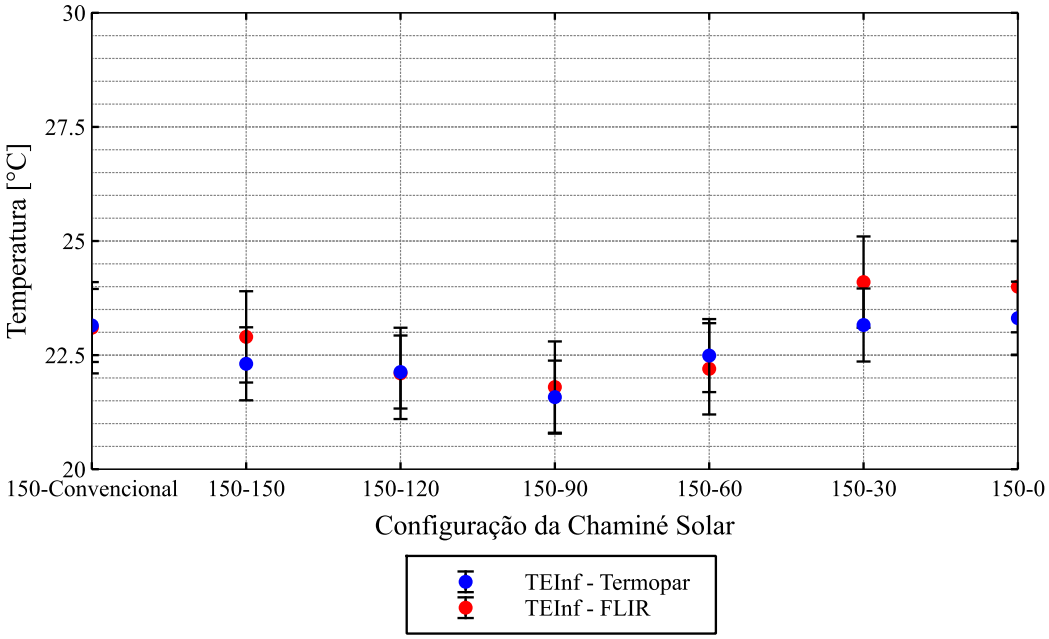
Em geral, pode-se perceber que a temperatura das superfícies da cavidade sofreu uma leve redução ao se aumentar a profundidade da cavidade de 50 mm para 150 mm, o que de fato é coerente com os estudos de Sandberg e Moshfegh (1996), Hirunlabh, Kongduang, Namprakai e Khedari (1999) e Chen, Bandopadhayay, Halldorsson, Byrjalsen, Heiselberg e Li (2003).

Ao se analisar as temperaturas da entrada inferior da chaminé com o auxílio do termopar tipo K (vide Tab. 8) e da câmera termográfica (vide Fig. 95), percebe-se uma boa coerência

entre os métodos, demonstrando não somente comportamentos semelhantes como também indicações muito próximas, sendo melhor visto através da Fig. 122.

O comportamento da chaminé solar em relação à entrada inferior foi similar ao da configuração com profundidade de 50 mm, ao passo que, com a redução da abertura na obstrução tem-se inicialmente uma redução da temperatura da entrada inferior, sendo a mínima temperatura proveniente da configuração 150-90.

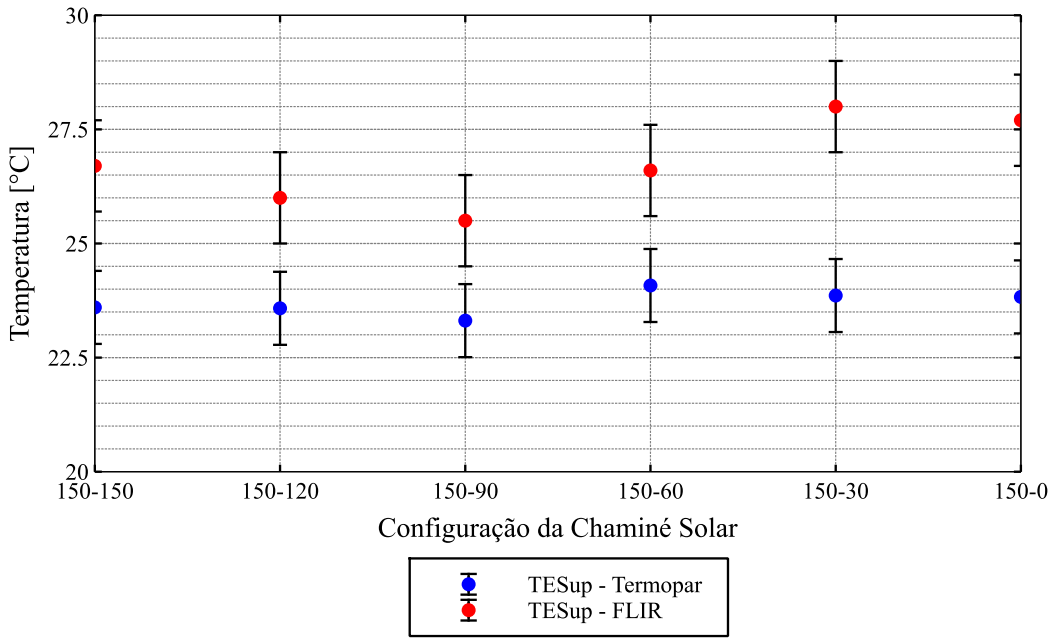
Figura 122 - Comparação entre as temperaturas da entrada inferior para todas as configurações com 150 mm de profundidade



Fonte: Autor

Analogamente à análise da chaminé com 50 mm, tem-se a comparação das temperaturas da entrada superior através da Fig. 123, onde fica claro mais uma vez o aumento de temperatura das superfícies em relação as temperaturas superficiais da Fig. 122, indicando uma região onde tem-se gradientes térmicos maiores.

Figura 123 - Comparação entre as temperaturas da entrada superior para todas as configurações com 150 mm de profundidade

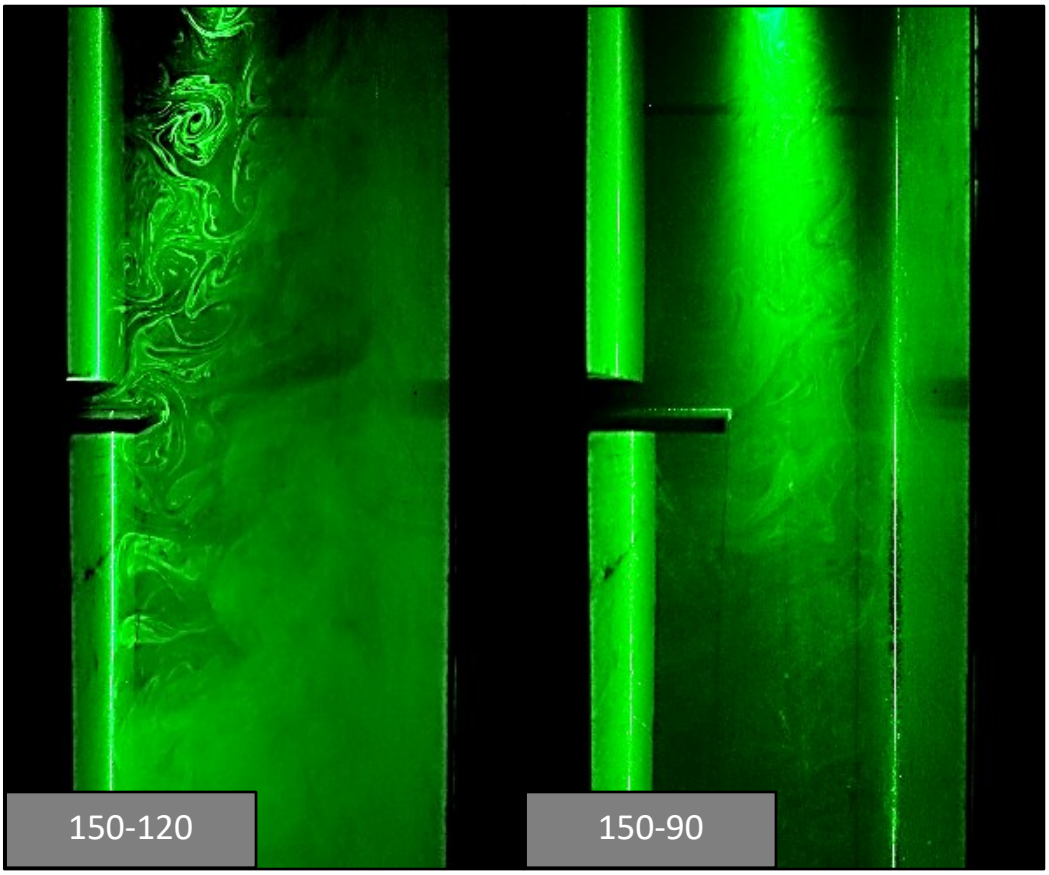


Fonte: Autor

Percebe-se tanto na Fig. 122 (para as temperaturas da entrada inferior) quanto na Fig. 123 (para as temperaturas da entrada superior) um comportamento similar, mais uma vez tendo a configuração 150-90 com a mínima temperatura superficial registrada, o que indicaria em um primeiro momento que esta configuração promove uma maior convecção na cavidade.

Entretanto, ao analisar as vazões através da Fig. 104, observa-se que na verdade a configuração 150-90 não é a configuração de maior vazão, logo, o nível alto de convecção da chaminé não é proveniente de uma intensa velocidade do escoamento, mas sim de uma vorticidade elevada na cavidade, a qual de fato pôde ser identificada através das imagens coletadas pelo sistema de visualização do escoamento (vide Fig. 106). Além disto, é possível notar o aumento de vorticidade na cavidade ao se utilizar as configurações 150-120 e 150-90 conforme ilustra a Fig. 124 em alto contraste.

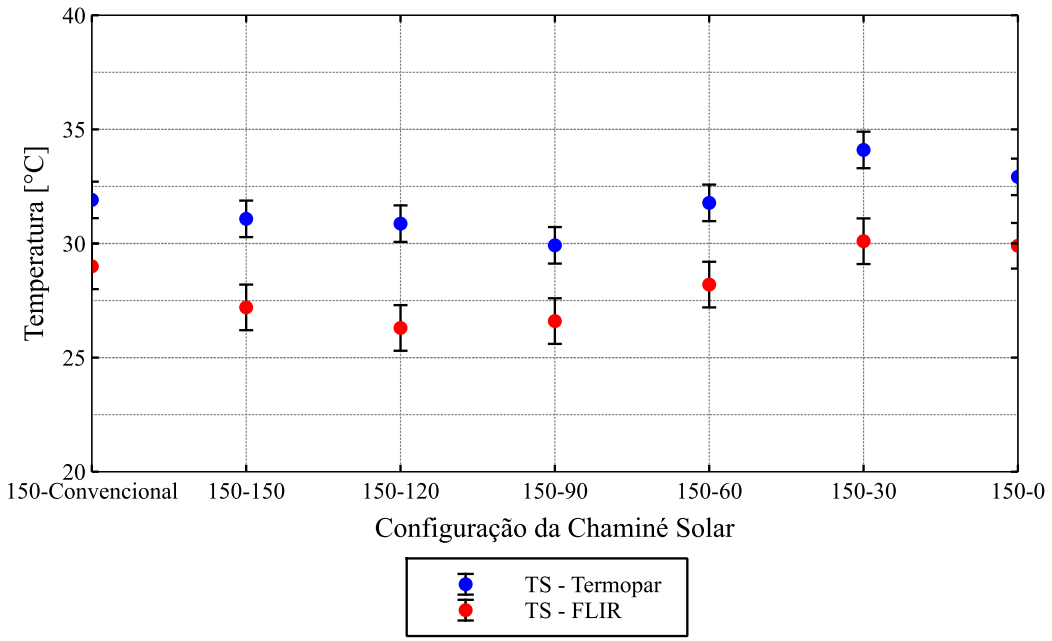
Figura 124 - Vorticidade elevada nas configurações 150-120 e 150-90



Fonte: Autor

Já na Fig. 125, nota-se mais uma vez a convecção externa na geometria de saída citada na literatura, ao passo que as temperaturas superficiais se revelam menores se comparadas com a temperatura coletada pela termopilha, coincidindo também com a diferença observada entre a indicação do termopar TSA1 em relação ao termopar TSA2 na Fig. 121.

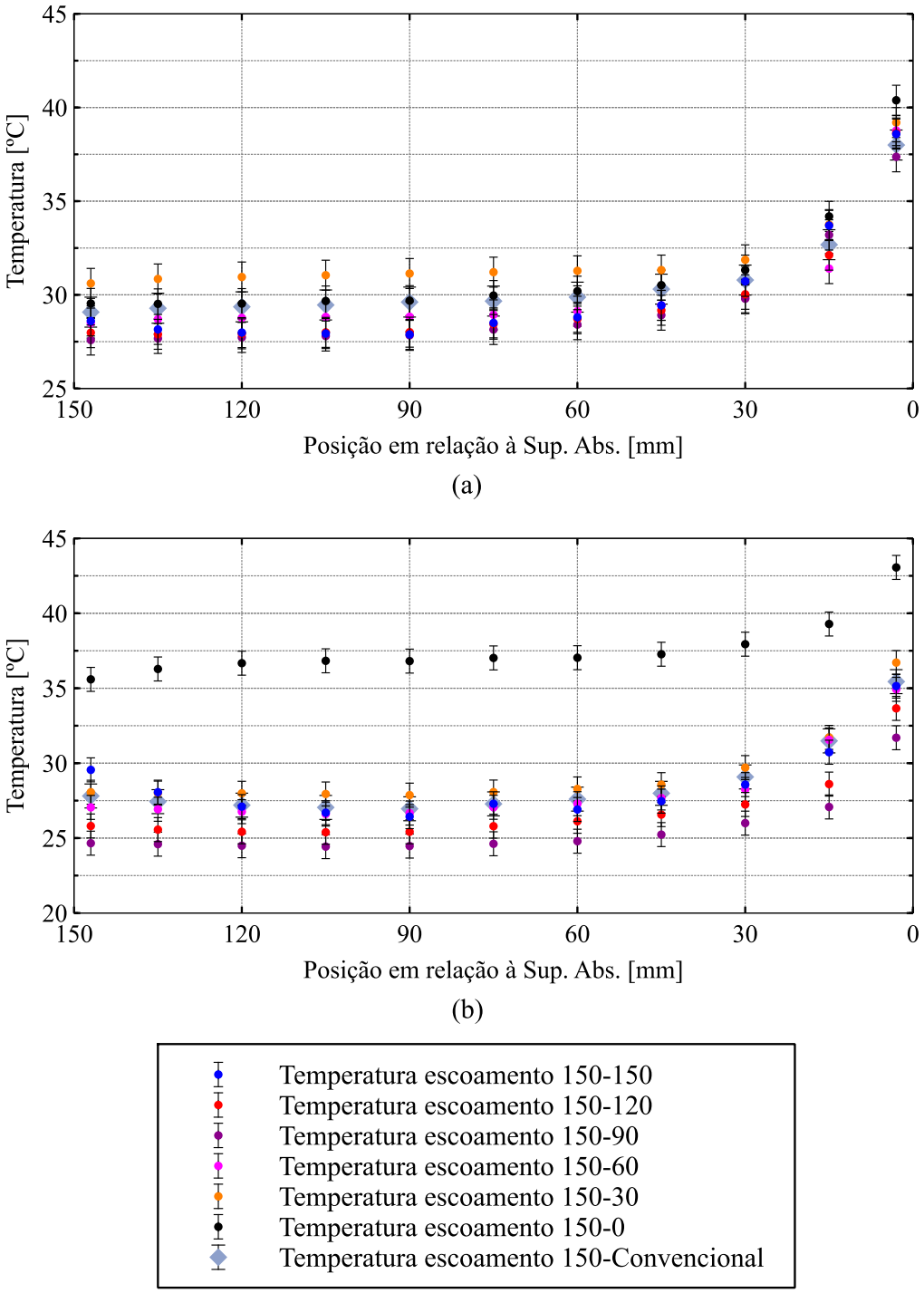
Figura 125 - Comparação entre as temperaturas da saída para todas as configurações com 150 mm de profundidade



Fonte: Autor

A configuração 150-90 também indicou o perfil de temperatura no escoamento de menor intensidade dentre todos, sendo que com a redução gradual da abertura até 90 mm, reduziu-se a intensidade do perfil, já para aberturas ainda menores, o perfil voltou a se intensificar, assim como ilustrado na Fig. 126.

Figura 126 - Comparação dos perfis de temperatura nos escoamentos do topo (a) e meio (b) para todas as configurações com 150 mm de profundidade



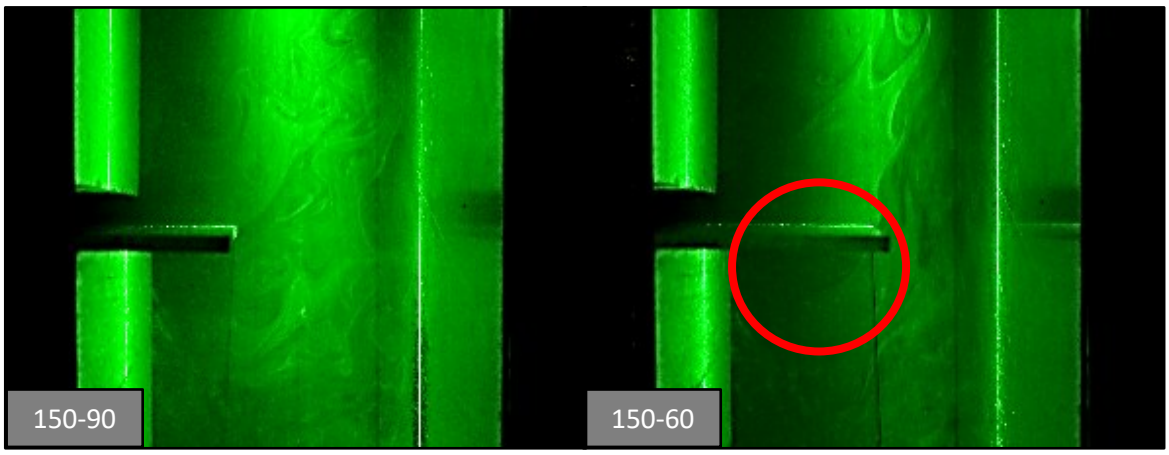
Fonte: Autor

Conforme observado na configuração 50-0, tem-se aqui também um patamar à montante da obstrução na configuração 150-0, gerado devido à recirculação do fluido nesta região.

Nota-se também que as configurações 150-30 e 150-0 seguiram o mesmo comportamento das já citadas configurações 50-10 e 50-0 tanto à montante quanto à jusante da obstrução. Em ambos os casos, a perda de carga singular devido a obstrução foi tão intensa que além de provocar uma redução da vazão escoada à montante, gerou uma estagnação do fluido e alteração de direção do escoamento, o que por fim levou à um aumento de temperatura claramente visto tanto à montante quanto à jusante na Fig. 126.

A configuração 150-60 também apresentou um aumento significativo de temperatura, logo, a perda de carga gerada por ela também foi notória. Percebe-se através da Fig. 127 a presença de uma estagnação do fluido próximo ao isolante nesta configuração em comparação com a configuração 150-90 (sem a presença de estagnação).

Figura 127 - Estagnação do escoamento à montante da obstrução na configuração 150-60



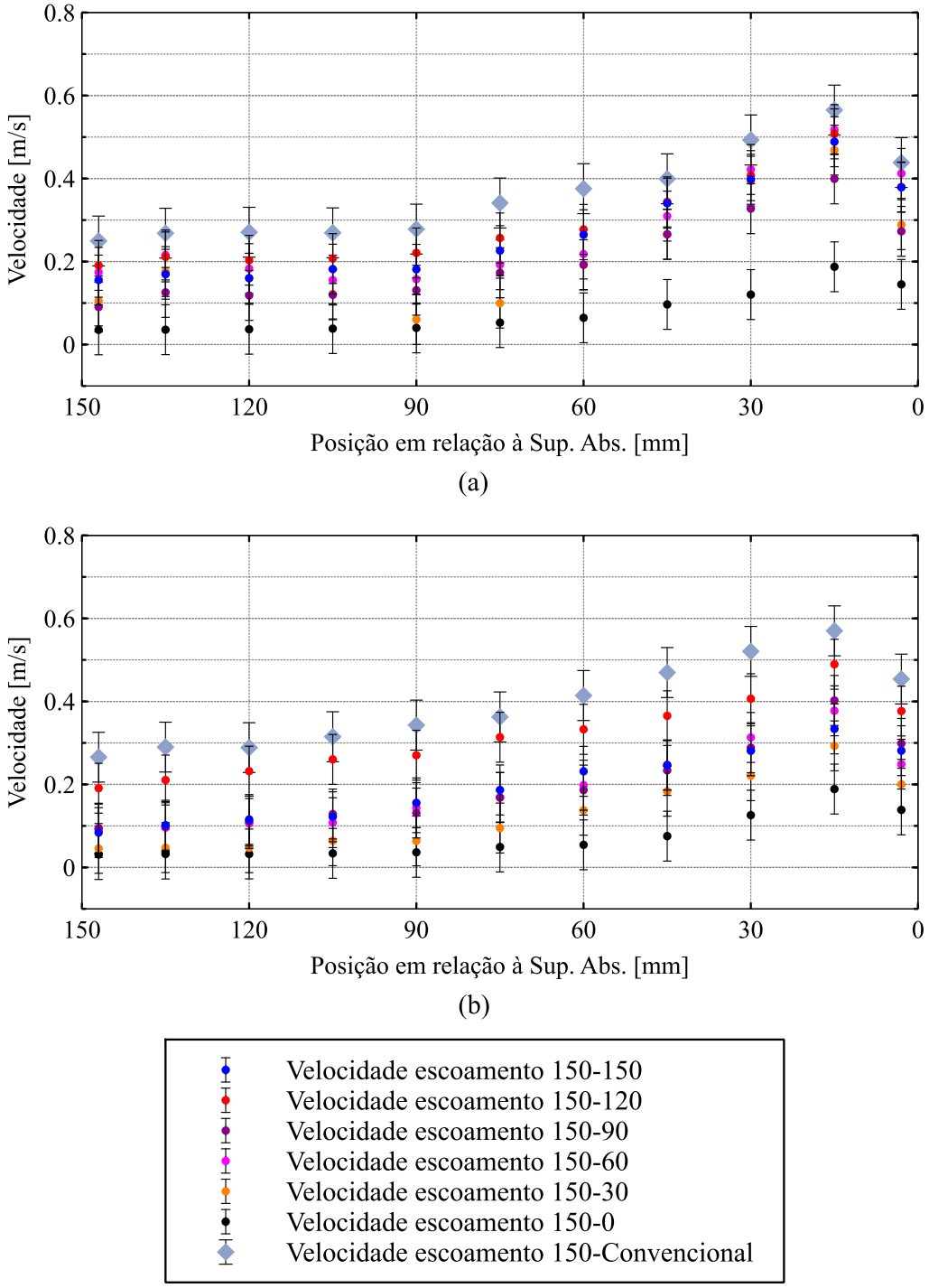
Fonte: Autor

Conforme comentado por Ding, Hasemi e Yamada (2005), a área das entradas superiores em uma chaminé solar de múltiplas entradas possui grande influência no desempenho da chaminé, sendo que aberturas maiores facilitam o arraste do fluido devido à uma menor perda de carga gerada. De qualquer modo, assim como ocorreu durante os testes, diversos autores na literatura como Gan (2006) e Ding, Hasemi notaram claramente uma menor ventilação resultante nos andares superiores (alturas superiores) em relação aos andares inferiores (alturas inferiores).

A influência da radiação interna na cavidade também pôde ser observada à montante da obstrução nas configurações 150-Convencional, 150-150, 150-120 e 150-60, notando-se um pico de temperatura próximo ao isolante nos perfis da Fig. 91 (para o meio da altura da chaminé). Entretanto, este pico de temperatura não indicou um aumento de empuxo térmico,

uma vez que não fora notado nenhum pico de velocidade próximo ao isolante através da Fig. 101 (meio) e Fig. 128 (b).

Figura 128 - Comparação dos perfis de velocidade nos escoamentos do topo (a) e meio (b) para todas as configurações com 150 mm de profundidade



Fonte: Autor

Diante dos perfis de velocidade e das vazões obtidas através da Fig. 104 para a chaminé solar com 150 mm de profundidade, pode-se afirmar que mesmo a vazão sendo maior em relação aos testes com profundidade de 50 mm, a velocidade média do escoamento se mostrou ser menor, o que não é desejável no caso da chaminé solar com obstrução, uma vez que a baixa energia cinética pode promover uma fácil alteração de direção ou mesmo estagnação do escoamento, dificultando o arraste do ar pela entrada superior. É, portanto, explicável, o surgimento de vórtices nesta geometria e principalmente o fato de o escoamento através da entrada superior ter alterado de sentido (o ar proveniente da entrada inferior saiu através da "entrada" superior) nas configurações 150-150, 150-120, 150-90 e 150-60.

Um resumo prático do que fora observado durante os experimentos visualmente, bem como pelas imagens capturadas e dados coletados, pode ser visto na Tab. 13.

Tabela 13 - Identificação das configurações com 150 mm de profundidade que promoveram remoção de ar da porção superior do ambiente

Configuração	150-Convencional	150-150	150-120	150-90	150-60	150-30	150-0
Visualização durante os experimentos	-	✗	✗	✗	✗	✔	✔
Imagens capturadas do escoamento	-	✗	✗	✗	±	✔	✔
Dados coletados	-	✔	✗	✔	✔	✔	✔

Fonte: Autor

Os vórtices existentes em tais configurações não permitiram uma boa conclusão acerca do comportamento da vazão da chaminé em função da obstrução, mas em geral houve uma redução de intensidade do perfil de velocidade ao se utilizar a obstrução. A Tab. 14 indica claramente que a vazão máxima dentre todos os testes foi atingida com a configuração 150-Convencional, resultando em uma vazão na saída de 71,7 $m^3.h^{-1}$, entretanto, esta configuração não permite uma vazão através da entrada superior pois não possui tal.

Tabela 14 - Vazão através da entrada superior (valores negativos representam um escoamento contrário) e porcentagem da vazão de saída em relação à configuração 150-Convencional

Configuração	150-Convencional	150-150	150-120	150-90	150-60	150-30	150-0
Vazão pela entrada superior [m^3/h]	-	14.30	-4.91	1.65	14.67	16.84	15.15
% de vazão em relação à convencional	100.0%	74.3%	80.9%	56.2%	73.8%	58.8%	21.1%

Fonte: Autor

A configuração 150-30, por sua vez, foi a única capaz de arrastar o ar através da entrada superior e ainda promover o escoamento proveniente da entrada inferior, entretanto, sua alta

perda de carga resultou em uma vazão de saída muito abaixo da vazão gerada pela configuração convencional, representando apenas 58,8% desta. De qualquer forma, é interessante notar que a configuração 150-30 é uma excelente opção caso seja necessário apenas a ventilação da porção superior, visto que a vazão de saída resultante se mostrou ser maior se comparada com a configuração 150-0 (bloqueio total da cavidade e formação de uma pequena chaminé solar na porção superior).

Assim como identificado na chaminé de 50 mm de profundidade, a cavidade com 150 mm também possui sensibilidade com a perda de carga singular, talvez uma sensibilidade ainda maior devido à baixa velocidade do escoamento. Tal aspecto concorda com o que fora observado na revisão da literatura, visto que cavidades de maior profundidade evidenciam as perdas singulares (BOUCHAIR, 1994)(MATHUR; BANSAL; MATHUR; JAIN; ANUPMA, 2006).

4.3.4 Comparação com os trabalhos publicados

Comparando os resultados obtidos no trabalho apresentado no congresso ENCIT2016 (VILLAS-BOAS; MALTA; GOUVEIA; ALBUQUERQUE, 2016) com os resultados do presente trabalho, nota-se que para uma chaminé de construção similar, porém com profundidade de 20 mm, obteve-se a vazão máxima ao se ajustar a placa de obstrução para uma abertura de apenas 5 mm, ou seja, percentualmente, 25% de abertura, já para as chaminés testadas no presente trabalho, obteve-se a vazão máxima ajustando a placa de obstrução em uma abertura de 30 mm para a chaminé com 50 mm de profundidade e 150 mm para a chaminé com 150 mm de profundidade, o que resulta em uma abertura percentual de 40% e 100%, respectivamente.

Uma análise mais profunda acerca dessa comparação indica que chaminés com profundidades menores possuem velocidade média maior e consequentemente uma energia cinética maior, o que de certa forma dificulta a formação de vórtices, propiciando a utilização de maiores obstruções sem perturbações do escoamento, mesmo com o aumento da perda de carga. Deste modo, chaminés com profundidade menores permitem com que a placa de obstrução possa causar uma obstrução percentualmente maior, permitindo que a vazão de saída seja composta percentualmente por um valor maior proveniente da entrada superior e assim levando à uma maior ventilação da porção superior do ambiente interno. Em contrapartida, uma chaminé com profundidade muito pequena restringiria o escoamento, reduzindo assim a vazão máxima possível de ser alcançada, logo, é de se suspeitar que exista uma combinação de

profundidade e obstrução ótima, na qual atinge-se um comprometimento entre a vazão máxima de saída e o máximo percentual de vazão através da entrada superior.

Com relação ao trabalho apresentado no congresso COBEM2017 (VILLAS-BOAS; MALTA; ALBUQUERQUE, 2017), a chaminé testada possuía mesmas dimensões da configuração aqui apresentada, com 150 mm de profundidade, entretanto, os resultados obtidos para o congresso diferiram bastante dos aqui apresentados, isto se deve principalmente à utilização de outro tipo de aquecedor para a chaminé solar, visto que para o congresso, fora utilizado o aquecedor por resistências elétricas em barras, ilustrado na Fig. 68, o qual fornecia uma energia maior à chaminé e pôde portanto, intensificar o processo de convecção natural, consequentemente alterando a dinâmica do escoamento. Tal observação serve como base para o dimensionamento de uma chaminé solar, visto que em ambientes com maior incidência de radiação solar por área, pode-se obter um ganho ao se utilizar chaminés com profundidade maior (desde que as perdas singulares não limitem o escoamento), bem como ao se implementar o conceito de dupla entrada.

5 CONCLUSÃO

Uma chaminé solar de dupla entrada foi proposta no presente trabalho. Uma análise minuciosa foi conduzida a fim de se identificar a viabilidade da remoção de ar proveniente da porção superior de ambientes internos, bem como comparar o desempenho da chaminé solar proposta em relação a chaminé solar convencional.

Foi utilizada uma obstrução em certa altura da chaminé para se promover o arraste do ar da porção superior do ambiente, entretanto, identificou-se inicialmente que obstruções expressivas causam grande perda de carga singular ao escoamento natural, ao passo que a partir de certa obstrução, o fluido inicia-se a estagnar abaixo da placa de obstrução, resultando em um aumento de temperatura do fluido à montante da obstrução devido ao maior tempo de residência do fluido nesta região.

As maiores vazões escoadas na cavidade puderam ser associadas à perfis de temperatura de baixa intensidade ou mesmo próximos dos perfis de temperatura obtidos pelas configurações convencionais. Já para a entrada superior, observou-se que um certo nível de vorticidade à jusante da obstrução é desejável, uma vez que este auxilia na homogeneização de temperatura nesta região e consequentemente na indução de empuxo térmico necessário para o arraste do ar através desta entrada.

Foi demonstrado, portanto, que é possível se promover a ventilação da porção superior do ambiente interno, entretanto, a vazão escoada através da entrada superior se revela menor em relação à vazão da entrada inferior, coincidindo com relatos da literatura (estudos com chaminés entre andares de prédios).

De qualquer modo, através dos estudos anteriores publicados em congressos e o estudo atual, nota-se claramente que chaminés de menores profundidades permitem uma maior obstrução visto os níveis de energia cinética presentes em cada situação. Desta forma, chaminés com profundidades menores, possuem velocidade média maior e consequentemente uma energia cinética maior, o que de certa forma dificulta a formação de vórtices ou alteração de direção do escoamento.

A configuração com 50 mm de profundidade e 30 mm de abertura na obstrução (50-30) se demonstrou ser extremamente interessante para o estudo aqui proposto, visto que não somente desenvolveu um escoamento na entrada superior, mas também pôde melhorar o desempenho geral da chaminé solar em relação à chaminé convencional (50-Convencional) ao escoar 23,0% de vazão a mais. Além disso, sua vazão de saída se revelou ser de mesma grandeza se comparada com a vazão obtida pela configuração com 150 mm de profundidade no modo

convencional (150-Convencional), logo, fica nítido que uma chaminé solar de menor porte pôde obter o mesmo desempenho de uma chaminé maior ao se utilizar o conceito aqui proposto.

A configuração com 150 mm de profundidade e 30 mm de abertura na obstrução (150-30) apresentou-se como uma excelente alternativa às configurações totalmente obstruídas que foram testadas (150-0 e 50-0), uma vez que a vazão através da entrada superior retornou um valor maior.

Por fim, nota-se que a chaminé solar, seja ela de única entrada ou múltipla entrada, deve ser projetada de acordo com a intensidade de radiação esperada para seu local de instalação, de tal modo que, para incidências maiores de radiação, as temperaturas superficiais esperadas são maiores e, portanto, permitem uma otimização da vazão com o devido aumento de profundidade e de áreas de entrada e saída (até um certo limite, sendo este em função da altura da cavidade).

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Futuros estudos podem ser realizados a fim de se aperfeiçoar a chaminé proposta e torná-la ainda mais eficaz ao promover a remoção de ar do ambiente interno. Os pontos levantados a seguir são recomendados pelo autor deste trabalho para tais estudos:

A utilização de uma entrada superior de maior área pode ser vantajosa, visto que a redução de perda de carga nesta abertura facilitaria a entrada de ar por arraste através desta, assim como observado por exemplo no trabalho de Ding, Hasemi e Yamada (2005), possibilitando a utilização de maiores aberturas na geometria com 50 mm de profundidade ou mesmo melhorando o desempenho geral da chaminé proposta (com obstrução) na geometria de 150 mm de profundidade.

A utilização de uma constrição gradual e posterior expansão controlada (similar à um Venturi) pode reduzir a quantidade de vórtices à montante da obstrução e a enorme perda de carga devido à expansão do fluido, melhorando a eficácia da obstrução e consequentemente o desempenho geral da chaminé solar proposta.

A influência das geometrias de entrada e saída na chaminé proposta (com obstrução) não pôde ser analisada, entretanto, conforme comentado na literatura, tais regiões podem apresentar grande impacto na vazão de saída.

Conforme comentado por Khanal e Lei (2015) e Mathur, Bansal, Mathur, Jain e Anupma (2006), existe uma influência do ambiente real sobre a vazão escoada da chaminé solar, portanto, é interessante analisar a chaminé solar diante das condições solares reais, coletando dados no decorrer do dia.

A altura na qual a entrada superior é inserida pode favorecer o escoamento através desta e até mesmo impedir que haja fuga parcial do escoamento proveniente da entrada inferior em certas configurações, portanto, um estudo dedicado à esta variação possui grande relevância no conceito proposto.

REFERÊNCIAS

ABDULSALAM, A.; IDRIS, A.; MOHAMED, T. A.; AHSAN, A.. The development and applications of solar pond: a review. **Desalination and Water Treatment**, v. 53, n. 9, p. 2437-2449, Jan. 2014. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19443994.2013.870710. Acesso em: 6 abr. 2019.

AFONSO, C.; OLIVEIRA, A.. Solar chimneys: simulation and experimente. **Energy and Buildings**, v. 32, n. 1, p. 71-79, Jun. 2000. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778899000389. Acesso em: 6 abr. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Distrito Federal: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2002. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/livro_atlas.pdf. Acesso em: 6 abr. 2019.

ALLOUHI, A.; JAMIL, A.; KOUSKSOU, T.; RHAFIKI, T. E.; MOURAD, Y.; ZERAOULI, Y.. Solar domestic heating water systems in Morocco: an energy analysis. **Energy Conversion and Management**, v. 92, p. 105-113, Mar. 2015. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890414010942. Acesso em: 6 abr. 2019.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE 55**: thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, 2010.

AMORI, K. E.; MOHAMMED, S. W.. Experimental and numerical studies of solar chimney for natural ventilation in Iraq. **Energy and Buildings**, v. 47, p. 450-457, Abr. 2012. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811006244. Acesso em: 6 abr. 2019.

ANGELO, G.. **Análise numérica da dinâmica do escoamento em circuitos de circulação natural**. 2013. 182 f. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Reatores) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85133/tde-20092013-092635/publico/2013AngeloAnalise.pdf. Acesso em: 6 abr. 2019.

ARCE, J.; JIMÉNEZ, M. J.; GUZMÁN, J. D.; HERAS, M. R.; ALVAREZ, M. R.; XAMÁN, J.. Experimental study for natural ventilation on a solar chimney. **Renewable Energy**, v. 34, n. 12, p. 2928-2934, Dez. 2009. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148109001931. Acesso em: 6 abr. 2019.

ASADI, S.; FAKHARI, M.; FAYAZ, R.; MAHDAVIPARSA, A.. The effect of solar chimney layout on ventilation rate in buildings. **Energy and Buildings**, v. 123, p. 71-78, Jul. 2016. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816303036. Acesso em: 6 abr. 2019.

BANSAL, N. K.. Solar air heater applications in India. **Renewable Energy**, v. 16, n. 1-4, p. 618-623, Abr. 1999. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148198002377. Acesso em: 6 abr. 2019.

BANSAL, N. K.; MATHUR, J.; MATHUR, S.; JAIN, M.. Modeling of window-sized solar chimneys for ventilation. **Building and Environment**, v. 40, n. 10, p. 1302-1308, Out. 2005. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132304003245. Acesso em: 6 abr. 2019.

BANSAL, N. K.; MATHUR, R.; BHANDARI, M. S.. Solar chimney for ventilation. **Building and Environment**, v. 28, n. 3, p. 373-377, Jul. 1993. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360132393900422. Acesso em: 6 abr. 2019.

BANSAL, N. K.; RAM, S.; SINGH, S.. Parametric study of a thermal trap solar energy collector. **Energy Research**, v. 8, n. 3, p. 203-211, Fev. 1984. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.4440080302. Acesso em: 6 abr. 2019.

BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S.; INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.. **Fundamentals of heat and mass transfer**. Nova Jersey: John Wiley and Sons, 2011. Disponível em: https://books.google.com.br/books/about/Fundamentals_of_Heat_and_Mass_Transfer.html?id=vvyIoXEywMoC&redir_esc=y. Acesso em: 6 abr. 2019.

BERNARDES, M. A. S.; VOB, A.; WEINREBE, G.. Thermal and technical analyses of solar chimneys. **Solar Energy**, v. 75, n. 6, p. 511-524, Dez. 2003. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X03003542. Acesso em: 6 abr. 2019.

BEZERRA, A. M.. **Energia solar:** aquecedores de água. Paraná: LITEL, 1982. 129 p.

BIANCO, C. F.. **Parede Trombe: estudo experimental comparativo de desempenho térmico para aquecimento e arrefecimento na cidade de São Paulo**. 2016. 343 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-02092016-153549/publico/corinafariarev.pdf. Acesso em: 6 abr. 2019.

BILGEN, E.; RHEAULT, J.. Solar chimney power plants for high latitudes. **Solar Energy**, v. 79, n. 5, p. 449-458, Nov. 2005. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X05000344. Acesso em: 6 abr. 2019.

BOUCHAIR, A.. Solar chimney for promoting cooling ventilation in southern Algeria. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 15, n. 2, p. 81-93, Maio 1994. Disponível em: https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/014362449401500203. Acesso em: 6 abr. 2019.

BOUCHAIR, A.; FITZGERALD, D.. The optimum azimuth for a solar chimney in hot climates. **Energy and Buildings**, v. 12, n. 2, p. 135-140, Set. 1988. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378778888900758. Acesso em: 6 abr. 2019.

BUREK, S. A. M.; HABEB, A.. Air flow and thermal efficiency characteristics in solar chimneys and Trombe walls. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 2, p. 128-135, Fev. 2007. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778806001356. Acesso em: 6 abr. 2019.

CAVALCANTI, F. A. M. S.. **Paredes trombe no Brasil**: análise do potencial de utilização para aquecimento e refrigeração. 2013. 144 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/102/102131/tde-30042014-095503/pt-br.php. Acesso em: 6 abr. 2019.

CHAN, H. Y.; RIFFAT, S. B.; ZHU, J.. Review of passive solar heating and cooling technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 2, p. 781-789, Fev. 2010. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109002615. Acesso em: 6 abr. 2019.

CHANDEL, S. S.; SHARMA, V.; MARWAH, B. M.. Review of energy efficient features in vernacular architecture for improving indoor thermal comfort conditions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 65, p. 459-477, Nov. 2016. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116303677. Acesso em: 6 abr. 2019.

CHANTAWONG, P.. Field-measured Performance of Lightweight Roof Chimney Integrated with DC fans. **Energy Procedia**, v. 138, p. 44-49, Out. 2017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217349858. Acesso em: 6 abr. 2019.

CHANTAWONG, P.. Natural Ventilation Using Glazed Solar Chimney and Hot Water Collector Production. **Energy Procedia**, v. 138, p. 26-31, Out. 2017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217349767. Acesso em: 6 abr. 2019.

CHANTAWONG, P.; HIRUNLABH, J.; ZEGHMATI, B.; KHEDARI, J.; TEEKASAP, S.; WIN, M. M.. Investigation on thermal performance of glazed solar chimney walls. **Solar Energy**, v. 80, n. 3, p. 288-297, Mar. 2006. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X05000940. Acesso em: 6 abr. 2019.

CHEN, Z. D.; BANDOPADHAYAY, P.; HALLDORSSON, J.; BYRJALSEN, C.; HEISELBERG, P.; LI, Y.. An experimental investigation of a solar chimney model with uniform wall heat flux. **Building and Environment**, v. 38, n. 7, p. 893-906, Jul. 2003. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036013230300057X. Acesso em: 6 abr. 2019.

CUCE, E.; CUCE, P. M.. A comprehensive review on solar cookers. **Applied Energy**, v. 102, p. 1399-1421, Fev. 2013. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261912006423. Acesso em: 6 abr. 2019.

DAN, A.; BARSHILIA, H. C.; CHATTOPADHYAY, K.; BASU, B.. Solar energy absorption mediated by surface plasma polaritons in spectrally selective dielectric-metal-dielectric coatings: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 1050-1077, Nov. 2017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117306986. Acesso em: 6 abr. 2019.

DING, W.; HASEMI, Y.; YAMADA, T.. Natural ventilation performance of a double-skin façade with a solar chimney. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 4, p. 411-418, Abr. 2005. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778804002452. Acesso em: 6 abr. 2019.

EL-SEBAII, A. A.; RAMADAN, M. R. I.; ABOUL-ENEIN, S.; KHALLAF, A. M.. History of the solar ponds: a review study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 6, p. 3319-3325, Ago. 2011. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111001456. Acesso em: 6 abr. 2019.

FANGER, P. O.. Assessment of man's thermal comfort in practice. **British Journal of Industrial Medicine**, v. 30, n. 4, p. 313-324, Out. 1973. Disponível em: https://www.jstor.org/stable/27722846?Search=yes&resultItemClick=true&searchText=Assessment&searchText=of&searchText=man%27s&searchText=thermal&searchText=comfort&searchText=in&searchText=practice&searchUri=%2Faction%2FdoBasicSearch%3Ffilter%3D%26amp%3BQuery%3DAssessment%2Bof%2Bman%2527s%2Bthermal%2Bcomfort%2Bin%2Bpractice&ab_segments=0%2Fdefault-2%2Fcontrol&refreqid=search%3A99a5200b561e7bc2252eed4563f54199&seq=1#page_scan_tab_contents. Acesso em: 6 abr. 2019.

FEDOROV, A. G.; VISKANTA, R.. Turbulent natural convection heat transfer in an asymmetrically heated, vertical parallel-plate channel. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 40, n. 16, p. 3849-3860, Out. 1997. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931097000434. Acesso em: 6 abr. 2019.

FELIX, T.. **Devices for lowering the temperature of a body by heat radiation therefrom**. US n. US 3310102A, 21 Mar. 1984.

GAN, G.. A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings. **Energy and Buildings**, v. 27, n. 1, p. 37-43, Fev. 1998. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778897000248. Acesso em: 6 abr. 2019.

GAN, G.. S Impact of computational domain on the prediction of buoyancy-driven ventilation cooling. **Building and Environment**, v. 45, n. 5, p. 1173-1183, Maio 2010a. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132309003230. Acesso em: 6 abr. 2019.

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. 2010b. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778810000642. Acesso em: 6 abr. 2019.

GAN, G.. Simulation of buoyancy-induced flow in open cavities for natural ventilation. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 5, p. 410-420, Maio 2006. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778805001404. Acesso em: 6 abr. 2019.

HAAF, W.; FRIEDRICH, K.; MAYR, G.; SCHLAICH, J.. Solar chimneys part I: principle and construction of the pilot plant in Manzanares. **International Journal of Solar Energy**, v. 2, n. 1, p. 3-20, Abr. 1983. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01425918308909911. Acesso em: 6 abr. 2019.

HEREZ, A.; RAMADAN, M.; KHALED, M.. Review on solar cooker systems: economic and environmental study for different Lebanese scenarios. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, n. 1, p. 421-432, Jan. 2018. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211731167X. Acesso em: 6 abr. 2019.

HIRUNLABH, J.; KONGDUANG, W.; NAMPRAKAI, P.; KHEDARI, J.. Study of natural ventilation of houses by a metallic solar wall under tropical climate. **Renewable Energy**, v. 18, n. 1, p. 109-119, Set. 1999. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148198007836. Acesso em: 6 abr. 2019.

HULL, J. R.. **Physics of the solar pond**. 1979. Tese (Doutorado em Física) – University Microfilms International, Michigan, 1979. Disponível em: https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=7607&context=rtd. Acesso em: 6 abr. 2019.

IMRAN, A. A.; JALIL, J. M.; AHMED, S. T.. Induced flow for ventilation and cooling by a solar chimney. **Renewable Energy**, v. 78, p. 236-244, Jun. 2015. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115000269. Acesso em: 6 abr. 2019.

INNOVA AIRTECH INSTRUMENTS. **Thermal comfort**.
1997. Disponível em: http:// http://www.blowtex-educair.it/downloads/thermal%20comfort.htm.
Acesso em: 6 abr. 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7730**: ergonomics of the termal environment – analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local termal comfort criteria. Genebra, nov. 2005.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9886**: ergonomics – evaluation of termal strain by physiological measurements. Genebra, fev. 2004.

JAISANKAR, S.; ANANTH, J.; THULASI, S.; JAYASUTHAKAR, S. T.; SHEEBA, K. N.. A comprehensive review on solar water heaters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 6, p. 3045-3050, Ago. 2011. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111001092. Acesso em: 6 abr. 2019.

JING, H.; CHEN, Z.; LI, A.. Experimental study of the prediction of the ventilation flow rate through solar chimney with large gap-to-height ratios. **Building and Environment**, v. 89, p. 150-159, Jul. 2015. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036013231500075X. Acesso em: 6 abr. 2019.

KALKAN, N.; DAGTEKIN, I.. Passive solar techniques to improve thermal comfort and reduce energy consumption of domestic use. **International Journal of Energy and Power Engineering**, v. 10, n. 4, p. 489-494, 2016. Disponível em: https://waset.org/publications/10004118/passive-solar-techniques-to-improve-thermal-comfort-and-reduce-energy-consumption-of-domestic-use-. Acesso em: 6 abr. 2019.

KAYS, W. M.; CRAWFORD, M. E.. **Convective heat and mass transfer**. 3. ed. Nova Iorque: Access Intelligence, 1993. 601 p.

KHALILIAN, M.. Energetic performance analysis of solar pond with and without shading effect. **Solar Energy**, v. 157, p. 860-868, Nov. 2017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X17307818. Acesso em: 6 abr. 2019.

KHANAL, R.; LEI, C.. A numerical investigation of buoyancy induced turbulent air flow in an inclined passive wall solar chimney for natural ventilation. **Energy and Buildings**, v. 93, p. 217-226, Abr. 2015. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778815001140. Acesso em: 6 abr. 2019.

KHANAL, R.; LEI, C.. An experimental investigation of an inclined passive wall solar chimney for natural ventilation. **Solar Energy**, v. 107, p. 461-474, Set. 2014. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X14002618. Acesso em: 6 abr. 2019.

KHANAL, R.; LEI, C.. Flow reversal effects on buoyancy induced air flow in a solar chimney. **Solar Energy**, v. 86, n. 9, p. 2783-2794, Set. 2012. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X12002277. Acesso em: 6 abr. 2019.

KHANAL, R.; LEI, C.. Solar chimney—a passive strategy for natural ventilation. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 8, p. 1811-1819, Ago. 2011. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811001447. Acesso em: 6 abr. 2019.

KHEDARI, J.; BOONSRI, B.; HIRUNLABH, J.. Ventilation impact of a solar chimney on indoor temperature fluctuation and air change in a school building. **Energy and Buildings**, v. 32, n. 1, p. 89-93, Jun. 2000. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778899000420. Acesso em: 6 abr. 2019.

KHEDARI, J.; LERTSATITTHANAKORN, C.; PRATINTHONG, N.; HIRUNLABH, J.. The modified Trombe wall: a simple ventilation means and an efficient insulating material. **International Journal of Ambient Energy**, v. 19, n. 2, p. 104-110, Mar. 2011. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01430750.1998.9675299. Acesso em: 6 abr. 2019.

KOONSRISUK, A.; CHITSOMBOON, T.. Dynamic similarity in solar chimney modeling. **Solar Energy**, v. 81, n. 12, p. 1439-1446, Dez. 2007. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X0700076X. Acesso em: 6 abr. 2019.

KOONSRISUK, A.; LORENTE, S.; BEJAN, A.. Constructal solar chimney configuration. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 53, n. 1-3, p. 327-333, Jan. 2010. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931009005079. Acesso em: 6 abr. 2019.

KREIDER, J. F.; KRETH, F.. **Solar energy handbook**. Nova Iorque: Access Intelligence, 1981. 1000 p.

KUMAR, M.; SANSANIWAL, S. K.; KHATAK, P.. Progress in solar dryers for drying various commodities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 346-360, Mar. 2016. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211501237X. Acesso em: 6 abr. 2019.

LI, Y.; LIU, S.; SHUKLA, A.. Experimental analysis on use of thermal conductivity enhancers (TCEs) for solar chimney applications with energy storage layer. **Energy and Buildings**, v. 116, p. 35-44, Mar. 2016. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778815304850. Acesso em: 6 abr. 2019.

LUNDE, P. J. **Solar thermal engineering: space heating and hot water systems**. Nova Iorque: John Wiley, 1980. 612 p.

MACIAS, M.; MATEO, A.; SCHULER, M.; MITRE, E. M.. Application of night cooling concept to social housing design in dry hot climate. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 9, p. 1104-1110, Set. 2006. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778806000181. Acesso em: 6 abr. 2019.

MAEREFAT, M.; HAGHIGHI, A. P.. Natural cooling of stand-alone houses using solar chimney and evaporative cooling cavity. **Renewable Energy**, v. 35, n. 9, p. 2040-2052, Set. 2010. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148110000546. Acesso em: 6 abr. 2019.

MALTA, F. P.; ALBUQUERQUE, C.; JÚNIOR, S. O.; YANAGIHARA, J. I.. Energy and exergy analysis inside a trapezoidal solar chimney from shipping containers to improve termal comfort. In: BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING, 16., 2016, Vitória.

MALTA, F. P.; GOUVEIA, J. L. F.; ALBUQUERQUE, C.. A study of a solar chimney to improve comfort inside shipping containers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EFFICIENCY, COST, OPTIMIZATION, SIMULATION AND ENVIRONMENTAL IMPACT OF ENERGY SYSTEMS, 27., 2014, Turku.

MALTA, F. P.; GOUVEIA, J. L. F.; ALBUQUERQUE, C.. Investigation of natural convection in solar chimney with trapezoidal section to improve comfort inside shipping containers. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 22., 2013, Vitória.

MARTYNENKO, O. G.; KHRAMTSOV, P. P.. **Free-convective heat transfer**: with many photographs of flows and heat Exchange. Berlim: Springer, 2005. Disponível em: https://www.springer.com/gb/book/9783540250012. Acesso em: 6 abr. 2019.

MATHUR, J.; BANSAL, N. K.; MATHUR, S.; JAIN, M.; ANUPMA. Experimental investigations on solar chimney for room ventilation. **Solar Energy**, v. 80, n. 8, p. 927-935, Ago. 2006b. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X05003014. Acesso em: 6 abr. 2019.

MATHUR, J.; MATHUR, S.; ANUPMA. Summer-performance of inclined roof solar chimney for natural ventilation. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 10, p. 1156-1163, Out. 2006a. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778806000375. Acesso em: 6 abr. 2019.

MATHUR, R.. Natural ventilation system in solar passive architecture. 1994. Tese (Doutorado) – Indian Institute of Technology, Delhi, 1994. Disponível em: https://scholar.google.be/citations?user=VQX5PjcAAAAJ&hl=fr. Acesso em: 6 abr. 2019.

MING, T.. **Solar chimney power plant generating technology**. Zhejiang: Elsevier, 2016. Disponível em: https://www.elsevier.com/books/solar-chimney-power-plant-generating-technology/ming/978-0-12-805370-6. Acesso em: 6 abr. 2019.

MORSE, E. S.. **Warming and ventilating apartments by the sun's rays**. US n. US 246626A, 6 Set. 1881.

MOSHFEGH, B.; SANDBERG, M.. Flow and heat transfer in the air gap behind photovoltaic panels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 2, n. 3, p. 287-301, Set. 1998. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032198000057. Acesso em: 6 abr. 2019.

MOSHFEGH, B.; SANDBERG, M.. Investigation of fluid flow and heat transfer in a vertical channel heated from one side by PV elements, part I - numerical study. **Renewable Energy**, v. 8, n. 1-4, p. 248-253, Ago. 1996. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0960148196888562. Acesso em: 6 abr. 2019.

MUSTAYEN, A. G. M. B.; MEKHILEF, S.; SAIDUR, R.. Performance study of different solar dryers: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 34 p. 463-470, Jun. 2014. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114001816. Acesso em: 6 abr. 2019.

NAYI, K. H.; MODI, K. V.. Pyramid solar still: a comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, n. 1, p. 136-148, Jan. 2018. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211731064X. Acesso em: 6 abr. 2019.

NKHONJERA, L.; BELLO-OCHENDE, T.; JOHN, G.; KING'ONDU, C. K.. A review of thermal energy storage designs, heat storage materials and cooking performance of solar cookers with heat storage. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 157-167, Ago. 2017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116307043. Acesso em: 6 abr. 2019.

ÖZISIK, M. N.. **Radiative transfer and interactions with conduction and convection**. Nova Iorque: Wiley-Interscience: John Wiley, 1973. 575p.

PATEL, M. R.. **Wind and solar power systems**: design, analysis, and operation. 2. ed. Florida: Taylor and Francis, 2006.

PÉREZ-LOMBARD, Luis. A review on buildings energy consumption information. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 3, p. 394-398, 2008. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778807001016. Acesso em: 6 abr. 2019.

PINARD, S.; FRAISSE, G.; MÉNÉZO, C.; RENZI, V.. Experimental study of a chimney enhanced heat emitter designed for internal renovation of buildings. **Energy and Buildings**, v. 54, p. 169-178, Nov. 2012. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812003374. Acesso em: 6 abr. 2019.

PRAKASH, P.; VELMURUGAN, V.. Parameters influencing the productivity of solar stills – a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 585-609, Set. 2015. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115004062. Acesso em: 6 abr. 2019.

PUNYASOMPUN, S.; HIRUNLABH, J.; KHEDARI, J.; ZEGHMATI, B.. Investigation on the application of solar chimney for multi-storey buildings. **Renewable Energy**, v. 34, n. 12, p. 2545-2561, Dez. 2009. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014810900127X. Acesso em: 6 abr. 2019.

RUFUSS, D. D. W.; INIYAN, S.; SUGANTHI, L.; DAVIES, P. A.. Solar stills: a comprehensive review of designs, performance and material advances. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 63, p. 464-496, Set. 2016. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116301800. Acesso em: 6 abr. 2019.

SÁ, A. C. B.. **Parede de Trombe: análise experimental e simulação de desempenho térmico**. 2011. 198 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Beira Interior, Covilhã, 2011. Disponível em: https://cmadeubi.files.wordpress.com/2013/05/2011-thesis-ana-briga-sc3a1.pdf. Acesso em: 6 abr. 2019.

SAADATIAN, O.; SOPIAN, K.; LIM, C. H.; ASIM, N.; SULAIMAN, M. Y.. Trombe walls: a review of opportunities and challenges in research and development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 8, p. 6340-6351, Out. 2012. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211200425X. Acesso em: 6 abr. 2019.

SANDBERG, M.; MOSHFEGH, B.. Investigation of fluid flow and heat transfer in a vertical channel heated from one side by PV elements, part II - experimental study. **Renewable Energy**, v. 8, n. 1-4, p. 254-258, Ago. 1996. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0960148196888574. Acesso em: 6 abr. 2019.

SCHLICHTING, H.. **Boundary-layer theory**. 7. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1979. Disponível em: https://books.google.com.br/books/about/Boundary_layer_theory.html?id=fYdTAAAAMAAJ&redir_esc=y. Acesso em: 6 abr. 2019.

SHANG, D.. **Free convection film flows and heat transfer. Berlim**: Springer, 2006. Disponível em: https://www.springer.com/us/book/9783642067105. Acesso em: 6 abr. 2019.

SIVAKUMAR, V.; SUNDARAM, E. G.. Improvement techniques of solar still efficiency: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, p. 246-264, Dez. 2013. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113004826. Acesso em: 6 abr. 2019.

SUSANTI, L.; HOMMA, H.; MATSUMOTO, H.; SUZUKI, Y.; SHIMIZU, M.. A laboratory experiment on natural ventilation through a roof cavity for reduction of solar heat gain. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 12, p. 2196-2206, 2008. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778808001503. Acesso em: 6 abr. 2019.

TAN, A. Y. K.; WONG, N. H.. Natural ventilation performance of classroom with solar chimney system. **Energy and Buildings**, v. 53, p. 19-27, Out. 2012. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812002976. Acesso em: 6 abr. 2019.

THANTONG, P.; CHANTAWONG, P.. Experimental study of a solar wall collector with PCM towards the natural ventilation of model house. **Energy Procedia**, v. 138, p. 32-37, Out. 2017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217349792. Acesso em: 6 abr. 2019.

THIRUGNANASAMBANDAM, M.; INIYAN, S.; GOIC, R.. A review of solar thermal Technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 1, p. 312-322, Jan. 2010. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109001750. Acesso em: 6 abr. 2019.

TRITTON, D. J.. **Physical fluid dynamics**. Oxford: Oxford University Press, 1988. Disponível em: https://global.oup.com/academic/product/physical-fluid-dynamics-9780198544937?q=PHYSICAL%20FLUID%20DYNAMICSS&lang=en&cc=br#. Acesso em: 6 abr. 2019.

TURNS, S.; KRAIGE, D.. **Properties tables booklet for thermal fluids engineering**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. Disponível em: https://www.cambridge.org/core/books/properties-tables-booklet-for-thermal-fluids-engineering/87C86A1E7002873A08006181E9ED5BBE. Acesso em: 6 abr. 2019.

VELT, K. B.; DAANEN, H. A. M.. Optimal bus temperature for thermal comfort during a cool day. **Applied Ergonomics**, v. 62, p. 72-76, Jul. 2017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003687017300480. Acesso em: 6 abr. 2019.

VIJAYAVENKATARAMAN, S.; INIYAN, S.; GOIC, R.. A review of solar drying technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 5, p. 2652-2670, Jun. 2012. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112000081. Acesso em: 6 abr. 2019.

VILLAS-BOAS, T. F.; MALTA, F. P.; ALBUQUERQUE, C.. Analysis of a solar chimney with double inlet by means of venturi effect. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 24., 2017, Curitiba.

VILLAS-BOAS, T. F.; MALTA, F. P.; GOUVEIA, J. L. F.; ALBUQUERQUE, C.. Study of a wall solar chimney to remove air from the top of an indoor environment. In: BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING, 16., 2016, Vitória.

VILLAS-BOAS, T. F.; MALTA, F. P.; GOUVEIA, J. L. F.; ALBUQUERQUE, C.. Study of different configurations of solar chimney to improve comfort inside shipping containers. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 23., 2015, Rio de Janeiro.

VOGEL, W.; KALB, H.. **Large-scale solar thermal power**: technologies, costs and development. Weinheim: Wiley-VCH, 2010.

WANG, R. Z.; ZHAI, X. Q.. Development of solar thermal technologies in China. **Energy**, v. 35, n. 11, p. 4407-4416, Nov. 2010. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544209001066. Acesso em: 6 abr. 2019.

WINTER, C. J.; SIZMANN, R. L.; VANT-HULL, L. L.. **Solar power plants**: fundamentals, technology, systems, economics. Berlim: Springer, 1991.

WORLD ENERGY COUNCIL. **World energy resources**. Londres: World Energy Council, 2013. Disponível em: https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/Complete_WER_2013_Survey.pdf. Acesso em: 6 abr. 2019.

WRIGHT, J. L.; JIN, H.; HOLLANDS, K. G. T.; NAYLOR, D.. Flow visualization of natural convection in a tall, air-filled vertical cavity. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 49, n. 5-6, p. 889-904, Mar. 2006. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931005005922. Acesso em: 6 abr. 2019.

YADAV, S.; SUDHAKAR, K.. Different domestic designs of solar stills: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, p. 718-731, Jul. 2015. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115002178. Acesso em: 6 abr. 2019.

ZHAI, X. Q.; DAI, Y. J.; WANG, R. Z.. Comparison of heating and natural ventilation in a solar house induced by two roof solar collectors. **Applied Thermal Engineering**, v. 25, n. 5-6, p. 741-757, Abr. 2005a. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431104002145. Acesso em: 6 abr. 2019.

ZHAI, X. Q.; DAI, Y. J.; WANG, R. Z.. Experimental investigation on air heating and natural ventilation of a solar air collector. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 4, p. 373-381, Abr. 2005b. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778804002397. Acesso em: 6 abr. 2019.

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. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111002498. Acesso em: 6 abr. 2019.

ZHAI, X. Q.; WANG, R. Z.. Experiences on solar heating and cooling in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 4, p. 1110-1128, Maio 2008. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032106001638. Acesso em: 6 abr. 2019.