



Leticia de Oliveira Neves

CHAMINÉ SOLAR COMO ELEMENTO INDUTOR DE VENTILAÇÃO NATURAL EM EDIFICAÇÕES

Campinas, SP
2012



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Tecnologia e Cidade

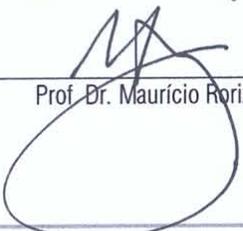
CHAMINÉ SOLAR COMO ELEMENTO INDUTOR DE VENTILAÇÃO NATURAL EM EDIFICAÇÕES

Leticia de Oliveira Neves

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Tecnologia e Cidade da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Arquitetura, Tecnologia e Cidade.

Orientador: prof. Dr. Maurício Roriz

Este exemplar corresponde à versão final da tese defendida pela aluna, orientada pelo prof. Dr. Maurício Roriz



Prof. Dr. Maurício Roriz

Campinas, SP
2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

N414c Neves, Leticia de Oliveira
Chaminé solar como elemento indutor de ventilação natural em edificações / Leticia de Oliveira Neves. -- Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: Maurício Roriz.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Ventilação natural. 2. Energia solar. 3. Simulação computacional. I. Roriz, Maurício. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Título em Inglês: Solar chimney for natural ventilation induction in buildings

Palavras-chave em Inglês: Natural ventilation, Solar energy, Computer simulation

Área de concentração: Arquitetura, Tecnologia e Cidade

Titulação: Doutor em Arquitetura, Tecnologia e Cidade

Banca examinadora: Lucila Chebel Labaki, Doris Catharine Cornélie Knatz Kowaltowski, João Roberto Gomes de Faria, Fernando Marques da Silva

Data da defesa: 11-06-2012

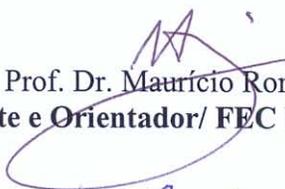
Programa de Pós Graduação: Arquitetura, Tecnologia e Cidade

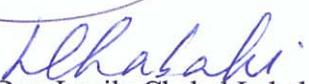
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

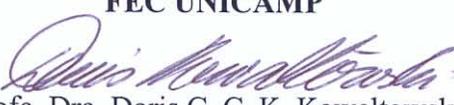
**Chaminé solar como elemento indutor
de ventilação natural em edificações**

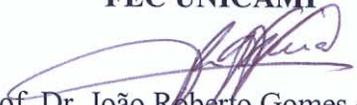
Leticia de Oliveira Neves

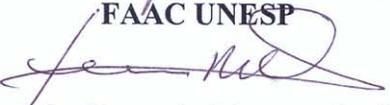
Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:


Prof. Dr. Maurício Roriz
Presidente e Orientador/ FEC UNICAMP


Profa. Dra. Lucila Chebel Labaki
FEC UNICAMP


Profa. Dra. Doris C. C. K. Kowaltowski
FEC UNICAMP


Prof. Dr. João Roberto Gomes de Faria
FAAC UNESP


Prof. Dr. Fernando Marques da Silva
LNEC Lisboa, Portugal

Campinas, 11 de junho de 2012

De tudo, ficaram três coisas: a certeza de que ele estava sempre começando, a certeza de que era preciso continuar e a certeza de que seria interrompido antes de terminar. Fazer da interrupção um caminho novo. Fazer da queda um passo de dança, do medo uma escada, do sono uma ponte, da procura um encontro.

Fernando Sabino

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de expressar minha imensa gratidão ao meu orientador, o professor Maurício Roriz. Muito além de uma dedicada orientação, ele esteve sempre muito presente nesses quatro últimos anos da minha vida, como professor, amigo e incentivador. Com sua maneira muito especial de ser, sempre muito exigente e, ao mesmo tempo, divertido e descontraído, ele me fez ver que posso ir muito além do que eu antes imaginava. E este é o maior legado que posso levar dessa experiência.

Gostaria de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro ao desenvolvimento desta pesquisa, advindo tanto da bolsa de estudos como do projeto de Auxílio à Pesquisa, vinculado ao meu orientador, que financiou a etapa experimental de estudos.

Quero dedicar um especial agradecimento à professora Lucila Chebel Labaki, não somente pelas contribuições dadas no exame de qualificação, mas também por todo o apoio nas questões burocráticas da Faculdade. O tempo e o esforço que ela dedicou para me auxiliar nessas questões foi essencial para a conclusão deste trabalho.

Meu especial agradecimento também ao professor Fernando Marques da Silva, do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) de Portugal, pela atenção dedicada à minha pesquisa e pela orientação durante meu estágio no laboratório. Sua contribuição foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho. Além disso, sua amizade foi uma prazerosa consequência do meu tempo de permanência em Portugal. O estágio no LNEC também teve importantes contribuições de Jorge Saraiva, Pedro Peixeiro e Arménio Gomes da Silva, por quem eu gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos.

Agradeço ao professor Edson Matsumoto, pelas contribuições dadas no exame de qualificação e pelas orientações que me guiaram no desenvolvimento dos ensaios em túnel de vento.

Aos professores e funcionários da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo que participaram deste meu período de formação.

Aos amigos que muito me ajudaram no desenvolvimento desta pesquisa, através de trocas de experiências e contribuições na área, em especial Victor Roriz, Kelen Dornelles, Rodrigo Cavalcante e Fernando Cavalcanti. Também aos amigos que, apesar de não terem participação direta no desenvolvimento do trabalho, me ajudaram com o apoio e carinho de uma amizade verdadeira, em especial Juliana Zancul, Tatiana Nakanishi, Eduardo Yamada, Guilherme Rebello e Maíra Ledesma.

À esposa do professor Maurício, Maristela Roriz, por me receber sempre com tanta simpatia em sua casa, durante minhas reuniões frequentes com meu orientador.

Enfim, tenho imensa satisfação em agradecer à minha querida família, por todo o apoio e incentivo dedicado não só à minha formação profissional, mas também pessoal. Meu pai, Aloisio, minha mãe, Lourdiney, e minhas queridas irmãs, Aline e Larissa, vocês são todos exemplos para mim. Só consegui chegar até aqui pelo apoio e incentivo que recebo de vocês.

NEVES, Leticia de Oliveira. **Chaminé solar como elemento indutor de ventilação natural em edificações**. Tese (Doutorado), Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2012.

RESUMO

A ventilação natural é uma das estratégias mais importantes para o condicionamento térmico passivo de ambientes internos de edificações, podendo ocorrer por ação dos ventos, por efeito chaminé ou pela combinação de ambos. Em áreas urbanizadas, a velocidade do vento é sensivelmente reduzida pelos obstáculos locais, tornando o efeito chaminé uma alternativa de projeto mais viável, pois independe do vento. Esta pesquisa tem por objetivo investigar o potencial de chaminés solares para promover a ventilação natural em edificações de baixa altura, localizadas em climas típicos do território brasileiro. Desenvolveram-se estudos experimentais, através do monitoramento de uma célula de teste, exposta a condições climáticas reais, e de ensaios em túnel de vento, em modelos de escala reduzida. Desenvolveram-se previsões teóricas, através de um modelo matemático adaptado da literatura especializada e de simulações computacionais. Realizou-se um processo inicial de calibração desses modelos, utilizando como referência os resultados do monitoramento experimental. O processo baseou-se na análise comparativa de algumas variáveis selecionadas, considerando-se dados de temperatura superficial do vidro e da placa absorvedora, temperatura do ar e vazão volumétrica no interior do canal da chaminé. Os resultados indicaram que os modelos teóricos têm potencial de aplicação na avaliação do desempenho de chaminés solares, especialmente o modelo de simulação, em que foram observadas diferenças inferiores a 20% entre resultados medidos e calculados. Em vista disso, o modelo computacional foi selecionado para realização de uma análise dos efeitos da variação de diferentes parâmetros geométricos e construtivos do sistema, incluindo espessura do canal de ar, comprimento da chaminé, inclinação do coletor solar e tipo de vidro utilizado no coletor. Verificou-se a possibilidade do uso de um extensor vertical acoplado à chaminé, de modo a garantir uma diferença de altura constante entre as aberturas de entrada e saída do ar, independentemente da inclinação do coletor. Por fim, o desempenho do sistema foi analisado em função do efeito combinado das componentes térmica e eólica, para uma configuração específica de chaminé. Os resultados indicaram que as chaminés solares têm grande potencial de aplicação como estratégia de resfriamento passivo de edificações localizadas em regiões de baixa latitude. O sistema proposto com chaminé inclinada para máxima irradiância e uso de extensor apresentou um aumento significativo no fluxo de ar, para as cidades analisadas, com resultados desde 40% até acima de 100% superiores aos obtidos em uma chaminé solar inclinada para máximo fluxo de ar por diferença de pressão. Verificou-se que as perdas de carga da chaminé têm importância determinante no seu desempenho, pois afetam linearmente os resultados de fluxo de ar obtidos, sendo, portanto, fundamental a sua correta previsão. A ação dos ventos teve papel determinante no desempenho do sistema, mesmo a baixas velocidades. Se comparados casos sem vento e com vento a 1m/s, por exemplo, obtiveram-se diferenças de até 47% na vazão volumétrica da chaminé, para um estudo de caso analisado.

Palavras-chave: Ventilação natural; Efeito chaminé; Energia solar; Chaminé solar; Simulação computacional.

NEVES, Leticia de Oliveira. **Solar chimney for natural ventilation induction in buildings**. Thesis (Doctorate), School of Civil Engineering, Architecture and Urban Design, State University of Campinas, Campinas, SP, 2012.

ABSTRACT

Natural ventilation is one of the most important strategies for passive cooling of indoor environments. It can occur by wind forces, by stack effect or by a combination of both strategies. The second choice can be more effective in urban areas, where there are obstacles that block or reduce significantly the wind speed. This research has the aim to analyze the potential of solar chimneys to promote natural ventilation in low rise buildings, located at typical climates of Brazilian territory. Experimental studies were developed, by means of the construction and monitoring of a test cell, under real climatic conditions, and the development of wind tunnel tests, using small scale models. Theoretical predictions were developed using a mathematical model adapted from literature and computer simulation. A calibration procedure was carried out, based on results obtained through the experimental set up. The procedure consisted in a comparative analysis of chosen variables, considering data of glass and absorber surface temperatures, air temperature and volumetric flow rate inside the chimney channel. Results confirm the great potential of applicability of the theoretical models on the performance analysis of solar chimneys, specially the computer simulation, which presented differences lower than 20% between measured and calculated results. Therefore, the simulation model was chosen to perform an analysis of the effects caused by the variation in geometric and constructive parameters of a solar chimney, including air channel depth, chimney length, solar collector tilt and type of glass used on the solar collector. It was also analyzed the possibility of using a chimney extension, which would be responsible to maintain a constant height between inlet and outlet openings, independently from the absorber inclination. Ultimately, the system performance was analyzed considering the combined effect of thermal and wind forces, for a specific configuration of solar chimney. Results confirm the great potential of applicability of solar chimneys as a passive conditioning strategy for low latitude locations. The proposed system with optimum inclination angle for maximum solar irradiation added to a chimney extension presented a significant enhancement of airflow rates, for the studied cities, with results between 40% and more than 100% higher than the results obtained with a solar chimney with inclination angle for maximum airflow, considering the pressure gradient inside the channel. It has been verified that the pressure losses inside the chimney have great importance in its performance, since it affects linearly the airflow results, being essential the correct prediction of these losses. Wind forces have a strong influence on the system's performance, even at low velocities. By comparing situations with no wind and with a 1m/s wind velocity, for example, it were obtained differences of up to 47% in the solar chimney volumetric flow rate, for a case study.

Keywords: Natural ventilation; Stack effect; Solar energy; Solar chimney; Computer simulation.

SUMÁRIO

Agradecimentos.....	vii
Resumo.....	viii
Abstract.....	ix
Sumário.....	x
Glossário.....	xiii
Abreviações.....	xvi
1. Introdução.....	1
1.1 Objetivos.....	2
1.1.1 Objetivos específicos.....	2
1.2 Estrutura do trabalho.....	2
2. Ventilação natural em edificações: a chaminé solar.....	3
2.1 Ventilação natural por efeito chaminé.....	4
2.2 Uso da energia solar para induzir a ventilação: a chaminé solar.....	6
2.3 Potencialidades de uso no território brasileiro.....	8
2.4 Funcionamento de uma chaminé solar.....	9
2.4.1 Fluxos de calor na chaminé.....	10
2.5 Pesquisas desenvolvidas sobre chaminés solares.....	11
3. Procedimento experimental: célula de teste.....	15
3.1 Monitoramentos experimentais: revisão bibliográfica.....	15
3.1.1 Configuração geométrica.....	16
3.1.2 Características construtivas e materiais.....	18
3.2 Ensaio em célula de teste experimental: materiais e métodos.....	19
3.2.1 Monitoramento e tratamento de dados.....	21
3.3 Resultados obtidos no monitoramento.....	23
3.3.1 Comparação com resultados experimentais de outra pesquisa.....	26
3.3.2 Interferência do vento no desempenho da chaminé solar.....	29
4. Procedimento experimental: túnel de vento.....	33
4.1 Ensaio em túnel de vento: revisão bibliográfica.....	33
4.1.1 Coeficientes de perda de carga e coeficientes de descarga.....	33

4.1.2	Coeficientes de pressão.....	36
4.2	Ensaio em túnel de vento: materiais e métodos.....	37
4.2.1	Construção de modelo físico simplificado da chaminé solar.....	38
4.2.2	Ensaio em túnel de vento para determinação de coeficientes de pressão.....	39
4.2.3	Ensaio em túnel de vento para determinação de coeficientes de perda de carga	42
4.3	Resultados obtidos nos ensaios em túnel de vento.....	46
4.3.1	Resultados de coeficientes de pressão.....	46
4.3.2	Resultados de coeficientes de perda de carga e coeficientes de descarga.....	47
5.	Calibração de modelos teóricos.....	55
5.1	Estudos teóricos sobre chaminés solares: revisão bibliográfica.....	55
5.1.1	Apresentação de um modelo teórico.....	56
5.1.2	Coeficientes de transferência de calor por convecção (hv e hp)	58
5.1.3	Coeficiente global de perda de calor do vidro para o ambiente externo (Ut)	62
5.1.4	Fluxo de calor no canal da chaminé (q")	65
5.2	Calibração de modelos teóricos: materiais e métodos.....	67
5.2.1	Processo de calibração do modelo matemático.....	69
5.2.2	Processo de calibração do modelo computacional.....	70
5.3	Resultados obtidos na calibração.....	72
5.3.1	Resultados da calibração do modelo matemático.....	72
5.3.2	Resultados da calibração do modelo computacional.....	75
5.4	Considerações finais.....	78
6.	Análise paramétrica da chaminé solar para climas típicos do território brasileiro.....	79
6.1	Análise de desempenho de uma chaminé solar: revisão bibliográfica.....	79
6.1.1	Configuração geométrica de uma chaminé solar.....	79
6.1.2	Propriedades físicas de materiais e superfícies.....	82
6.2	Análise paramétrica: materiais e métodos.....	83
6.2.1	Cálculo da inclinação da chaminé solar para máxima irradiância.....	84
6.2.2	Cálculo da inclinação da chaminé solar para máximo fluxo de ar.....	84
6.2.3	Parâmetros de projeto analisados.....	86
6.2.4	Cálculo da perda de carga da instalação.....	88
6.2.5	Comparação entre uma chaminé solar e uma chaminé convencional.....	90

6.3	Resultados obtidos na análise paramétrica.....	90
6.3.1	Resultados da variação na espessura do canal de ar.....	90
6.3.2	Resultados da variação na inclinação do coletor solar.....	94
6.3.3	Resultados da variação no comprimento da chaminé.....	98
6.3.4	Resultados da variação no tipo de vidro utilizado no coletor.....	101
6.3.5	Resultados da comparação entre uma chaminé solar e uma chaminé convencional.....	102
6.4	Considerações finais.....	104
7.	Interferência do vento no desempenho de uma chaminé solar.....	105
7.1	A chaminé solar e o vento: revisão bibliográfica.....	105
7.2	Análise da interferência do vento na chaminé solar: materiais e métodos.....	108
7.2.1	Análise quantitativa do fluxo de ar na chaminé solar.....	108
7.2.2	Análise qualitativa e quantitativa do fluxo de ar nas aberturas de saída do ar da chaminé solar.....	110
7.3	Resultados obtidos na análise de interferência do vento na chaminé solar.....	111
7.3.1	Resultados da análise quantitativa do fluxo de ar na chaminé solar.....	111
7.3.2	Resultados da análise qualitativa e quantitativa do fluxo de ar nas aberturas de saída do ar da chaminé solar.....	114
7.4	Considerações finais.....	119
8.	Conclusões.....	121
9.	Referências bibliográficas.....	125
Anexo I	Resultados obtidos no monitoramento da célula de teste.....	131

GLOSSÁRIO

A	Área de abertura da seção de entrada ou saída de ar no canal da chaminé	m ²
Ae	Área da seção de entrada do ar na chaminé	m ²
Ap	Área da placa absorvedora	m ²
Ar	Razão entre a área de saída e a área de entrada da chaminé	adimensional
As	Área da seção de saída do ar na chaminé	m ²
Av	Área do vidro	m ²
c	Calor específico do fluido	J/(kg.K)
C	Comprimento da chaminé	m
CanV	Canal entre vidro e placa absorvedora no coletor solar	m
CanA	Canal de aletas no coletor solar	m
Cd	Coefficiente de descarga	adimensional
Cp	Coefficiente de pressão	adimensional
e	Espessura do canal de ar (distância entre o vidro e a placa absorvedora)	m
DirV	Direção do vento a 10m de altura	°
D _H	Diâmetro hidráulico da chaminé	m
g	Aceleração da gravidade	m/s ²
Gr	Número de Grashof	adimensional
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção	W/(m ² .K)
H	Altura da chaminé	m
Hmet	Altura da estação meteorológica	m
hc	Coefficiente de transferência de calor por condução do vidro	W/(m ² .K)
hp	Coefficiente de transferência de calor por convecção entre o absorvedor e o ar no canal	W/(m ² .K)
hrceu	Coefficiente de transferência de calor por radiação de ondas longas entre o vidro e o céu	W/(m ² .K)
hrpv	Coefficiente de transferência de calor por radiação entre o vidro e o absorvedor	W/(m ² .K)
hv	Coefficiente de transferência de calor por convecção entre o vidro e o ar no canal	W/(m ² .K)
hvento	Coefficiente de transferência de calor por convecção devido ao vento sobre o vidro	W/(m ² .K)
I	Irradiância solar sobre o plano de vidro do coletor solar	W/m ²
Ihrz	Irradiância solar sobre o plano horizontal	W/m ²
Ivid	Irradiância solar sobre o plano de vidro do coletor solar	W/m ²
k	Condutividade térmica do fluido	W/(m.K)
kis	Condutividade térmica do isolante térmico	W/(m.K)
L	Largura do canal da chaminé	m
m	Vazão mássica	kg/s

N	Nebulosidade	adimensional
Nr	Número de renovações de ar por hora	renov/h
Nu	Número de Nusselt	adimensional
PO	Pressão estática de referência, do fluxo de ar não perturbado (ambiente)	Pa
P	Pressão	Pa
Pd	Pressão dinâmica	Pa
Pe	Pressão estática	Pa
Penv	Pressão em determinado ponto da envoltória	Pa
Pi	Média das pressões internas no ambiente	Pa
Pr	Número de Prandtl	adimensional
Ps	Média das pressões na saída da chaminé	Pa
Pt	Pressão total	Pa
Pluv	Pluviosidade	mm
q"	Fluxo de calor no canal da chaminé	(W)
Q	Vazão volumétrica	m ³ /s
Ra	Número de Rayleigh	adimensional
Re	Número de Reynolds	adimensional
t	Tempo solar	h
Ta	Temperatura média do ar	K/°C
Tamb	Temperatura média do ar no ambiente ventilado pela chaminé	K/°C
TBS	Temperatura de bulbo seco	°C
Tc	Temperatura média do ar no canal	K/°C
Tceu	Temperatura do céu	K
Te	Temperatura do ar externo	K
Ti	Temperatura média do ar no ambiente interno ventilado pela chaminé	K
Tm	Temperatura média	K
Torv	Temperatura de ponto de orvalho	K/°C
Tp	Temperatura superficial média da placa absorvedora	K/°C
Tsup	Temperatura superficial	K
Tv	Temperatura superficial média do vidro	K/°C
Ub	Coeficiente global de transferência de calor da placa absorvedora	W/(m ² .K)
UR	Umidade relativa do ar	%
Ut	Coeficiente global de perda de calor do vidro para o ambiente externo	W/(m ² .K)
V	Velocidade do ar/ vento	m/s
V _H	Velocidade do vento na altura desejada	m/s
Vmet	Velocidade do vento na estação meteorológica	m/s
VelV	Velocidade do vento a 10m de altura	m/s

z	Cota da abertura de entrada ou saída de ar	m
-----	--	---

Símbolos gregos:

α	Difusividade térmica	(m ² /s)
α_p	Absortância solar da placa absorvedora	adimensional
α_v	Absortância solar do vidro	adimensional
β	Coefficiente de expansão volumétrica	1/K
Δ_{is}	Espessura do isolamento térmico	m
Δh	Perda de carga	mca
ΔP^T	Gradiente de pressão térmica	Pa
ΔP_h	Perda de pressão	Pa
ΔT	Diferença de temperatura entre o ar no canal e o ar externo	°C
Δz	Distância vertical entre aberturas de entrada e saída do ar	m
Δz_{NPN}	Distância entre o ponto central da abertura de entrada do ar e o nível de pressão neutra	m
ϵ_{ceu}	Emissividade do céu	adimensional
ϵ_v	Emissividade da face externa do vidro	adimensional
f	Fator de fricção	adimensional
μ	Viscosidade dinâmica do ar	Pa.s
ρ	Densidade do ar	Kg/m ³
ρ_e	Densidade média do ar externo	Kg/m ³
ρ_i	Densidade média do ar no ambiente ventilado pela chaminé	Kg/m ³
ν	Viscosidade cinemática do ar	m ² /s
τ_v	Transmitância ótica do vidro (com incidência normal)	adimensional
θ	Inclinação do coletor (contada a partir da horizontal)	°
ζ	Coefficiente de perda de carga	adimensional
ζ_e	Coefficiente de perda de carga da entrada da chaminé	adimensional
ζ_s	Coefficiente de perda de carga da saída da chaminé	adimensional
δ	Espessura da camada limite atmosférica	m
σ	Constante de Steffan-Boltzmann	W/(m ² .K ⁴)
γ	Constante de ponderação da temperatura média do ar no canal	adimensional

ABREVIações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
AFN	AirflowNetwork
BES	Building Energy Simulation
CFD	Computacional Fluid Dynamics (Dinâmica de Fluidos Computacional)
EPW	EnergyPlus Weather Data File
INMet	Instituto Nacional de Meteorologia
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
TARP	Thermal Analysis Research Program
TBS	Temperatura de bulbo seco
TRY	Test Reference Year
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
ZB	Zona Bioclimática

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico e as alterações nos padrões de consumo mundiais vêm refletindo em um acelerado crescimento do consumo de energia. No Brasil, o consumo de eletricidade tem crescido 4,6% ao ano desde 1970 – duplicando a cada 15 anos (Figura 1.1). O setor das edificações destaca-se pela elevada participação neste consumo. No ano de 2010, as edificações residenciais, comerciais e públicas foram responsáveis pelo consumo de 46,9% da energia elétrica produzida no país (Figura 1.2).

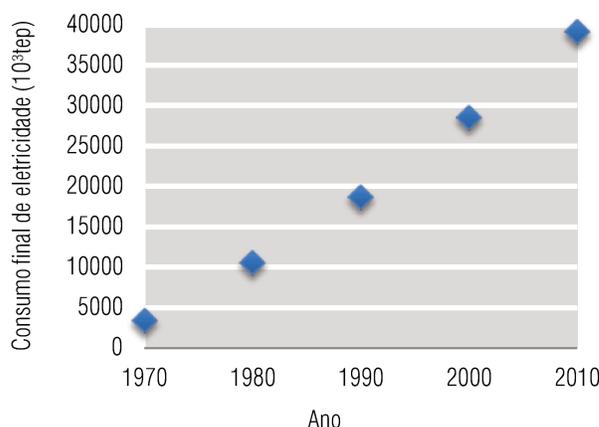


Figura 1.1: Consumo de eletricidade total no Brasil (10³tep) (Adaptado de BRASIL, 2011)

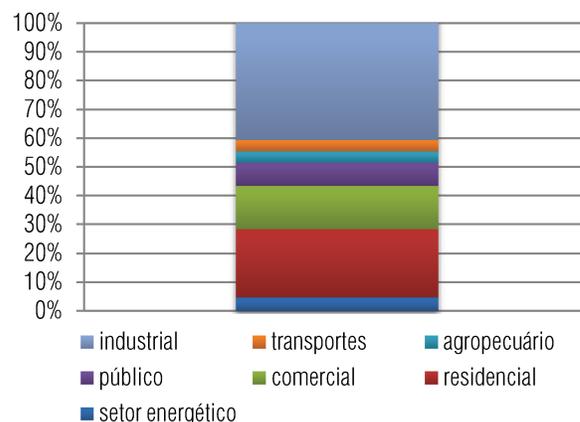


Figura 1.2: Consumo de eletricidade por setor (%) (Adaptado de BRASIL, 2011)

Contribuição significativa neste dispêndio se dá pelo uso de equipamentos para obtenção de conforto térmico, conforme afirma o Programa Procel Edifica¹, ao ressaltar que os sistemas artificiais, como iluminação, climatização e aquecimento de água, são grandes responsáveis pela parcela de consumo de energia em edificações. Achão (2003) declara que variam de 720 a 2880 as horas de uso médias, por ano, de equipamentos de ar condicionado e ventiladores em residências brasileiras.

Tais dados enfatizam a relevância da pesquisa e implementação de soluções projetuais visando conforto térmico com maior eficiência energética. Torna-se importante, neste contexto, a procura por soluções passivas para climatização de edificações, em substituição aos sistemas mecânicos. Dentre as técnicas de condicionamento térmico passivo, a ventilação natural pode ser apontada como de importância fundamental para climas característicos de grande parte do território brasileiro. A estratégia consiste na troca de ar interno por ar externo e deve ser utilizada nos horários em que as temperaturas internas ultrapassam as externas, o que pode ocorrer em decorrência de fontes internas de calor e do aquecimento da envoltória por absorção da radiação solar. Nessas situações, a ventilação natural pode contribuir para o resfriamento do ambiente interno, substituindo o ar aquecido interno pelo ar mais fresco externo.

Esta pesquisa contribui no aprofundamento da investigação de estratégias de ventilação natural em edificações. Possui como tema central a análise do potencial de uso de uma configuração particular de chaminé, denominada chaminé solar, para promover a ventilação natural em edificações de baixa altura,

¹ <http://www.procelinfo.com.br>

localizadas em climas típicos do território brasileiro. No levantamento bibliográfico empreendido, a grande maioria das publicações encontradas sobre o assunto refere-se a países do hemisfério Norte, o que evidencia a demanda por estudos para o território brasileiro.

1.1 Objetivos

O principal objetivo desta pesquisa é avaliar o potencial de chaminés solares para promover a ventilação natural em edificações de baixa altura, localizadas em climas característicos do território brasileiro.

1.1.1 Objetivos específicos

- Avaliar o desempenho de um modelo experimental de chaminé solar, exposto a condições climáticas reais.
- Aferir um modelo matemático e um modelo de simulação computacional de chaminé solar, com base nos resultados experimentais, a fim de calibrar um modelo que se aproxime da situação real.
- Identificar parâmetros geométricos e construtivos que influam no desempenho da chaminé solar e selecionar configurações que apresentem melhor desempenho em vazão.
- Elaborar modelos de simples aplicação para os climas característicos do território brasileiro, focando na otimização do desempenho em ventilação natural (fluxo de ar máximo).
- Analisar a interferência do vento sobre o desempenho de uma chaminé solar, bem como propor estratégias para fazer melhor uso do sistema nesta situação.

1.2 Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado em sete capítulos principais incluindo esta introdução – sendo cada capítulo representante de uma etapa da pesquisa, contendo revisão bibliográfica, materiais e métodos e resultados. O segundo capítulo é dedicado a uma revisão bibliográfica inicial, com conceitos gerais, para introdução do tema. O terceiro capítulo apresenta a primeira fase da etapa experimental, que inclui a construção e o monitoramento de uma célula de teste e uma análise dos resultados obtidos. O quarto capítulo apresenta a segunda fase da etapa experimental, que consiste na realização de ensaios em túnel de vento, com base em um modelo em escala reduzida, com geometria semelhante à célula de teste. O quinto capítulo apresenta modelos teóricos para predição do desempenho de chaminés solares, sua calibração com base em dados experimentais e a seleção de um modelo para aplicação nas etapas seguintes. O sexto capítulo contém uma análise dos principais parâmetros geométricos e construtivos que influem no desempenho de uma chaminé solar e uma investigação dos efeitos causados pela variação desses parâmetros. Esta análise paramétrica foi realizada com base em dados climáticos de cidades representativas do zoneamento bioclimático brasileiro. O sétimo capítulo apresenta uma análise da interferência do vento sobre o desempenho de uma chaminé solar e uma investigação dos efeitos conjugados da ventilação por ação dos ventos e por efeito chaminé em uma chaminé solar. Para finalizar, o oitavo capítulo apresenta as conclusões, destacando os resultados obtidos pela pesquisa e o potencial de uso de chaminés solares como estratégia de resfriamento passivo de edificações no Brasil.

2. VENTILAÇÃO NATURAL EM EDIFICAÇÕES: A CHAMINÉ SOLAR

A ventilação natural é uma estratégia importante para o resfriamento passivo de ambientes internos de edificações, auxiliando na obtenção de um ambiente saudável e confortável aos ocupantes, sem gastos energéticos. A estratégia consiste na troca de ar interno por ar externo, podendo ocorrer através da ação direta dos ventos, do efeito chaminé ou pela combinação de ambos. Suas principais funções são: renovação do ar (ventilação higiênica), resfriamento do edifício por convecção e resfriamento da pele humana por convecção e evapotranspiração (ventilação de conforto).

Nas edificações, as temperaturas internas frequentemente ultrapassam as externas, em decorrência das fontes internas de calor e do aquecimento da envoltória por absorção da radiação solar. Nessas situações, a ventilação natural pode contribuir para o resfriamento do ambiente interno, substituindo o ar aquecido interno pelo ar mais fresco externo. O aumento da velocidade do ar na altura da zona ocupada pode também elevar as perdas de calor da pele, por convecção e por evaporação, provocando uma redução na sensação de calor. Deste modo, o vento pode reduzir o desconforto ocasionado por temperaturas e umidades mais elevadas.

Tabela 2.1: Velocidades do vento em espaços interiores e seu efeito sobre os usuários (adaptado de EVANS, 1957 apud FREIXANET e VIQUEIRA, 2004)

Velocidade (m/s)	Efeito mecânico	Efeito sobre o usuário	Efeito de resfriamento (°C)
0,1	Mínimo em ambiente doméstico.	Pode-se sentir sufocação.	0,0
0,25	A fumaça do cigarro indica o movimento.	Há movimento imperceptível exceto a baixas temperaturas de ar.	0,7
0,5	Movimento da chama de uma vela.	Sensação de frescor a temperaturas confortáveis, porém incomoda a baixas temperaturas.	1,2
1,0	Os papéis soltos podem se mover, o que equivale à velocidade no caminhar.	Agradável geralmente quando o clima é confortável ou quente, porém causa sensação de movimento constante. É o nível máximo aceitável de conforto noturno.	2,2
1,5	Muito rápido para trabalho de escritório, os papéis voam.	Incômodo a temperaturas confortáveis. Limite máximo de conforto para atividades internas.	3,3
2,0	Equivale à velocidade no caminhar rápido.	Aceitável só em condições muito quente e úmidas, quando nenhum outro alívio ambiental está disponível.	4,2

Givoni (1994) estabelece um intervalo de velocidade do ar entre 0,1 e 2,0m/s, incidente na altura da zona ocupada, considerado adequado para conforto térmico em ambientes internos. Nesse intervalo de velocidade, Freixanet e Viqueira (2004) apresentam detalhes sobre os efeitos do vento sobre os usuários de um determinado espaço e a sensação de resfriamento provocada (Tabela 2.1).

A ventilação por ação direta dos ventos, ou ventilação cruzada, ocorre em função das diferenças de pressão entre as aberturas de entrada e saída do ar. Os ventos variam constantemente em direção e velocidade, sendo

praticamente impossível prever, com níveis razoáveis de precisão, os seus efeitos sobre a ventilação de ambiente internos. Em áreas urbanizadas, a velocidade e a intensidade de turbulência dos ventos são sensivelmente reduzidas pelos obstáculos locais. A elevada densidade da massa edificada torna-se um obstáculo à circulação dos ventos, sendo a velocidade do vento menor dentro da camada limite urbana do que na área rural, a uma mesma altura (Figura 2.1).

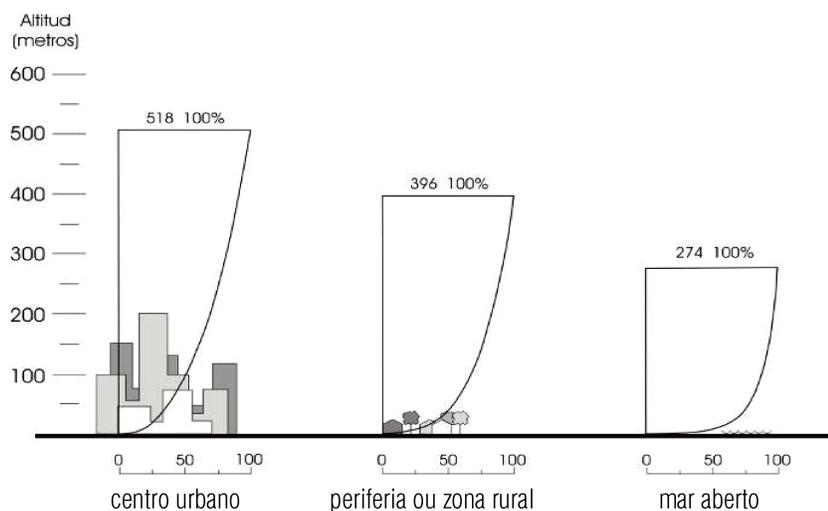


Figura 2.1: Perfis de velocidade do vento em distintos tipos de terreno (FREIXANET e VIQUEIRA, 2004)

Allard, Ghiaus e Mansouri (2003) afirmam que a redução na velocidade dos ventos, a mudança nos padrões do fluxo de ar e a estratificação térmica em *canyons* urbanos ocasionam uma redução de até 90% no potencial de uso da ventilação natural, ao comparar-se um edifício de projeto convencional implantado em meio urbano com o mesmo projeto implantado em um sítio sem obstruções. Nessas situações, o efeito chaminé torna-se uma alternativa de projeto mais viável, pois independe dos ventos.

2.1 Ventilação natural por efeito chaminé

O movimento de ar por impulsão térmica, ou efeito chaminé, é ocasionado por gradientes verticais nas densidades e pressões do ar, advindos da diferença de temperatura. Admitindo-se um ambiente com temperatura interna superior à externa e uma única abertura, as pressões interna e externa serão iguais apenas no nível da abertura, variando com a altura (Figura 2.2). Se houver outra abertura na parte superior, haverá subpressão na parte inferior e sobrepressão na parte superior (Figura 2.3). Nessas condições, o ar penetrará no ambiente pela abertura mais baixa e será eliminado pela abertura mais alta, estabelecendo um fluxo ascendente de ar.

A passagem da região de subpressão para sobrepressão é denominada nível de pressão neutra (NPN), e é definida como a altura onde não existe diferença de pressão entre os ambientes interno e externo. Sua localização é determinada pela distribuição das aberturas na envoltória (FEUSTEL e SHERMAN, 1989). Para aberturas iguais de entrada e saída do ar, situa-se no ponto central entre as aberturas; em outros casos, depende da distribuição de pressões.

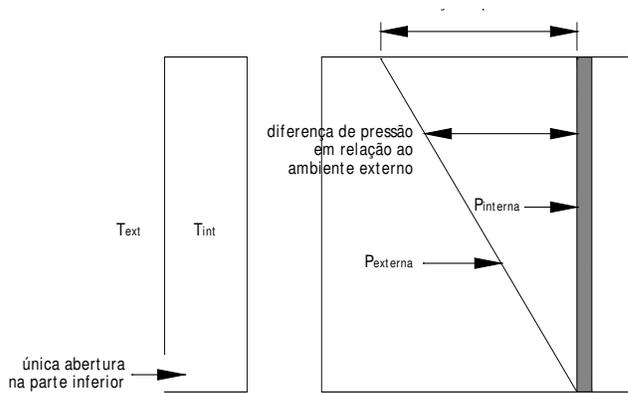


Figura 2.2: Diferença de pressão entre ambiente interno e externo, com uma única abertura inferior ($T_{int} > T_{ext}$)

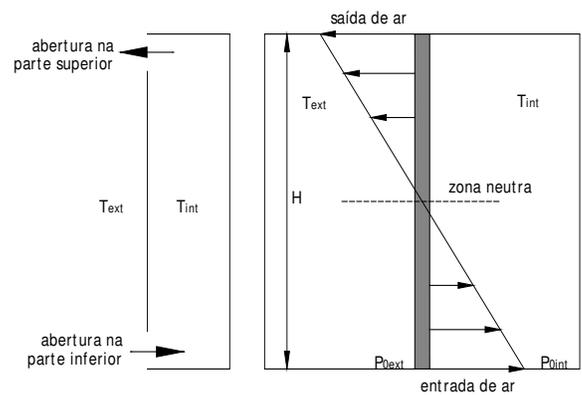


Figura 2.3: Movimento de ar ascendente através de aberturas dispostas a diferentes alturas em um ambiente ($T_{int} > T_{ext}$)

A ASHRAE (2005) apresenta uma equação para determinação da vazão de ar provocada pelo efeito chaminé, aplicável quando a temperatura do ambiente interno foi superior à temperatura externa (Equação 2.1). Pela equação, pode-se observar que a intensidade da ventilação obtida por efeito chaminé depende das relações entre diversos fatores, incluindo a diferença de temperatura entre os ambientes interno e externo, a diferença de altura entre as aberturas de entrada e saída do ar e a área efetiva de abertura para ventilação.

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta z_{NPN} \cdot (T_i - T_e) / T_i} \quad \text{Eq. 2.1}$$

Sendo:

Q	Vazão volumétrica (m^3/s)
C_d	Coefficiente de descarga do conjunto de aberturas (adimensional)
A	Área efetiva da abertura de entrada ou de saída do ar, consideradas iguais (m^2)
g	Aceleração da gravidade ($9,807m/s^2$)
Δz_{NPN}	Distância entre o ponto central da abertura de entrada do ar e o nível de pressão neutra (m)
T_i	Temperatura do ar interno (K)
T_e	Temperatura do ar externo (K)

A equação apresenta uma constante denominada coeficiente de descarga, que representa as resistências por ação do atrito e da turbulência que ocorrem em um escoamento de fluido real, isto é, de viscosidade não nula. Essas resistências fazem com que parte da energia do escoamento seja convertida em calor, ocasionando uma redução na velocidade do fluido. Seu valor depende da geometria das aberturas e do canal de passagem do ar e do regime do escoamento, se laminar ou turbulento. Estudos demonstram que é de extrema relevância adotar um valor apropriado a cada situação, o que contraria a prática corrente de assumir um valor próximo de 0,6, independentemente do detalhamento das aberturas (MARQUES DA SILVA, 2003).

A ventilação por efeito chaminé é prejudicada quando há pouca diferença de altura entre as aberturas de entrada e saída do ar e quando as temperaturas interna e externa são próximas, situação frequente em edificações de baixa altura. Nesses casos, uma forma de favorecer o movimento do ar por impulsão térmica é através do uso da energia solar para incrementar o diferencial de temperatura, visando intensificar o processo de exaustão do ar aquecido. Isso pode ser obtido através do uso de uma configuração particular de chaminé,

denominada chaminé solar.

2.2 Uso da energia solar para induzir a ventilação: a chaminé solar

A chaminé solar utiliza a energia proveniente da radiação solar para aquecer o ar e induzir o efeito chaminé, por meio do incremento das diferenças de pressão e temperatura entre a entrada e a saída do ar. É uma estratégia adequada para sítios sem vento ou com ventos em velocidades baixas, onde o uso do efeito chaminé pode gerar melhores resultados do que o uso da ventilação por ação direta dos ventos (BANSAL, MATHUR, BHANDARI, 1994).

Qualquer chaminé externa é, em teoria, uma chaminé solar, pois a radiação solar absorvida por sua superfície influencia no fluxo ascendente de ar. No entanto, a sofisticação do sistema depende da incorporação de alguns conceitos físicos importantes. Em vista disso, o desempenho de uma chaminé solar se fundamenta nos seguintes fenômenos:

- Efeito estufa: as superfícies envidraçadas caracterizam-se pela transparência à radiação de ondas curtas (radiação solar) e opacidade à radiação de ondas longas (radiação emitida por superfícies à temperatura ambiente, típicas em um ambiente construído). Devido a este efeito, a radiação solar transmitida através dos vidros fica retida nos ambientes internos, causando uma elevação na temperatura do ar. Este fenômeno, conhecido como efeito estufa, é o princípio no qual se baseia a montagem de coletores solares (Figura 2.4). No caso da chaminé solar, os coletores são compostos, basicamente, por uma cobertura de vidro na face externa, um canal para circulação do ar e uma placa negra absorvedora na parte interna.

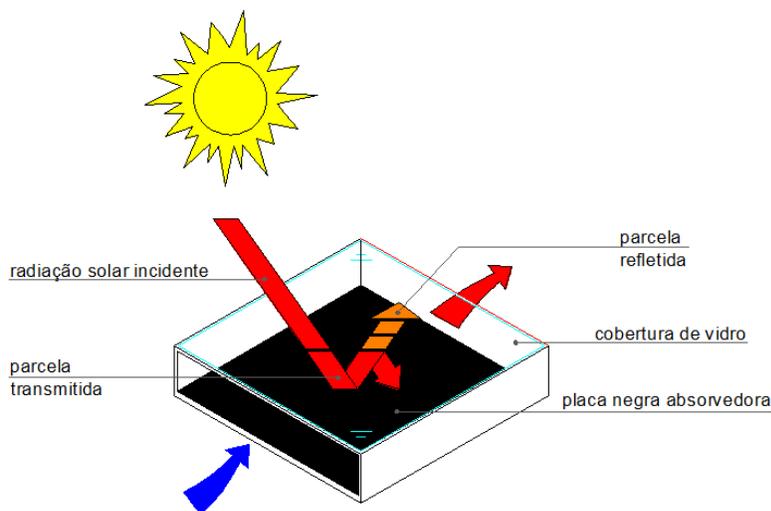


Figura 2.4: Coletor de uma chaminé solar - absorção, reflexão e transmissão solar

- Efeito chaminé: trata-se da ventilação natural ocasionada pelo movimento ascendente do ar. Em coletores solares, o aquecimento do ar dentro do canal provoca um aumento na diferença de temperatura entre as aberturas de entrada e saída do ar, induzindo o movimento ascendente de ar e, conseqüentemente, provocando a sucção do ar do ambiente interno.

- Absortância solar: em superfícies opacas, a radiação total incidente divide-se em uma parcela absorvida e outra refletida. A parcela absorvida é determinada pela absortância solar da superfície. A absortância é definida como a razão entre a taxa de radiação solar absorvida por uma superfície e a taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície (ABNT, 2005). Seu valor depende da absortividade do material que compõe a camada superficial exposta à radiação e de outras características da superfície, como a rugosidade e a ondulação (DORNELLES, 2008).

A absortância geralmente é associada às cores das superfícies, pois superfícies mais escuras correspondem, na maioria das vezes, a absortâncias mais elevadas. Como a placa absorvedora da chaminé deve garantir elevada absorção da radiação solar incidente, visando incrementar o efeito chaminé, recomenda-se sua pintura na cor preta. O uso de superfícies rugosas também contribui no aumento da energia total absorvida, pois parcela da energia refletida pode incidir sobre outros pontos da superfície, resultando em nova absorção (RORIZ, DORNELLES, RORIZ, 2007).

- Emissividade: define-se como a razão entre a taxa de radiação emitida por uma superfície e a taxa de radiação emitida por um corpo negro, à mesma temperatura (ABNT, 2005). Enquanto a elevada absortância solar resulta na obtenção de temperaturas mais altas da superfície absorvedora, a baixa emissividade pode contribuir para a redução na emissão de calor, auxiliando na manutenção do aquecimento da superfície. Há pesquisas que buscam aliar alta absortância e baixa emissividade, mas ainda não há um produto disponível no mercado que apresente tais características. A emissividade da superfície de vidro também influencia no desempenho das chaminés solares. Alguns vidros especiais possuem películas de baixa emissividade, que apresentam maior resistência térmica do que o vidro comum e contribuem para a redução da perda de calor através do vidro.
- Isolamento térmico: para reduzir as perdas de calor por condução, faz-se necessária a aplicação de uma camada de isolante térmico no conjunto, especialmente nas laterais e base do coletor solar.
- Irradiância solar: a irradiância consiste na taxa de radiação incidente sobre um corpo, por unidade de área da superfície (ABNT, 2005). A eficiência das chaminés solares depende, dentre outros fatores, da intensidade da radiação solar incidente na superfície coletora. Como o ângulo de incidência da radiação solar varia em função da latitude do lugar e da época do ano, torna-se vantajoso alterar a inclinação da superfície absorvedora, conforme as necessidades específicas da localidade, de forma a aumentar a irradiância. Por consequência, as chaminés solares podem apresentar diferentes configurações geométricas, dependendo do local de implantação da edificação (Figuras 2.5 e 2.6).

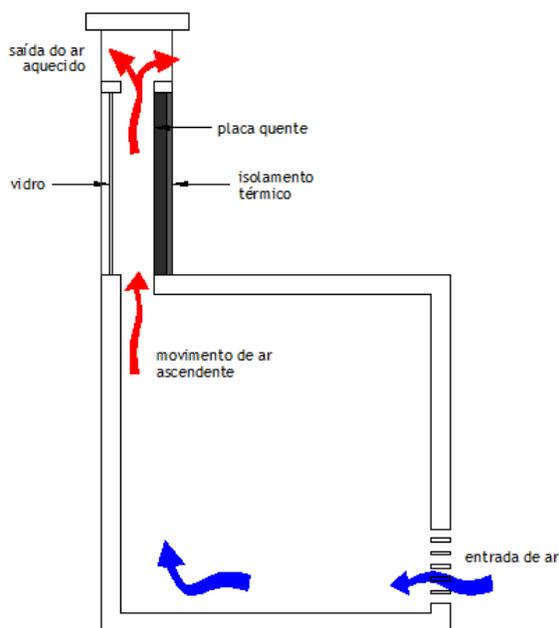


Figura 2.5: Corte esquemático de uma chaminé solar vertical

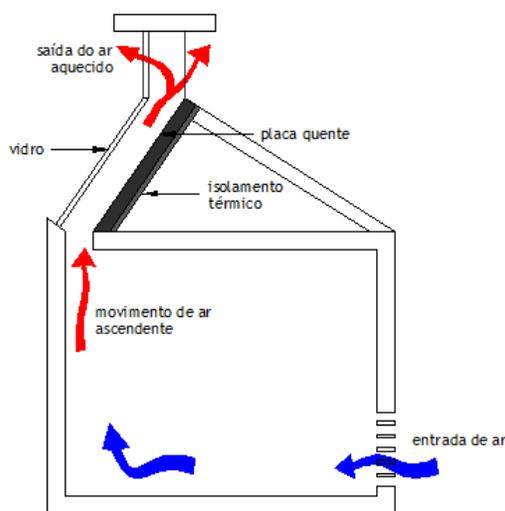


Figura 2.6: Corte esquemático de uma chaminé solar inclinada

2.3 Potencialidades de uso no território brasileiro

A energia vinda do Sol e interceptada pela Terra é de aproximadamente $1,8 \times 10^{11}$ MW, valor milhares de vezes maior do que a taxa de consumo atual de todas as fontes de energia comerciais no planeta (SINGH, 2006). No Brasil, país situado entre latitudes aproximadas de 4° N e 34° S, o uso da energia solar é viável em praticamente todo o território, devido à grande quantidade de radiação solar incidente e ao tempo de insolação (Tabela 2.2). A média diária de radiação solar fica em torno de 5000 a 5500 W/m² para a maior parte do país (Figura 2.7). Assim, em princípio, a energia solar poderia suprir, em uma base contínua, todas as necessidades humanas presentes e futuras, o que a torna uma fonte promissora de energia alternativa.

Tabela 2.2: Tempos de insolação e radiação solar incidente para diversas latitudes (FROTA, 2004)

Latitude	Datas	Tempo de insolação	Radiação solar incidente ao meio dia	Radiação solar incidente Totais diários
0°	21 jun	12 horas	1033 W/m ²	7251 W/m ²
	21 mar e 24 set	12 horas	1138 W/m ²	7962 W/m ²
	22 dez	12 horas	1033 W/m ²	7251 W/m ²
23,5° S	21 jun	10.5 horas	716 W/m ²	4408 W/m ²
	21 mar e 24 set	12 horas	1029 W/m ²	7977 W/m ²
	22 dez	13.5 horas	1138 W/m ²	8902 W/m ²
30° S	21 jun	10 horas	594 W/m ²	3376 W/m ²
	21 mar e 24 set	12 horas	964 W/m ²	6734 W/m ²
	22 dez	14 horas	1134 W/m ²	9004 W/m ²

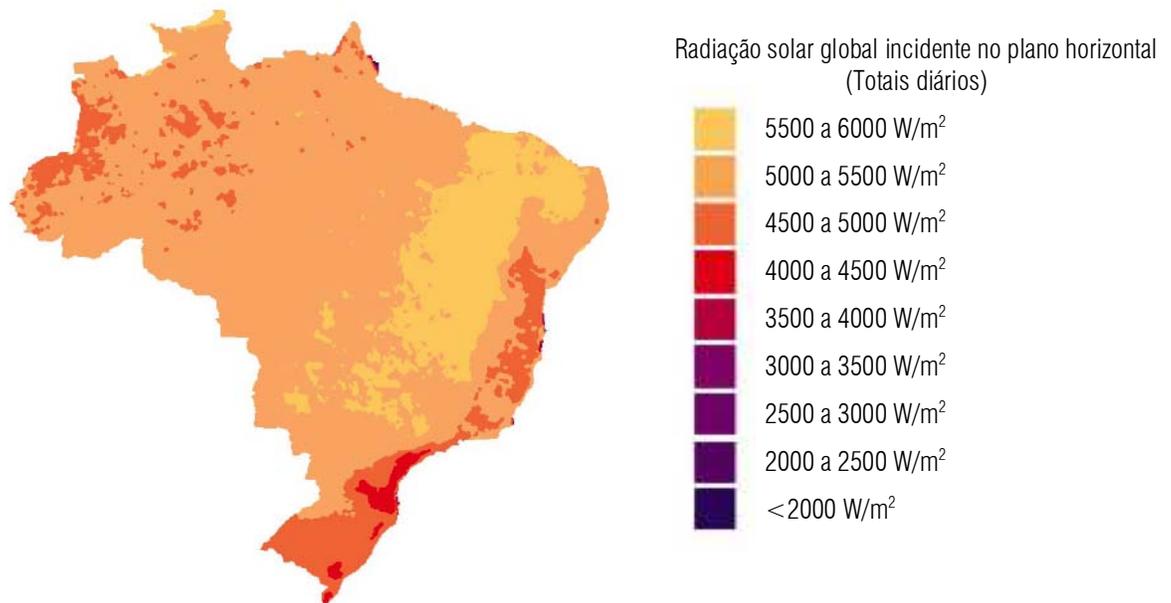


Figura 2.7: Totais diários de radiação solar global incidente no plano horizontal, no Brasil (MARTINS et al, 2005)

A grande disponibilidade de energia solar alia-se ao fato de grande parte do território brasileiro apresentar climas quentes, em que a ventilação é indicada como estratégia de climatização natural para obtenção de conforto em sete das oito zonas bioclimáticas, definidas pela ABNT (2005)¹. A ventilação natural permanente é indicada como principal estratégia de condicionamento térmico passivo para a zona bioclimática 8 (clima quente e úmido), que abrange 53,7% da área do território nacional (incluindo a região Norte e o litoral Nordeste), e para o verão nas zonas bioclimáticas 2, 3 e 5 (18,5% do território). Adicionalmente, a ventilação seletiva² é indicada para as zonas 4, 6 e 7 (27,2% do território).

A ventilação natural para obtenção de conforto térmico torna-se mais necessária nos períodos mais quentes do ano e nos horários mais quentes do dia, que são coincidentes com os momentos de maior irradiância solar. Tal fato potencializa a possibilidade de uso da chaminé solar como estratégia de resfriamento passivo de ambientes.

2.4 Funcionamento de uma chaminé solar

O bom funcionamento de uma chaminé solar depende de dois fatores principais: o acréscimo de temperatura em relação ao ambiente a ser ventilado e o conseqüente fluxo de ar no canal da chaminé. Para determinação dessas variáveis, faz-se importante analisar os fluxos de calor dentro da chaminé, que interferem diretamente na vazão e na temperatura. A partir daí, podem ser estabelecidos os parâmetros que mais contribuem no funcionamento do sistema e investigar meios para otimização de seu desempenho.

¹ A parte três da NBR 15220 (ABNT, 2005) propõe a divisão do território brasileiro em oito zonas bioclimáticas, relativamente homogêneas quanto ao clima.

² Em períodos quentes em que a temperatura interna seja superior à externa (ABNT, 2005).

2.4.1 Fluxos de calor na chaminé

O vidro é um material transparente à radiação de ondas curtas. Em vista disso, parte da radiação solar incidente na superfície de vidro da chaminé solar é transmitida diretamente ao ambiente interno, parte é refletida para o exterior e parte é absorvida pelo vidro. Como o vidro tem absorvidade baixa e é exposto às trocas de calor por convecção dos dois lados, sua temperatura superficial é consideravelmente baixa e próxima à do ar.

A placa absorvedora é aquecida por absorção da parcela de radiação solar transmitida pelo vidro. Parte deste calor pode perder-se por condução para o lado externo da placa, onde há isolamento térmico, cujo objetivo é minimizar ao máximo a perda de calor do sistema. A outra parte é cedida ao ar no canal, por convecção térmica, e ao vidro, por radiação infravermelha. A transferência de calor por convecção é a mais importante, pois impulsiona o funcionamento da chaminé solar.

O calor absorvido pelo vidro por radiação infravermelha é cedido ao ar no canal, por convecção, e de volta à placa absorvedora, por radiação. Parte deste calor também é cedido ao ambiente externo, por convecção e radiação, representando as perdas de calor do sistema através do vidro. O ar presente no canal da chaminé é aquecido pelo absorvedor e pelo vidro. Com o aquecimento, há um movimento de ar por ascensão, fenômeno denominado convecção natural (Figuras 2.8 e 2.9).

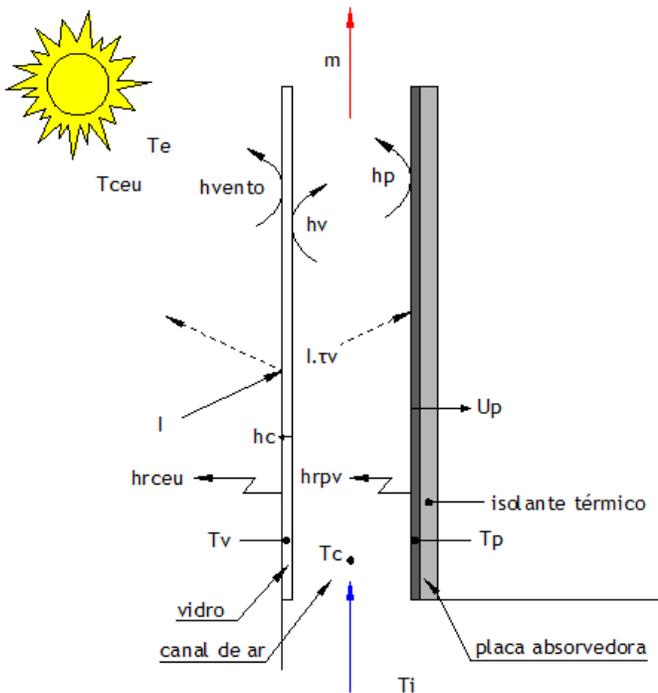


Figura 2.8: Fluxos de calor na chaminé solar

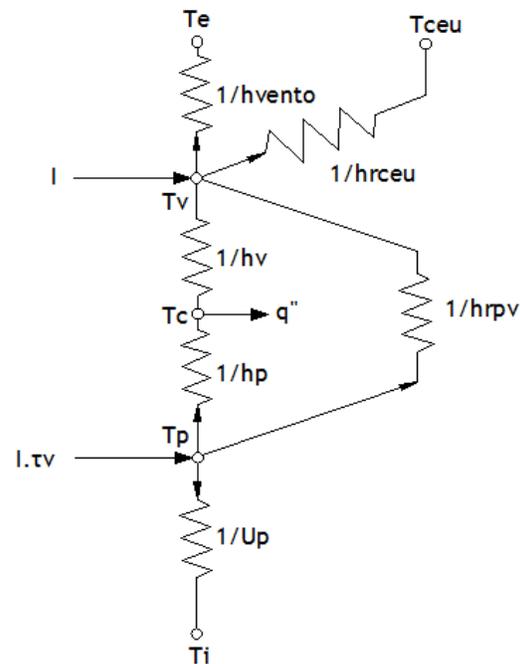


Figura 2.9: Analogia entre chaminé solar e esquema elétrico (adaptado de ONG e CHOW, 2003)

Sendo:

I	Irradiância solar no vidro
I.tv	Irradiância solar na placa absorvedora
Te	Temperatura do ar externo
Tceu	Temperatura do céu
Ti	Temperatura média do ar no ambiente ventilado pela chaminé
Tv	Temperatura média do vidro
Tc	Temperatura média do ar no canal
Tp	Temperatura média da placa absorvedora
m	Vazão mássica
q"	Fluxo de calor

Coefficientes de transferência de calor por convecção:

hv	Entre o vidro e o ar no canal
hp	Entre a placa absorvedora e o ar no canal
hvento	Entre o vidro e o ar externo

Coefficientes de transferência de calor por radiação (ondas longas):

hrpv	Entre o vidro e a placa absorvedora
hrceu	Entre o vidro e o céu

Coefficiente de transferência de calor por condução:

hc	Do vidro
----	----------

Coefficiente global de transferência de calor:

Ub	Da placa absorvedora
----	----------------------

2.5 Pesquisas desenvolvidas sobre chaminés solares

Inúmeras pesquisas já demonstraram a possibilidade de ventilar naturalmente edificações usando chaminés solares. No entanto, a grande maioria desses trabalhos refere-se a países do hemisfério Norte, o que evidencia a demanda por estudos para o território brasileiro. No Brasil, os trabalhos enfocam, principalmente, a secagem de madeira ou produtos agrícolas, como grãos e frutas (ALTEMANI, 1976; MARTINS et al, 2002; CORTEZ et al, 2003; BRASIL et al, 2004).

Frank (1981) é o primeiro registro brasileiro encontrado de estudo do uso de chaminés solares para ventilação natural de edificações. A autora avaliou matematicamente chaminés verticais de grande porte, visando atender à demanda de ventilação natural em ambientes industriais. Uma série de estudos mais recentes, realizados na Universidade Federal de Minas Gerais e na Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, trataram da viabilidade do uso de chaminés solares para secagem de produtos agrícolas (FERREIRA et al, 2008; MAIA et al, 2009a, MAIA et al, 2009b). As pesquisas foram desenvolvidas com base na construção de um protótipo vertical de 12,3m de altura e 1,0m de diâmetro. Mais recentemente, Cavalcanti (2010) apresentou uma dissertação de mestrado sobre o tema, referente ao trabalho desenvolvido em conjunto com esta pesquisa.

Internacionalmente, houve uma produção significativa de trabalhos sobre chaminés solares desde a década de 1990. Os métodos de pesquisa incluem estudos teóricos e monitoramentos experimentais, sendo estes

últimos dominantes na literatura existente. Ambos têm por objetivo identificar o potencial de vazão dos sistemas propostos, tendo em consideração condições ambientais específicas, que incluem a intensidade da radiação solar incidente, o vento e a temperatura do ar externo.

Os estudos teóricos compreendem o desenvolvimento e a aplicação de modelos matemáticos para predição do desempenho de chaminés solares. Tais estudos também podem ser realizados por meio de simulações computacionais de ventilação natural, através de programas específicos que possuam seus próprios modelos de cálculo. Os monitoramentos experimentais incluem ensaios em células de teste, expostas a condições climáticas reais ou em câmaras climatizadas, e ensaios em túnel de vento, através de modelos em escala reduzida.

A Tabela 2.3 resume algumas das principais pesquisas sobre chaminés solares realizadas nos últimos anos, incluindo dados geográficos, a configuração geométrica do sistema e a metodologia adotada na pesquisa. A Tabela 2.4 apresenta uma seleção dos melhores resultados das configurações estudadas em cada caso, em termos de desempenho em ventilação. Pelas tabelas, pode-se notar também que as pesquisas publicadas apresentam lacunas importantes na divulgação de informações.

Tabela 2.3: Dados de pesquisas desenvolvidas sobre chaminés solares

Pesquisa	Clima		Configuração geométrica						Metodologia				
	Autor, data	Latitude (°)	Localidade	Ambiente (m) (comp. x larg. x alt.)	Seção transversal da chaminé (m)	Comprimento chaminé (m)	Isolamento térmico (m)	Inclinação com a horizontal	Inércia térmica para ventilação noturna	Coefficiente de descarga (Cd)	Estudo experimental	Chaminé de referência	Modelo matemático
Adam, Yamanaka e Kotani, 2002	Aquecimento elétrico		não tem	1 x 0,1 1 x 0,2 1 x 0,3	2	sim (não consta valor)	variável		0,8	x		x	
Afonso e Oliveira, 2000	41°08'N	Porto, Portugal	4 x 3 x 3	1 x 0,2	2	0 a 0,05	vertical	x		x	x	x	
Bansal, Mathur e Bhandari, 1993	26°53' N	Jaipur, Índia	4 x 4 x 4	1,5 x 0,15	1,5	sim (não consta valor)	variável		0,5 a 0,8			x	
Bansal et al, 2005	26°53' N	Jaipur, Índia	1 x 1 x 1	1 x 0,13	0,765	0,05	vertical		0,57	x		x	
Bassiouny e Korah (2009)	28°24'N	Minia, Egito	3 x 1 x 3	1 x 0,35	1		variável		0,57			x	
Bassiouny e Koura, 2008	28°24'N	Minia, Egito	1 x 1 x 1	1 x 0,1 1 x 0,2 1 x 0,3	1		vertical		0,57			x	
Chen et al, 2003	Aquecimento elétrico		7 x 5 x 3,9	0,62 x 0,2	1,5	0,1	variável			x		x	
Harris e Helwig, 2007	52°N	Edimburgo, Escócia		1 x 0,25	3	sim (não consta valor)	variável						Phoenics
Hirunlabh et al, 1999	13°45' N	Bangkok, Tailândia	3,45 x 3,35 x 2,68	1 x 0,145	2	0,029	vertical			x		x	
Khedari et al, 2000	13°45' N	Bangkok, Tailândia	3,45 x 3,35 x 2,68	1 x 0,14	1,5		25°			x			
Mathur, Anupma e Mathur, 2008	26°53' N	Jaipur, Índia	3 x 3 x 3	1 x 0,35	1	0,05	vertical 45°			x			
Mathur, Mathur e Anupma, 2006	26°53' N	Jaipur, Índia	1 x 1 x 1	1 x 0,35	1	0,05	variável		0,57	x		x	
Ong e Chow, 2003	3°05' N	Petaling Jaya, Malásia	1,02 x 0,48 x 2	0,45 x 0,3	1,875	0,05	vertical		0,57	x		x	
Sakonidou et al, 2008	41°07'N	Serres, Grécia		0,74 x 0,11	4	0,05	variável		0,57	x		x	Fluent

Tabela 2.4: Resultados de pesquisas desenvolvidas sobre chaminés solares

Pesquisa	Desempenho (melhores resultados obtidos)									
	Ângulo de inclinação (°)	Seção transversal da chaminé	Radiação solar incidente (W/m ²)	Temperatura do ar interno (°C)	Temperatura do ar externo (°C)	Vazão volumétrica (m ³ /h)	Vazão mássica (kg/h)	Velocidade do ar (m/s)	Taxa de renovação no ambiente (n° de renovações/h)	Temperatura da placa absorvedora (°C)
Adam, Yamanaka e Kotani, 2002	45°	1 x 0,3	500			273,6		0,25		
Afonso e Oliveira, 2000	90°	1 x 0,2	761	20,6	13	381,6	432	0,53	10,6	
Bansal, Mathur e Bhandari, 1993	30°	1,5 x 0,15	200 1000		36	140,4 331,2		0,17 0,41	2,2 5,2	
Bansal et al, 2005	90°	1 x 0,13	750			111,6		0,24		
Bassiouny e Korah (2009)	45°	1 x 0,35	750				237,6			86,9
Bassiouny e Koura, 2008	90°	1 x 0,1 1 x 0,2 1 x 0,3	700			82,8 194,4 302,4		0,23 0,27 0,28	3,5 5,1 6,0	75
Chen et al, 2003	45°	0,62 x 0,2	600			180		0,4	1,3	
Harris e Helwig, 2007	67,5°	1 x 0,25		32		396				
Hirunlabh et al, 1999	90°	1 x 0,145	385		32		54			75
Khedari et al, 2000	25°	1 x 0,14	500	39	34	90		0,18	2,9	
Mathur, Anupma e Mathur, 2008	90° 45°	1 x 0,35	949,5				262,8 273,6			
Mathur, Mathur e Anupma, 2006	45°	1 x 0,35	750	40		277,2		0,22		
Ong e Chow, 2003	90°	0,45 x 0,3	650			190,8		0,39		
Sakonidou et al, 2008	60°	0,74 x 0,11	831,6		28,9			0,68		86

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL: CÉLULA DE TESTE

3.1 Monitoramentos experimentais: revisão bibliográfica

Dentre as publicações existentes sobre o uso de chaminés solares para ventilação natural de edificações, há uma significativa contribuição de pesquisas desenvolvidas com base em investigações experimentais. Os monitoramentos experimentais incluem ensaios em células de teste, expostas a condições climáticas reais ou controladas, através de modelos em tamanho real ou em escala reduzida. Nesses ensaios, o aquecimento do coletor solar da chaminé pode ser realizado pela incidência direta de radiação solar ou por sistema elétrico de aquecimento.

Afonso e Oliveira (2000) avaliaram o comportamento térmico de uma chaminé solar vertical, através da construção de uma célula de teste na cidade de Porto, Portugal (latitude de 41°08' Norte), sob condições climáticas reais. O protótipo possuía duas chaminés com 2m de altura e seção interna de 0,2m x 1m, sendo uma chaminé solar e uma chaminé convencional, utilizada como referência. A parede absorvedora da chaminé solar foi feita de alvenaria, com isolamento térmico nas faces externas (Figura 3.1)

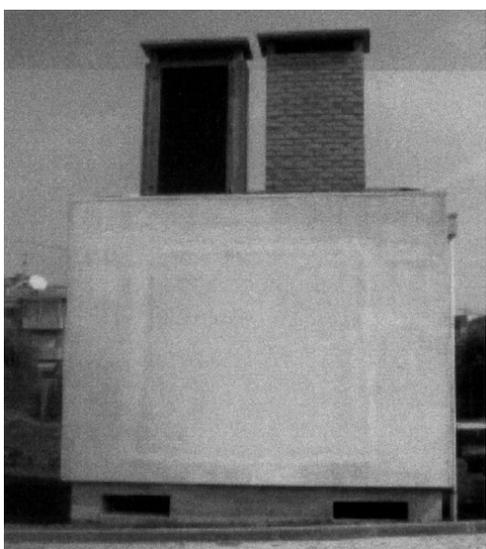


Figura 3.1: Células de teste de Afonso e Oliveira (2000)

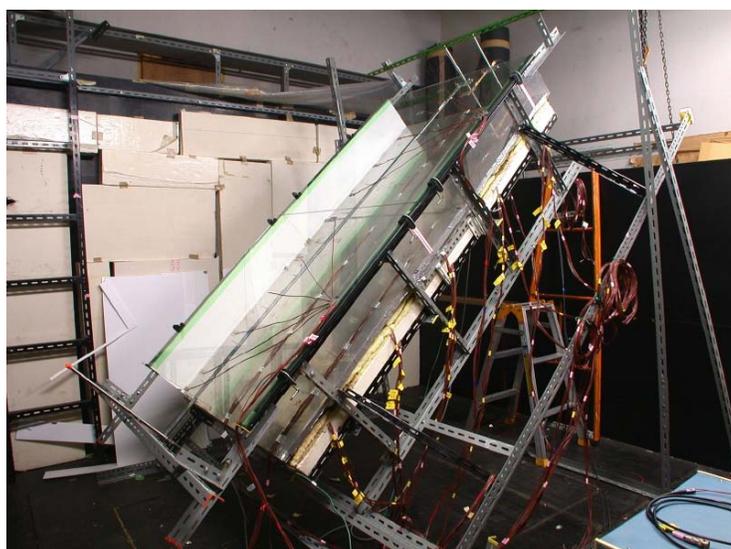


Figura 3.2: Aparato experimental de Adam (2003)

As chaminés foram instrumentadas com anemômetros, termopares e fluxímetros. Uma torre meteorológica foi utilizada para medir a temperatura do ar externo, a direção e a velocidade do vento. Dois piranômetros foram usados, um para medir a radiação solar global horizontal e outro para medir a radiação solar vertical, na fachada Sul do protótipo. A leitura dos sensores foi realizada em intervalos de 1min, exceto os sensores de radiação, que foram lidos em intervalos de 5s. Para monitoramento do fluxo de ar, uma técnica de marcação a gás à emissão constante foi utilizada.

Adam (2003) analisou o desempenho de uma chaminé solar através de um aparato experimental flexível, construído dentro de uma câmara climatizada (Figura 3.2). O fluxo de calor sobre a placa absorvedora foi

proporcionado por painéis aquecidos eletricamente, podendo variar entre 100, 300 e 500W/m². A chaminé possuía 2m de comprimento, 1m de largura e espessura variável, entre 0,1, 0,2 e 0,3m. A inclinação da chaminé podia variar entre 30 e 90°, em intervalos de 15°. O monitoramento foi realizado em um ambiente fechado com pé direito elevado, com temperatura do ar mantida entre 13 e 16°C.

As medições foram realizadas quando o aparato atingia estabilidade térmica com o ambiente. Termopares foram utilizados para medir a perda de calor por trás do coletor, a temperatura superficial da placa absorvedora, do ar no canal e do ar ambiente. Um anemômetro de fio quente foi utilizado para medir a velocidade do ar na saída da chaminé.

Parâmetros construtivos e geométricos são frequentemente abordados em detalhes nos estudos experimentais. De fato, o desempenho de uma chaminé solar depende fortemente desses parâmetros, bem como das propriedades físicas de materiais e superfícies. O projeto de uma chaminé pode variar em função das características climáticas e geográficas do local de implantação. As variáveis geométricas comumente analisadas incluem o comprimento e a largura da chaminé, a espessura do canal de ar, a área da superfície coletora, o tamanho das aberturas de entrada e saída do ar e o ângulo de inclinação do coletor com a horizontal. Com relação às características construtivas e aos materiais utilizados, itens frequentemente analisados compreendem o tipo de vidro utilizado no coletor, as propriedades térmicas da placa absorvedora (como absorvância, emissividade, rugosidade superficial e capacidade térmica do material) e as propriedades do isolante térmico (como condutividade térmica e espessura).

3.1.1 Configuração geométrica

- Dimensões da chaminé

O desempenho de uma chaminé solar está diretamente relacionado às taxas de ventilação e de transferência de calor que, por sua vez, dependem da configuração geométrica do sistema (LI et al, 2004). Bassiouny e Koura (2008) evidenciam a importância das dimensões da chaminé – incluindo espessura do canal de ar, diferença de altura entre aberturas de entrada e saída do ar e inclinação do coletor (Figura 3.3) – sobre os resultados de fluxo de ar e perfis de velocidade.

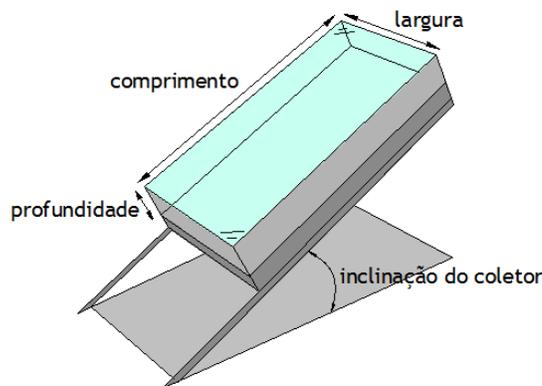


Figura 3.3: Esquema de uma chaminé solar (adaptado de ADAM et al, 2002)

Diversos autores comentam sobre a influência da relação entre a altura da chaminé e a espessura do canal de ar no incremento da vazão (CHEN et al, 2003; MATHUR et al, 2006, ONG e CHOW, 2003). Mathur et al (2006) testaram experimentalmente nove diferentes combinações de altura da chaminé e espessura do canal entre o vidro e a placa absorvedora, em experimento conduzido em uma câmara cúbica de madeira, para uma chaminé vertical. Os resultados mostraram um incremento na vazão volumétrica com o aumento da razão entre a espessura do canal e a altura da chaminé (e/C), havendo um limite máximo em que a relação é válida.

Bouchair (1994 apud ONG e CHOW, 2003) mostrou que, para uma chaminé de 1,95m de altura e espessura do canal variável, eletricamente aquecida, a razão ótima de e/C é 1/10, para obtenção de vazão máxima, dentro das condições do experimento do autor. Chen et al (2003) concluíram que, se fossem ultrapassados certos limites, poderia ocorrer uma circulação inversa do ar no canal, ou seja, um fluxo descendente pelo centro do duto. Os autores chegaram a uma espessura ideal de 0,3m. Adam (2003) afirma que o limite de espessura depende do comprimento, da inclinação e da área de abertura da chaminé, bem como dos fluxos de calor.

- Inclinação do coletor solar

A intensidade de radiação solar incidente na cobertura de vidro da chaminé também tem grande influência no seu desempenho. A quantidade de energia solar que atinge a superfície coletora é inversamente dependente do ângulo de incidência da radiação solar (sendo o ângulo de incidência definido como a diferença angular entre os raios incidentes e a reta normal à superfície). Em vista disso, em latitudes mais próximas da linha do Equador pode ser vantajoso utilizar o coletor solar inclinado, visando melhorar o funcionamento do sistema.

Conforme varia o ângulo de inclinação, dois fatores interferem, em direções opostas, no desempenho da chaminé. Para latitudes próximas à linha do Equador, a superfície coletora com menor inclinação em relação ao plano horizontal fica mais exposta à radiação solar, elevando a temperatura do ar no canal e aumentando, conseqüentemente, a diferença de temperatura em relação ao ar ambiente. Por outro lado, há uma perda de altura, que provoca redução na diferença de pressão dentro da chaminé (SAKONIDOU et al, 2008).

Os resultados obtidos por Chen et al (2003) mostraram um fluxo de ar máximo com o coletor solar inclinado a 45°, sendo observado um incremento de 45% em relação a uma chaminé vertical, sob condições idênticas. A pesquisa consistiu na construção de um modelo experimental de chaminé solar, com placa coletora eletricamente aquecida, apresentando fluxo de calor uniforme em toda a superfície. Os autores concluíram que a razão para este aumento está na distribuição de velocidades mais uniforme ao longo da seção da chaminé, o que reduz significativamente as perdas de pressão na entrada e saída do ar.

- Projeto do coletor solar

O formato e a rugosidade da superfície do coletor solar da chaminé têm influência na absorção e transferência do calor por convecção para o ar. Garg et al (1991) avaliaram a melhoria no desempenho de aquecedores convencionais de ar através da introdução de aletas na passagem do ar, visando aumentar a taxa de transferência de calor entre a superfície da placa e o ar. Resultados mostraram que a temperatura do ar na saída, e portanto a energia total coletada (eficiência), aumentou com o acréscimo no número de aletas. A dependência do número de aletas se tornou relativamente mais pronunciada em espessuras maiores do canal.

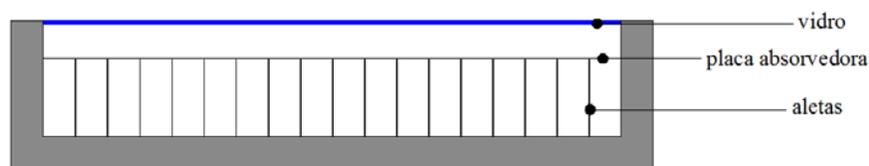


Figura 3.4: Corte esquemático de um coletor solar aletado

Singh (2006) também analisou o aumento da transferência de calor em um aquecedor solar de ar, por meio de aletas longitudinais contínuas. Os resultados foram apresentados para espaçamento das aletas de 25 a 45mm. Foi encontrado um coeficiente de transferência de calor efetivo máximo para o menor espaçamento das aletas (25mm), confirmando que, quanto maior o número de aletas, maior a taxa de aquecimento do ar (havendo um limite mínimo para o espaçamento). A emissividade e a taxa de transferência de calor da superfície também aumentaram com a redução no espaçamento.

3.1.2 Características construtivas e materiais

- Placa absorvedora

A placa absorvedora deve ser constituída por um material de elevada absorvância e condutividade térmica. Geralmente, ela é construída com uma chapa de metal pintada de preto. Se for desejável o acúmulo de calor para a ocorrência de ventilação natural noturna, ela pode ser feita de um material de elevada capacidade térmica. Contudo, uma desvantagem dessa opção é o fato do sistema tornar-se mais pesado, dificultando sua instalação na cobertura de edificações. Em vista disso, sua utilização torna-se mais viável em chaminés verticais, que possuem melhor desempenho em regiões de maior latitude.

Afonso e Oliveira (2000) empreenderam análises dos efeitos resultantes da variação na espessura da parede absorvedora sobre a vazão média resultante no canal, para um absorvedor de alvenaria e com espessuras variando entre 5 e 20cm. Os resultados não indicaram modificações significativas na vazão, sendo o valor máximo obtido para 10cm de espessura. Foram observadas, porém, algumas diferenças na distribuição do fluxo de ar ao longo do tempo.

Estudos desenvolvidos por Khedari et al (1997), Pratinhong et al (1997) e Gan (1998), propuseram variações na utilização da parede Trombe, visando obtenção de ventilação para resfriamento (Figuras 3.5 e 3.6). A parede Trombe foi originalmente configurada para aquecimento solar passivo do ambiente interno. Seu absorvedor é formado por uma parede de elevada capacidade térmica (como concreto, pedra ou abobe), cuja função é a captação e o acúmulo da energia proveniente da radiação solar e sua reemissão para o ambiente interno, na forma de calor.

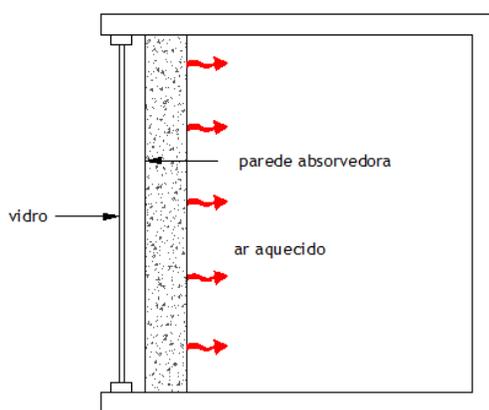


Figura 3.5: Configuração original da parede Trombe, para aquecimento

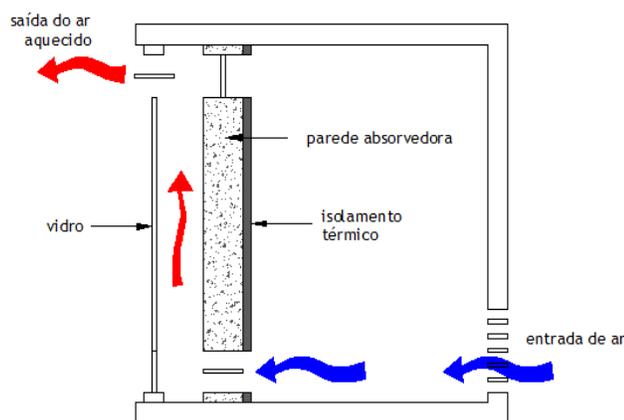


Figura 3.6: Parede Trombe modificada, para ventilação natural

- Isolamento térmico

Materiais comumente utilizados para isolamento térmico das faces externas da chaminé solar são poliestireno expandido (EPS), poliuretano expandido (PUR), fibra de vidro ou madeira compensada. Afonso e Oliveira (2000) estudaram os efeitos da espessura do isolamento térmico no desempenho do sistema. Um isolamento de 5cm de espessura apresentou resultados similares ao de um isolamento ideal, para uma chaminé vertical com parede absorvedora de alvenaria (espessura 10cm) e para as condições climáticas consideradas. Os resultados da pesquisa indicaram que uma chaminé solar sem isolamento térmico tem redução na eficiência de até 60%, comparado à situação ideal, o que mostra sua importância para o bom funcionamento do sistema. Resultados semelhantes foram obtidos por Ong e Chow (2003) e Sakonidou et al (2008), para diferentes localidades.

- Vidro

O vidro usado na cobertura da chaminé solar deve ter elevada transmitância à radiação solar. Harris e Helwig (2007) mostraram que o uso de uma cobertura de vidro duplo proporciona uma pequena melhoria no desempenho da chaminé solar, mas não suficientemente significativa para compensar financeiramente. Os estudos foram realizados em uma chaminé solar de inclinação variável, sob as condições climáticas de Edimburgo, Escócia (latitude 52° Norte).

3.2 Ensaio em célula de teste experimental: materiais e métodos

Foi desenvolvido um estudo experimental, que consistiu na construção e no monitoramento de um modelo físico, exposto a condições climáticas reais, situado no campus da Universidade Federal de São Carlos, SP, à latitude de 22°02' Sul. A célula de teste construída possui 2,4m de comprimento, 1,3m de largura, 2,2m de altura e é provida de uma chaminé solar com coletor de inclinação variável, orientado para o Norte (Figura 3.7).

A abertura de entrada do ar situa-se na fachada Sul, a 0,3m acima do nível do piso, e possui área efetiva de abertura para passagem do ar de 0,14m². É constituída por venezianas horizontais instaladas na porta de

entrada da célula de teste (Figura 3.8).

A elaboração do projeto da chaminé baseou-se nos seguintes aspectos levantados na literatura especializada:

- Dimensionamento: a chaminé tem altura útil de 1,80m e seção transversal de 1,00 x 0,18m, o que corresponde à relação e/C de 1/10, conforme indica Bouchair (1994 apud ONG e CHOW, 2003).
- Inclinação do coletor solar: a placa coletora da chaminé solar tem inclinação regulável, com ângulos variando de 0 a 45° em relação ao plano horizontal, visando otimizar os ângulos de incidência de radiação solar ao longo do ano, para a latitude de São Carlos (Figura 3.8). Para que não haja perda na eficiência do sistema devido à redução da altura, foi utilizado um extensor metálico vertical acoplado ao coletor da chaminé, de modo a garantir a manutenção de uma mesma altura útil ao conjunto, independentemente da inclinação do coletor. Com essa solução, pretende-se obter as irradiâncias máximas em qualquer época do ano, para uma mesma altura total do sistema.



Figura 3.7: Célula de teste com chaminé solar, São Carlos, SP

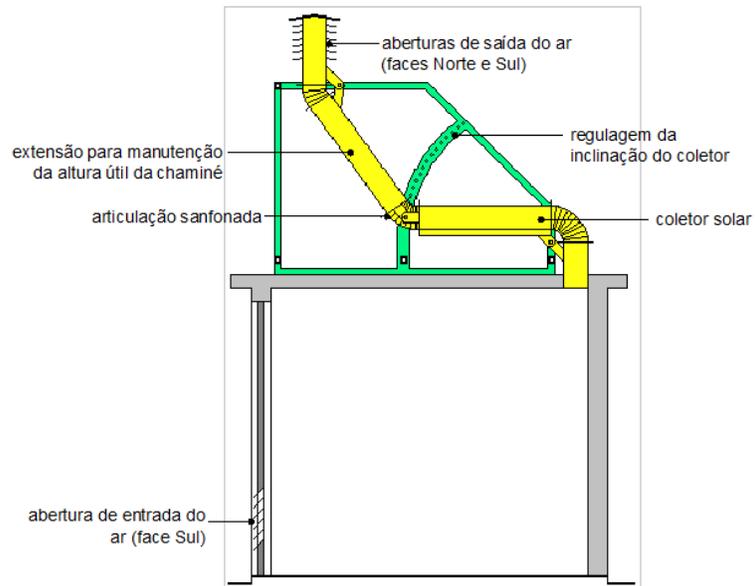


Figura 3.8: Corte esquemático da célula de teste

- Absortância solar: a superfície coletora foi construída em alumínio e pintada com tinta preta, para garantir elevada absortância à radiação solar.
- Aletas: foram utilizadas aletas longitudinais no interior do coletor solar, paralelas ao fluxo de ar, visando aumentar a taxa de transferência de calor da placa coletora para o ar (Figura 3.9), conforme recomendam Garg et al (1991) e Singh (2006). Elas formam um canal fisicamente independente, aquecido pelo absorvedor por condução.
- Cobertura de vidro: o coletor solar foi coberto por um vidro comum incolor (fator solar aproximado de 0,86), de espessura 6mm.

- Isolamento térmico: foi utilizada uma camada de 5cm de poliuretano para isolamento térmico das laterais e base do coletor, de forma a reduzir as perdas de calor por condução.

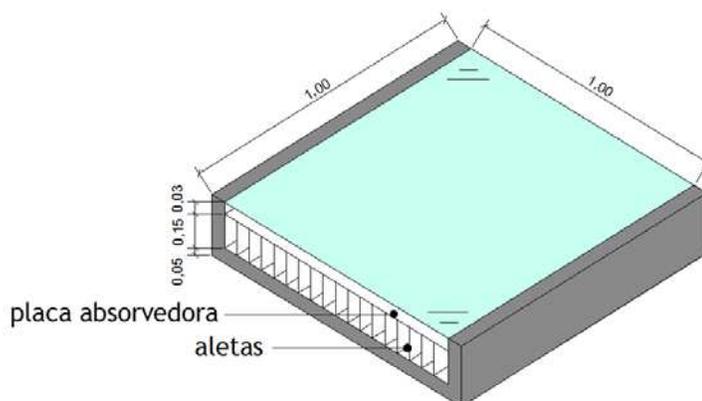


Figura 3.9: Perspectiva do coletor solar aletado

3.2.1 Monitoramento e tratamento de dados

A célula de teste foi monitorada no período de março a agosto de 2010. Os pontos de monitoramento foram posicionados em diferentes alturas do coletor da chaminé solar, tanto no canal entre o vidro e o absorvedor (CanV) como no canal entre aletas (CanA). Os dados foram monitorados em intervalos de um minuto, sendo posteriormente calculadas as médias horárias. Foram monitoradas as seguintes variáveis:

- Temperatura do ar, através de termoresistores com faixa de medição de 0 a 100°C e incerteza de 0,3°C.
- Temperaturas superficiais do vidro, do absorvedor e das aletas, através de termoresistores com faixa de medição de 0 a 100°C e incerteza de 0,2°C.
- Velocidade do ar, através de termo-anemômetros, com faixa de medição de 0 a 3m/s e incerteza de 3%.

As variáveis climáticas externas – incluindo temperatura de bulbo seco (TBS), umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento, pluviosidade e irradiância horizontal – foram adquiridas na estação climatológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMet), localizada no campus da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), a 200m da célula de teste. Como os dados climáticos de determinada hora correspondem ao valor médio da meia hora anterior, os valores registrados foram apresentados como horas inteiras menos 30 minutos, de forma a sincronizar os dados da estação meteorológica com os dados monitorados (RORIZ, 2010).

Com base nos dados monitorados e nos dados obtidos através da estação meteorológica, foram calculadas duas variáveis: vazão volumétrica de ar na chaminé solar e irradiância solar sobre o plano de vidro do coletor. A irradiância solar sobre o plano inclinado foi calculada com base em modelos teóricos consagrados na literatura especializada, publicados por Muneer (2004).¹

A vazão volumétrica de ar na chaminé solar foi calculada através dos dados de velocidade e temperatura do ar obtidos no monitoramento (RORIZ, 2010). Primeiramente, foi calculada a densidade do ar e a vazão mássica

¹ Maiores detalhes sobre o cálculo podem ser encontrados em Roriz (2010).

para cada canal do coletor – canal entre vidro e absorvedor e canal entre aletas. Após isso, foi calculada a vazão mássica total do coletor que, pelo princípio de conservação de massa, corresponde à soma das vazões nos dois canais. Por fim, foi calculada a vazão volumétrica total correspondente. As Equações 3.1 a 3.3 foram utilizadas para os cálculos.

Cálculo da densidade do ar, de acordo com Incropera e De Witt (1992):

$$\rho = 1,1614 - 0,00353(T_c - 300) \quad \text{Eq. 3.1}$$

Sendo:

ρ Densidade do ar (kg/m^3)
 T_c Temperatura média do ar no canal (K) – obtido no monitoramento

Cálculo da vazão mássica:

$$m = \rho \cdot V \cdot A \quad \text{Eq. 3.2}$$

Sendo:

m Vazão mássica (kg/s)
 V Velocidade do ar (m/s) – obtido no monitoramento
 A Área de abertura da seção de entrada ou saída do canal (m^2) = $0,03\text{m}^2$ para o canal entre vidro e absorvedor e $0,15\text{m}^2$ para o canal entre aletas

Cálculo da vazão volumétrica:

$$Q = \frac{m}{\rho} \quad \text{Eq. 3.3}$$

Sendo:

Q Vazão volumétrica (m^3/s)

A Figura 3.10 apresenta os pontos de medição e a Tabela 3.1 apresenta uma descrição dos dados obtidos através da estação meteorológica, dos dados monitorados na chaminé solar e dos dados calculados.

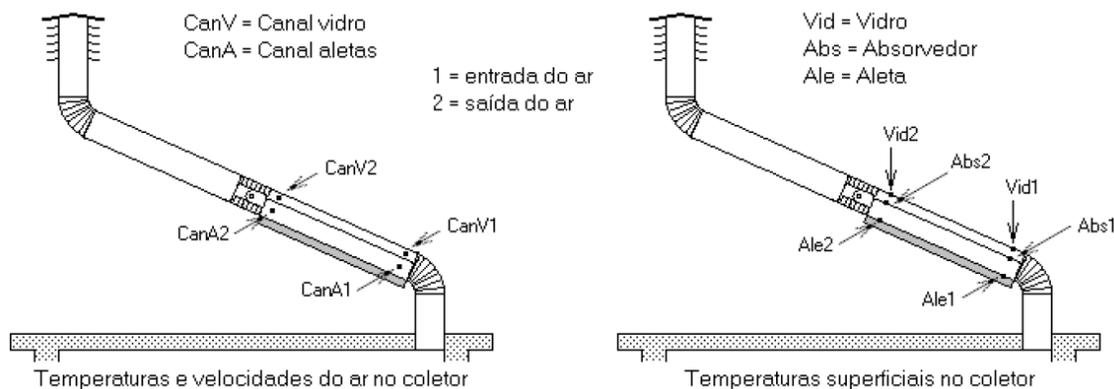


Figura 3.10: Posicionamento dos sensores de monitoramento na chaminé solar (RORIZ, 2010)

Tabela 3.1: Variáveis relativas à etapa experimental (RORIZ, 2010)

Fonte	Símbolo	Unidade	Descrição
Estação do INMet	TBS	°C	Temperatura de bulbo seco
	UR	%	Umidade relativa do ar
	VelV	m/s	Velocidade do vento a 10m de altura
	DirV	°	Direção do vento a 10m de altura (a contar do Norte verdadeiro, sentido horário)
	Pluv	mm	Pluviosidade
	lhrz	W/m ²	Irradiância sobre o plano horizontal
Monitoramento da célula de teste	CanV1	°C/ m/s	Temperatura ou velocidade do ar na entrada do canal entre vidro e absorvedor
	CanA1	°C/ m/s	Temperatura ou velocidade do ar na entrada do canal de aletas
	CanV2	°C/ m/s	Temperatura ou velocidade do ar na saída do canal entre vidro e absorvedor
	CanA2	°C/ m/s	Temperatura ou velocidade do ar na saída do canal entre aletas
	Vid1	°C	Temperatura superficial do vidro na entrada do coletor
	Abs1	°C	Temperatura superficial do absorvedor na entrada do coletor
	Ale1	°C	Temperatura superficial das aletas na entrada do coletor
	Vid2	°C	Temperatura superficial do vidro na saída do coletor
	Abs2	°C	Temperatura superficial do absorvedor na saída do coletor
Ale2	°C	Temperatura superficial das aletas na saída do coletor	
Cálculo	Q	m ³ /h	Vazão volumétrica do ar na chaminé solar, obtida por cálculo
	Ivid	W/m ²	Irradiância sobre o plano de vidro do coletor, obtida por cálculo

3.3 Resultados obtidos no monitoramento

Para apresentação dos resultados, foram selecionados três dias representativos de cada mês do monitoramento, entre março e agosto de 2010. A inclinação do coletor solar da chaminé variou mês a mês, aproximando-se ao ângulo ótimo de inclinação para máxima irradiância no plano do vidro; com exceção do mês de agosto, cuja inclinação ideal seria de 36° (Tabela 3.2).

Tabela 3.2: Inclinação do coletor em relação ao plano horizontal utilizada na célula de teste

Mês	Inclinação do coletor em relação à horizontal
Março	20°
Abril	32°
Maio	45°
Junho	45°
Julho	45°
Agosto	45°

As Figuras 3.11 a 3.16 apresentam os resultados coletados para o mês de março. Uma apresentação completa dos resultados adquiridos e dos gráficos elaborados para todo o período de coleta encontra-se no

Anexo I.

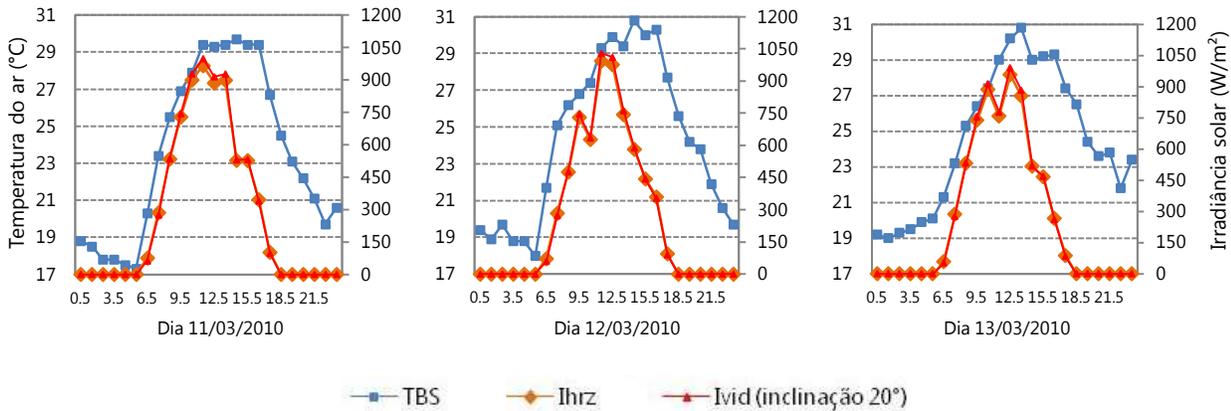


Figura 3.11: Temperatura do ar externo (TBS), irradiância solar horizontal (Ihrz) e irradiância solar no plano de vidro do coletor (Ivid)

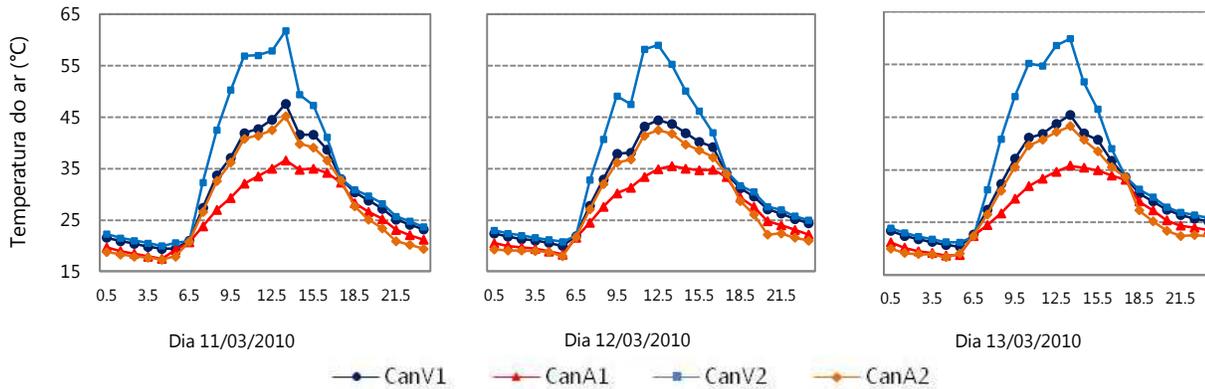


Figura 3.12: Temperatura do ar na entrada e saída do canal entre vidro e absorvedor (CanV1 e CanV2) e na entrada e saída do canal entre aletas (CanA1 e CanA2)

A diferença de irradiância solar entre o plano do vidro e o plano horizontal chegou a 3,5% ao meio dia, para o mês de março (Figura 3.11), o que correspondeu a um incremento médio de 30W/m^2 sobre o plano do vidro. Nesse horário, a temperatura do ar externo variou entre 29 e 30°C , a temperatura média do ar no canal entre vidro e absorvedor variou entre 50 e 51°C e a temperatura média do ar no canal entre aletas variou entre 37 e 38°C (Figura 3.12). Isso corresponde a um ganho de temperatura (ΔT) de aproximadamente 21°C para o canal entre vidro e absorvedor e de aproximadamente 8°C para o canal entre aletas.

Ainda ao meio dia, a temperatura superficial média do vidro ficou em 47°C , do absorvedor ficou entre 69 e 70°C e das aletas ficaram entre 43 e 44°C (Figuras 3.13 e 3.14). Houve uma diferença significativa entre a temperatura superficial do absorvedor e das aletas, o que indica uma baixa condução de calor do primeiro para o segundo. Isso pode ter ocorrido em função de um problema construtivo no coletor solar, pois o absorvedor e as aletas deveriam ser uma peça única, mas a montagem se deu através da soldagem de peças separadas. Uma provável consequência disso foi a concentração do calor na placa absorvedora, não havendo uma dissipação adequada para as aletas. Em vista disso, não houve um aumento significativo na temperatura do ar neste canal.

Pelas diferenças obtidas entre as medições nos pontos 1 e 2 (entrada e saída do canal), pode-se observar um incremento significativo da temperatura ao longo do canal, tanto superficial como do ar (Figuras 3.12 a 3.14). Com relação às temperaturas superficiais, as maiores diferenças podem ser observadas na placa absorvedora, que chegou a ter um ganho de 17°C entre os pontos 1 e 2, atingindo uma temperatura máxima de 80°C no ponto 2, ao meio dia do dia 12/03/2010.

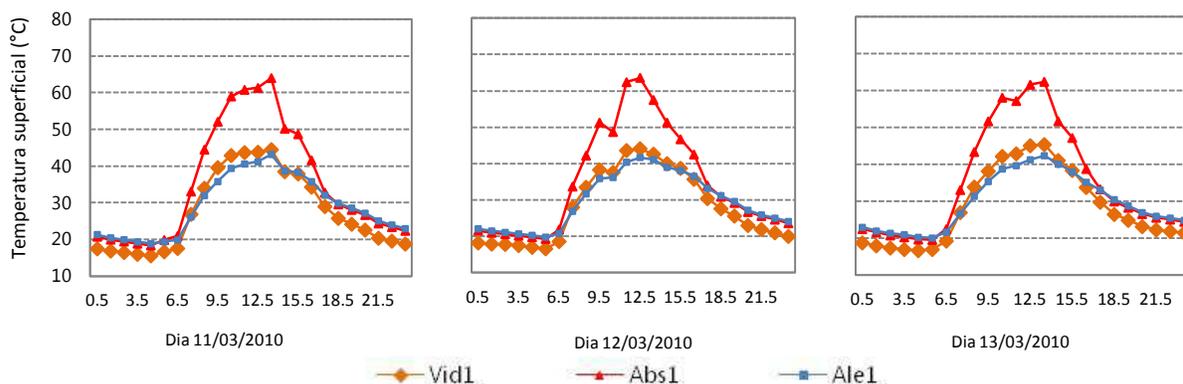


Figura 3.13: Temperaturas superficiais do vidro, do absorvedor e das aletas na entrada do coletor (Vid1, Abs1 e Ale1)

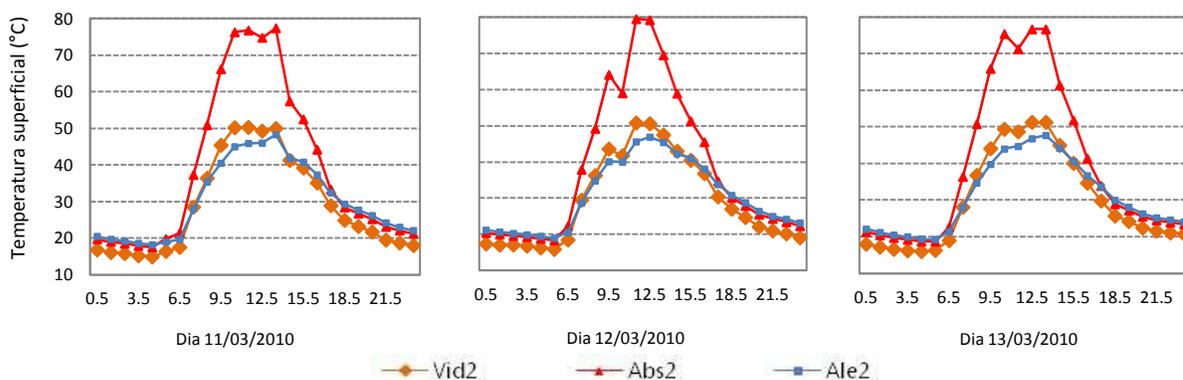


Figura 3.14: Temperaturas superficiais do vidro, do absorvedor e das aletas na saída do coletor (Vid2, Abs2 e Ale2)

Para o horário com radiação solar disponível (das 6:30 às 17:30h), a velocidade média do ar ficou em 0,22m/s no canal entre vidro e absorvedor e em 0,10m/s no canal entre aletas (Figura 3.15). Esses resultados correspondem a uma vazão volumétrica total de 78,4m³/h, em média (Figura 3.16). A oscilação das curvas de velocidade do ar foi ocasionada pela interferência causada devido à mudança constante na velocidade e direção do vento, que interfere diretamente sobre o desempenho da chaminé solar. As diferenças entre os pontos de medição também são influenciadas pela precisão na leitura.

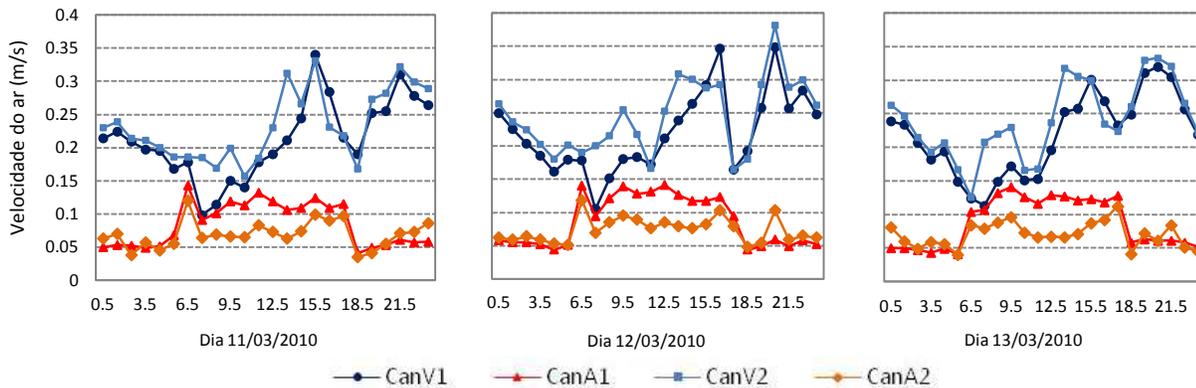


Figura 3.15: Velocidade do ar na entrada e saída do canal entre vidro e absorvedor (CanV1 e CanV2) e na entrada e saída do canal entre aletas (CanA1 e CanA2)

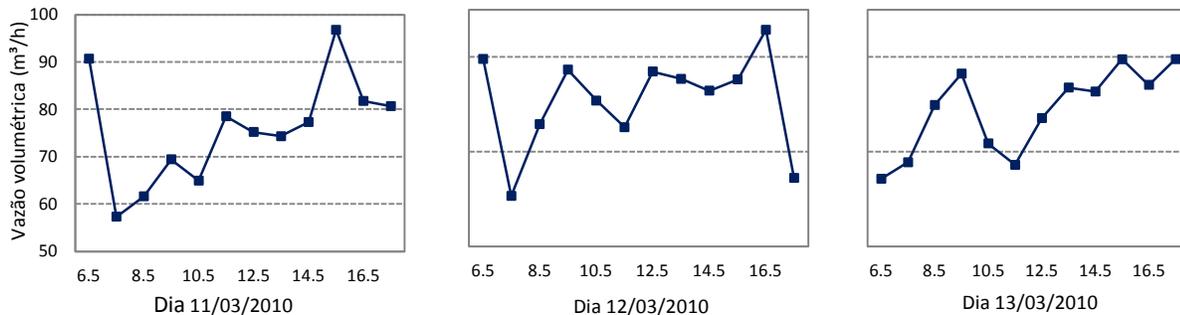


Figura 3.16: Vazão volumétrica da chaminé

3.3.1 Comparação com resultados experimentais de outra pesquisa

Apresenta-se aqui uma comparação dos resultados experimentais obtidos na presente pesquisa com os obtidos na pesquisa de Mathur, Mathur e Anupma (2006), de modo a verificar semelhanças e diferenças existentes entre os modelos e no resultado final de desempenho. Os autores apresentaram trabalhos bastante referenciados na literatura especializada, que vêm se desenvolvendo desde a década de 1990.

Mathur, Mathur e Anupma (2006) realizaram um estudo experimental em uma chaminé solar inclinada, localizada na cidade de Jaipur, Índia (latitude $26^{\circ}53'N$). A chaminé foi instalada sobre a cobertura de uma câmara cúbica de madeira, de aresta 1m. O coletor solar, posicionado a 45° de inclinação, era constituído por uma folha de alumínio pintada de preto, coberto por um vidro de 4mm de espessura, com um canal para passagem do ar de 35cm de espessura (Figura 3.17). A Tabela 3.3 apresenta um resumo das principais semelhanças e diferenças do experimento desenvolvido pelos autores com o desenvolvido nesta pesquisa.

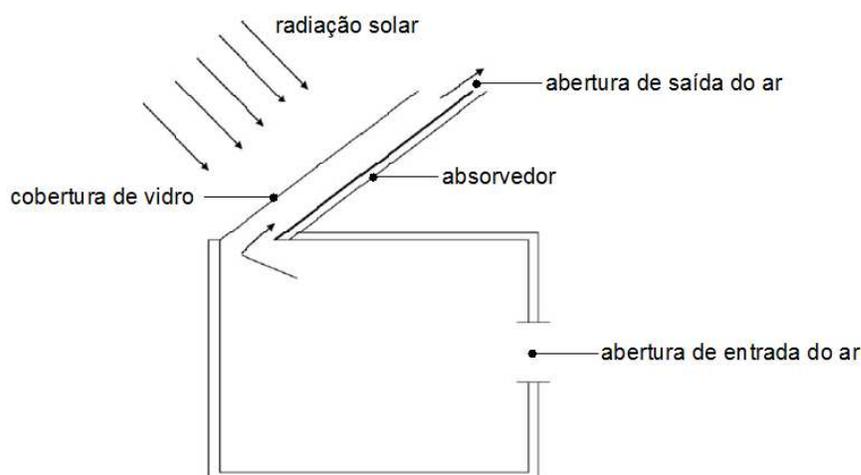


Figura 3.17: Protótipo experimental de Mathur, Mathur e Anupma (2006)

Tabela 3.3: Comparação entre dados experimentais

Variável	Roriz (2010)	Mathur, Mathur e Anupma (2006)
Comprimento da chaminé	1m	1m
Largura da chaminé	1m	1m
Inclinação da chaminé	Variável	45°
Presença de aletas na placa absorvedora	Sim	Não
Espessura do canal de ar	0,03m (entre vidro e absorvedor) + 0,15m (entre absorvedor e aletas) = 0,18m	0,35m
Vidro	Comum esp.6mm	Comum esp. 4mm
Interferência direta do vento	Sim	Não

Para comparação dos resultados, foram selecionados períodos de monitoramento em que as condições da célula de teste mais se assemelharam às condições apresentadas no experimento de Mathur, Mathur e Anupma (2006). Foi, portanto, selecionado o período em que a inclinação do coletor solar esteve a 45°, o que corresponde aos meses de maio a agosto de 2010. Foram também selecionados períodos em que a temperatura do ar externo e irradiância solar sobre a superfície de vidro estiveram próximos aos dados apresentados por Mathur, Mathur e Anupma (2006). Os resultados selecionados apresentam-se na Tabela 3.4.

. Tabela 3.4: Comparação entre resultados experimentais

Roriz (2010)						Mathur, Mathur e Anupma (2006)						
Irradiância solar (W/m ²)	Temperatura do ar (°C)			Temperatura superficial (°C)		Q (m ³ /h)	Irradiância solar (W/m ²)	Temperatura do ar (°C)		Temperatura superficial (°C)		Q (m ³ /h)
	TBS	CanV	CanA	Absorvedor	Vidro			TBS	Canal	Absorvedor	Vidro	
520	27,3	46,1	32,7	52,0	42,6	127,3	500	26,1	33,8	55,9	41,2	219,2
559	25,4	44,4	31,2	50,6	40,8	128,8	550	29,5	35,8	67,5	44,2	231,8
600	21,8	43,9	26,8	52,2	35,4	184,2	600	32,9	39,1	73,1	52,9	245,4
655	21,1	34,0	21,4	41,0	32,9	177,5	650	37,2	43,7	81,5	57,0	249,4
696	27,1	49,8	32,3	58,4	46,6	144,5	700	39,1	45,9	85,3	60,4	268,6
760	27,7	50,8	33,7	60,4	46,7	118,0	750	39,9	47,6	88,2	64,1	277,3

Como o período de monitoramento experimental selecionado para comparação corresponde às estações de outono e inverno, irradiâncias solares próximas correspondem a temperaturas de bulbo seco mais baixas do que as monitoradas por Mathur, Mathur e Anupma (2006). Em vista disso, as temperaturas superficiais do vidro e do absorvedor aqui apresentadas ficaram mais baixas (Figura 3.18). Já os resultados de temperatura do ar apresentam a mesma ordem de grandeza (Figura 3.19), especialmente do canal entre vidro e absorvedor (CanV).

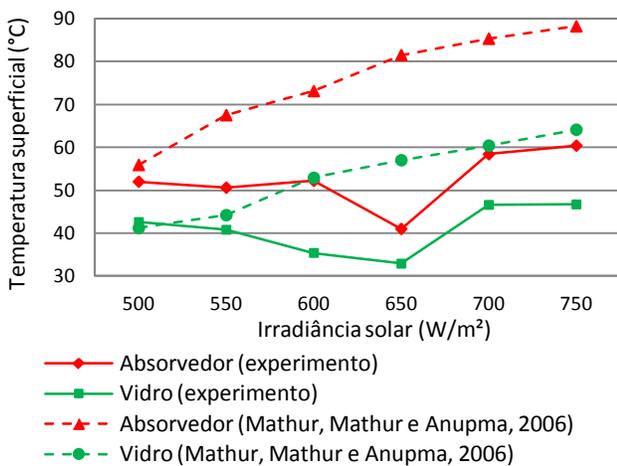


Figura 3.18: Temperatura superficial do vidro e do absorvedor

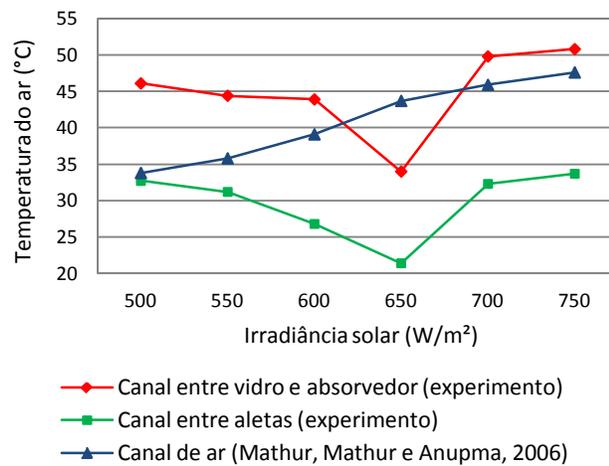


Figura 3.19: Temperatura do ar no canal do coletor solar

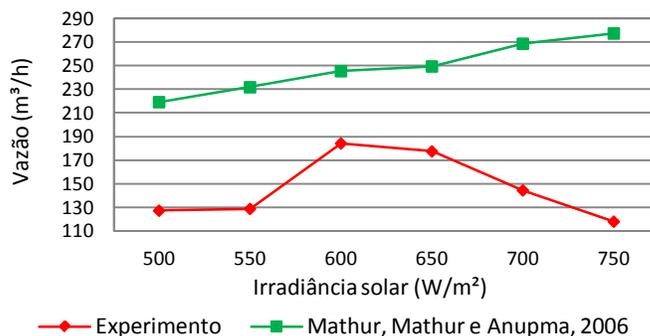


Figura 3.20: Vazão volumétrica da chaminé solar

Os resultados de vazão volumétrica do ar no canal da chaminé ficaram, em média, 40% abaixo dos valores obtidos por Mathur, Mathur e Anupma (2006) (Figura 3.20). Podem contribuir para esse resultado: o canal mais estreito, que resulta em um menor volume para circulação do ar; a temperatura do ar externo mais baixa; o elevado atrito da instalação experimental aqui apresentada, devido às venezianas nas aberturas de entrada e saída do ar, às articulações sanfonadas utilizadas e às aletas do coletor solar; a possível interferência negativa do vento (questão analisada no item a seguir).

3.3.2 Interferência do vento no desempenho da chaminé solar

Como a célula de teste experimental foi construída sem qualquer mecanismo para impedir a interferência do vento, faz-se necessária uma análise do desempenho da chaminé solar quanto ao fluxo de ar obtido tanto por efeito chaminé como por ação dos ventos, de modo a identificar qual a interferência do vento no seu desempenho.

A célula de teste foi implantada com o Norte voltado para a cobertura de vidro do coletor. A abertura de entrada de ar está localizada na fachada Sul, a 2,4m de distância de uma barreira provocada por outra célula de teste (Figura 3.21). As direções de vento favoráveis à ventilação estão, aproximadamente, no intervalo de 120° a 160° e de 200° a 240°. Nas direções entre 160° e 200°, a outra célula de teste estabelece uma barreira na entrada de ar da chaminé solar. As demais orientações são contrárias à abertura de entrada de ar.

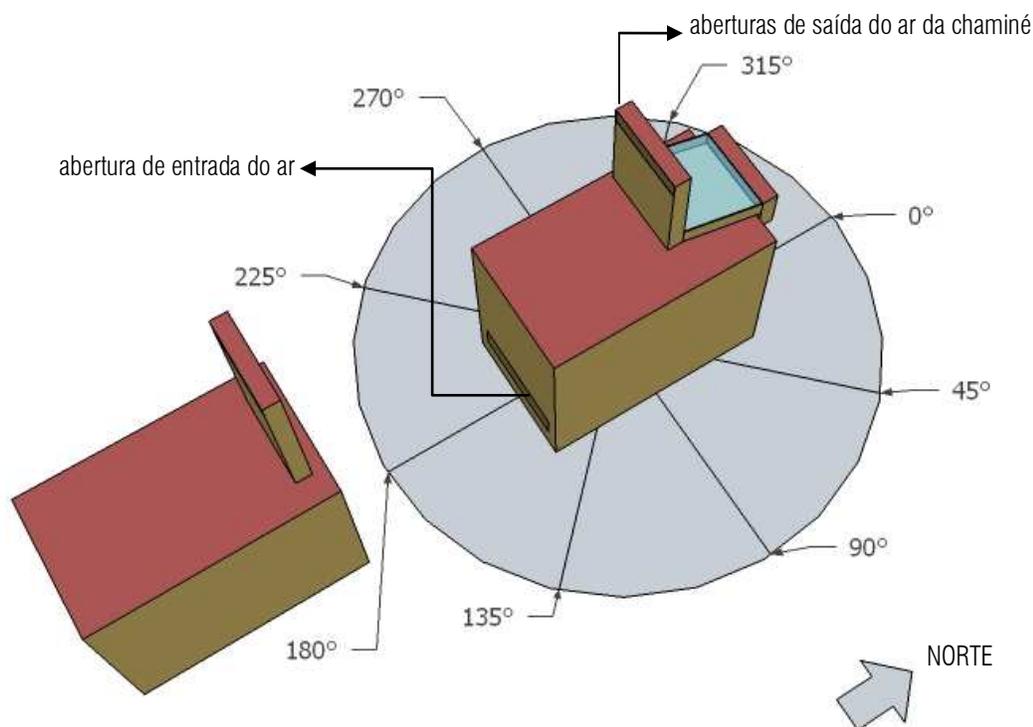


Figura 3.21: Indicação das direções do vento com relação à implantação da chaminé solar

A Figura 3.22 apresenta três gráficos comparativos para medições realizadas no dia 27/05/2010. Neste dia, o vento esteve em uma direção favorável à abertura de entrada do ar da chaminé solar, entre 140° e 150°, e a

uma velocidade variando entre 1,1 e 4,8m/s, ficando em média a 3,4m/s. A diferença de temperatura entre o ar no canal da chaminé (canal entre vidro e absorvedor) e o ar externo (ΔT) chegou a 23,2°C. Pode-se observar que a incidência favorável do vento contribuiu para ventilação por ação dos ventos combinado ao efeito chaminé, sendo que a vazão volumétrica da chaminé ficou constantemente acima de 150m³/h, chegando a um pico de 250m³/h no horário de maior irradiância e maior velocidade do vento.

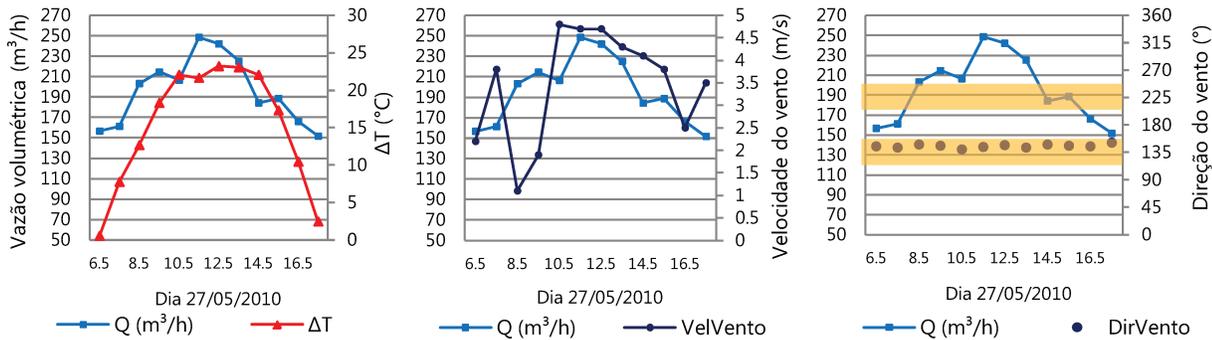


Figura 3.22: Resultados obtidos no experimento para 27/05/2010, com destaque para a direção favorável à incidência de ventos na chaminé solar (hachura amarela)

A Figura 3.23 apresenta dados de monitoramento de 16/08/2010, dia em que a incidência de vento também esteve favorável à abertura de entrada de ar da célula de teste. Pode-se observar que o perfil de vazão volumétrica no interior da chaminé coincidiu com o perfil de velocidade do vento, o que enfatiza a importância da ação dos ventos sobre o desempenho da chaminé solar experimental.

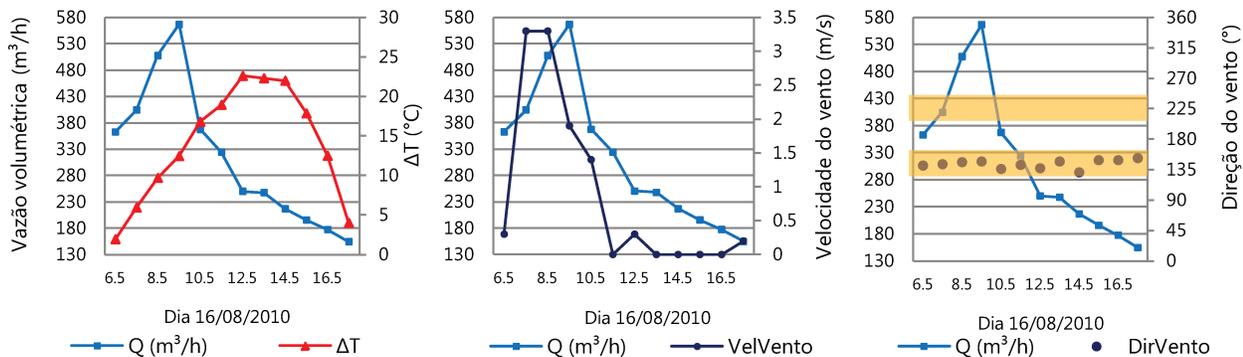


Figura 3.23: Resultados obtidos no experimento para 16/08/2010, com destaque para a direção favorável à incidência de ventos na chaminé solar (hachura amarela)

A Figura 3.24 apresenta gráficos comparativos para o dia 30/05/2010. Neste dia, o vento não esteve em direção favorável à ventilação por ação dos ventos, pois manteve-se em sentido oposto à abertura de entrada de ar da chaminé solar. Sua velocidade média ficou em 2,8m/s. A diferença de temperatura entre o ar no canal da chaminé e o ar externo (ΔT) foi superior à apresentada no dia 27/05/2010, chegando a 25,8°C. Nesse dia houve atuação predominante da ventilação por diferença de temperatura e um efeito negativo da ação dos ventos sobre o funcionamento da chaminé solar. Em vista disso, a vazão volumétrica da chaminé ficou abaixo da observada no dia 27/05, mantendo-se a uma média de 110m³/h.

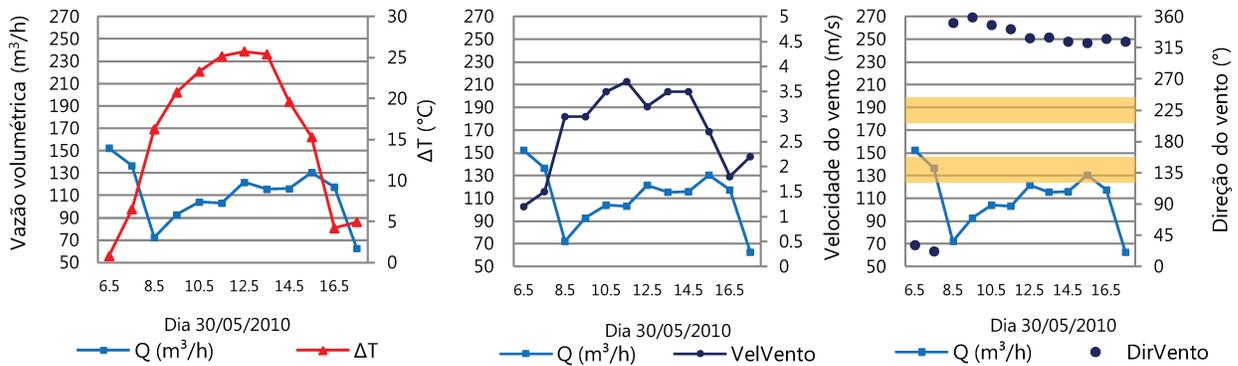


Figura 3.24: Resultados obtidos no experimento para 30/05/2010, com destaque para a direção favorável à incidência de ventos na chaminé solar (hachura amarela)

A Figura 3.25 mostra dados de monitoramento do dia 11/03/2010, dia em que a incidência de vento também esteve contrária à abertura de entrada de ar da célula de teste. Este dia inclui medições realizadas no período noturno. Nota-se uma vazão volumétrica média de 50m³/h durante o período sem radiação solar disponível e um aumento para 80m³/h no período com irradiância solar, o que demonstra o incremento proporcionado pela energia solar sobre o efeito chaminé.

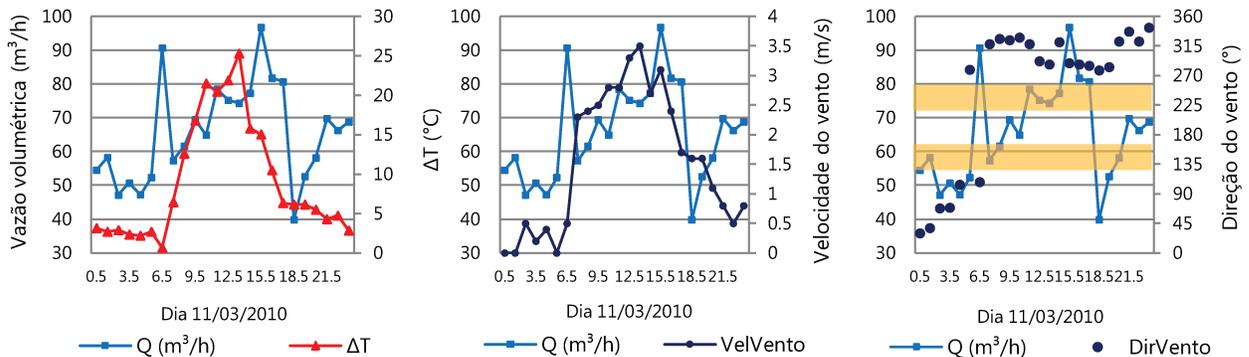


Figura 3.25: Resultados obtidos no experimento para 11/03/2010, com destaque para a direção favorável à incidência de ventos na chaminé solar (hachura amarela)

No caso do vento incidir na direção contrária à abertura de entrada do ar, o desempenho da chaminé solar pode ser prejudicado, pois pode ocorrer um fluxo de ar contrário à direção predominante desejada. Em contrapartida, se a direção de incidência do vento for favorável à abertura de entrada do ar, pode haver um incremento significativo na vazão da chaminé. Os resultados da etapa experimental enfatizaram a importância da interferência do vento sobre a chaminé solar, já que sua direção e velocidade tiveram influência determinante sobre o desempenho do sistema.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL: TÚNEL DE VENTO

4.1 Ensaios em túnel de vento: revisão bibliográfica

Wong e Heryanto (2004) utilizaram ensaios em túnel de vento para estudar o potencial de uso do efeito chaminé para incrementar a ventilação natural de apartamentos residenciais em Cingapura. Os experimentos em túnel de vento foram conduzidos com o objetivo de obter condições de contorno para as análises de dinâmica de fluidos computacional subsequentes. Um modelo foi construído em plástico e madeira compensada, na escala 1:5 (Figura 4.1). As análises foram conduzidas em um túnel de vento de circuito aberto e do tipo curto (Figura 4.2).



Figura 4.1: Modelo físico para ensaio em túnel de vento (WONG e HERYANTO, 2004)



Figura 4.2: Túnel de vento usado no experimento (WONG e HERYANTO, 2004)

Os ensaios em túnel de vento podem ser utilizados para auxiliar na identificação de possíveis interferências da direção e intensidade dos ventos incidentes sobre a chaminé solar. Podem também auxiliar na determinação dos coeficientes de pressão da envoltória, que são importantes dados de entrada para o cálculo do fluxo de ar provocado pelo efeito chaminé associado à ação dos ventos. No caso do interior do canal da chaminé, os ensaios em túnel de vento podem contribuir para a determinação das perdas de carga por ação do atrito, representadas pelo coeficiente de descarga.

4.1.1 Coeficientes de perda de carga e coeficientes de descarga

As perdas de carga representam as resistências por ação do atrito e da turbulência que ocorrem em um escoamento de fluido real, isto é, de viscosidade não nula. Essas resistências fazem com que parte da energia do escoamento seja convertida em calor, ocasionando uma redução na sua velocidade. Em vista disso, são dados importantes, usados em modelos teóricos, para determinar a vazão mássica de um sistema.

A equação de Bernoulli, que descreve o comportamento de um fluido em movimento ao longo de um duto, pode ser escrita de forma a incluir a perda de carga do escoamento (Δh), o que é representado da seguinte forma (Equação 4.1):

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^2 + \rho \cdot g \cdot z_1 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_2^2 + \rho \cdot g \cdot z_2 + \Delta P_h \quad \text{Eq. 4.1}$$

Sendo:

P_1 e P_2	Pressão nos pontos 1 e 2 do escoamento (Pa)
ρ	Densidade do ar (kg/m^3)
V_1 e V_2	Velocidade do ar nos pontos 1 e 2 do escoamento (m/s)
g	Aceleração da gravidade (m/s^2)
z_1 e z_2	Cota nos pontos 1 e 2 do escoamento (m)
ΔP_h	Perda de pressão (Pa)

A perda de pressão (ΔP_h) é representada pela Equação 4.2, onde a perda de carga (Δh) pode ser quantificada:

$$\Delta P_h = \Delta h \cdot \rho \cdot g \quad \text{Eq. 4.2}$$

Sendo:

Δh	Perda de carga (mca)
------------	----------------------

A perda de carga também pode ser expressa através de um coeficiente adimensional, denominado coeficiente de perda de carga (ζ) (Equação 4.3). Uma das referências bibliográficas mais extensas com métodos de cálculo de coeficientes de perda de carga para diferentes situações pode ser encontrada em Idel'cik (1999).

$$\zeta = \frac{\Delta h}{\frac{V^2}{2 \cdot g}} \quad \text{Eq. 4.3}$$

Seu valor depende da geometria das aberturas e do canal de passagem do ar, da rugosidade das superfícies, da contração do fluxo de ar nas aberturas e do regime do escoamento, se laminar ou turbulento¹. O regime do escoamento é dado através de outro parâmetro adimensional, denominado número de Reynolds (Re), que classifica o tipo de escoamento em função de sua massa específica, viscosidade cinemática, velocidade média e dimensão característica da geometria do escoamento, conforme Equação 4.4 (INCROPERA e DEWITT, 1992). Verifica-se experimentalmente que o regime de escoamento laminar, para escoamentos internos e incompressíveis, é caracterizado por números de Reynolds menores que 2000, e que o regime turbulento é caracterizado por números maiores que 2400, aproximadamente. O intervalo entre 2000 e 2400 é denominado de regime de transição ou regime transiente.

$$\text{Re} = \frac{V \cdot \rho \cdot D_H}{\nu} \quad \text{Eq. 4.4}$$

Sendo:

Re	Número de Reynolds (adimensional)
----	-----------------------------------

¹ Escoamento laminar: o movimento do fluido é altamente ordenado, sendo possível identificar linhas de corrente ao longo das quais as partículas do fluido se movem. Escoamento turbulento: o movimento do fluido é altamente irregular, sendo caracterizado pelo movimento tridimensional aleatório de relativamente grandes parcelas do fluido (INCROPERA e DEWITT, 1992).

D_H	Diâmetro hidráulico do canal (m)
ν	Viscosidade cinemática (m ² /s)

No caso de seções retangulares, o diâmetro hidráulico do canal (D_H) é dado por:

$$D_H = \frac{2 \cdot L \cdot e}{L + e} \quad \text{Eq. 4.5}$$

Onde:

L	Largura do canal (m)
e	Espessura do canal (m)

Para estudos específicos de ventilação natural, entretanto, utiliza-se frequentemente um outro coeficiente adimensional, presente na equação básica para determinação da vazão de ar provocada pelo efeito chaminé (Equação 2.1)², denominado coeficiente de descarga (C_d). Para o caso específico de edificações, Cóstola (2006) o define como o parâmetro que permite descrever o comportamento da abertura e das obstruções junto dela, como os brises, por exemplo. Esse coeficiente relaciona-se com o coeficiente de perda de carga pela seguinte equação:

$$C_d = \frac{1}{\sqrt{\zeta}} \quad \text{Eq. 4.6}$$

No caso das chaminés solares, há perdas de carga significativas tanto nas aberturas de entrada e saída do ar como no interior do canal da chaminé, devido à fricção. Adam (2003) e Baharvand (2010) propõem o cálculo do coeficiente de descarga de uma chaminé solar dividido em duas etapas:

- Coeficiente de descarga da abertura de entrada de ar (C_{de}), que pode ser calculado diretamente pela Equação 4.6, substituindo-se o coeficiente de perda de carga global (ζ) pelo coeficiente de perda de carga da entrada da chaminé (ζ_e), conforme Equação 4.7.

$$C_{de} = \frac{1}{\sqrt{\zeta_e}} \quad \text{Eq. 4.7}$$

- Coeficiente de descarga da abertura de saída do ar e do interior do canal da chaminé (C_{ds}), que podem ser combinados, como um sistema linear, através da Equação 4.8.

$$C_{ds} = \frac{1}{\sqrt{\zeta_s + f \cdot \frac{C}{D_H} + 1}} \quad \text{Eq. 4.8}$$

Sendo:

ζ_s	Coeficiente de perda de carga na saída da chaminé (adimensional)
f	Fator de fricção do canal (adimensional)
C	Comprimento do canal (m)

² $Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta z_{NPN} (T_i - T_e) / T_i}$

O fator de fricção do canal (f) pode ser calculado, para fluxo turbulento, através da Equação 4.9 (SAKONIDOU et al, 2008). Pela equação, pode-se notar a dependência do coeficiente de descarga no número de Reynolds. A equação é válida para superfícies lisas com número de Reynolds entre 4×10^3 e 10^5 .

$$f = \frac{0,316}{\text{Re}^{1/4}} \quad \text{Eq. 4.9}$$

Sakonidou et al (2008) utilizaram, para o cálculo do fluxo de ar em uma chaminé solar, o coeficiente de fricção da parede (f) de 0,056 e os coeficientes de perda de pressão na entrada (ζ_e) e na saída (ζ_s) da chaminé de 1,5 e 1,0, respectivamente. Tais valores correspondem a um canal retangular com as duas extremidades abertas e uma superfície aquecida e foram propostos por Sandberg e Moshfegh (1998).

A atribuição do coeficiente de descarga ainda é uma grande fonte de incerteza. A maioria dos trabalhos publicados sobre chaminés solares usa valores de coeficiente de descarga sugeridos pela literatura. Um dos trabalhos mais citados é o de Andersen (1995), que define um coeficiente de descarga específico para movimento de ar por impulsão térmica. O cálculo baseia-se na multiplicação do coeficiente de velocidade, que leva em conta as perdas por fricção, pelo coeficiente de contração, que leva em conta a contração do fluxo de ar quando passa pela abertura. Para uma abertura de bordas retas, o autor define o coeficiente de velocidade como sendo 0,95 e o coeficiente de contração como sendo 0,6, o que resulta em um coeficiente de descarga de 0,57. Este valor é amplamente utilizado nas pesquisas teóricas sobre chaminés solares (vide Tabela 2.3).

Entretanto, Marques da Silva (2003) aponta a relevância de se adotar um valor apropriado de coeficiente de descarga a cada situação, o que contraria a prática corrente de assumir um valor próximo de 0,6, independentemente do detalhamento das aberturas e do canal para passagem do ar. Cóstola (2006) reafirma este fato, ao mencionar que a importância na correta definição do valor do coeficiente de descarga é a mesma que o da área de abertura, já que ele afeta linearmente a quantidade de energia disponível na abertura.

4.1.2 Coeficientes de pressão

A ação do vento sobre um edifício depende da direção e velocidade de sua incidência, da rugosidade do entorno e da forma do próprio edifício (ALLARD, GHIAUS e MANSOURI, 2003). Avalia-se sua ação na envoltória de uma edificação através das pressões, expressas pelos coeficientes de pressão locais (C_p). Os coeficientes de pressão são definidos como o quociente adimensional da pressão total em um determinado ponto da envoltória menos a pressão estática de referência, divididos pela pressão dinâmica do fluxo de ar não perturbado (Equação 4.10).

$$C_p = \frac{P_{env} - P_0}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2} \quad \text{Eq. 4.10}$$

Sendo:

C_p	Coeficiente de pressão
P_{env}	Pressão em determinado ponto da envoltória (Pa)
P_0	Pressão estática de referência, do fluxo de ar não perturbado (ambiente) (Pa)
ρ	Densidade do ar (kg/m^3)

V Velocidade do vento (m/s)

A pressão total é composta pela soma das pressões estática e dinâmica (Equação 4.11). A pressão dinâmica é utilizada para o cálculo da velocidade do ar (Equação 4.12). Valores positivos correspondem a sobrepressões e valores negativos correspondem a subpressões.

$$P_t = P_e + P_d \quad \text{Eq. 4.11}$$

Sendo:

P_t Pressão total (Pa)
 P_e Pressão estática (Pa)
 P_d Pressão dinâmica (Pa)

$$P_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \quad \text{Eq. 4.12}$$

Como os coeficientes de pressão dependem da dimensão e da forma da edificação e de seu entorno, seus valores são, na maioria dos casos, desconhecidos. Alguns estudos, como os apresentados pela ASHRAE (2005) e pela ABNT NBR 6123 (1988), por exemplo, indicam valores típicos para determinadas proporções entre comprimento, largura e altura da edificação. Esses estudos não levam em consideração, no entanto, a presença de possíveis obstáculos no entorno.

Os coeficientes de pressão podem ser determinados com bastante precisão através de ensaios em túnel de vento com condições de escoamento controladas. Deve-se assegurar um regime turbulento no interior do túnel, para que as características do escoamento em torno do edifício sejam independentes do número de Reynolds ($Re > 10^5$). As condições de semelhança ficam, então, garantidas unicamente pela escala geométrica do modelo (MARQUES DA SILVA, 2003). Se fosse utilizado fluxo laminar, qualquer variação na velocidade causaria grandes variações na pressão.

4.2 Ensaios em túnel de vento: materiais e métodos

Ensaios em túnel de vento foram realizados em um modelo físico com geometria semelhante à da célula de teste experimental. Os ensaios tiveram por objetivo determinar os coeficientes de pressão e os coeficientes de perda de carga do modelo, de forma a permitir uma análise mais precisa da influência do vento sobre o desempenho da chaminé solar e fornecer maiores subsídios ao desenvolvimento de estudos teóricos subsequentes. A importância desses coeficientes foi reafirmada pelos resultados da pesquisa de campo, em que foi constatada uma influência determinante da direção e velocidade do vento sobre o desempenho da chaminé.

Os ensaios foram realizados no Núcleo de Dinâmica Aplicada do Departamento de Estruturas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) de Lisboa, Portugal, sob supervisão do Eng. Dr. Fernando Marques da Silva. O túnel de vento disponibilizado pelo LNEC para realização dos ensaios é um túnel de seção aberta, de baixa velocidade, com câmara de ensaios de 3m x 2m de seção e 9m de comprimento. Possui seis ventiladores axiais com potência de 11kW e velocidade de 1500rpm cada, sendo dois deles dotados de variador de frequência (Figura 4.3). Cada ventilador produz vento na seção do túnel com velocidade em torno de 3m/s.



Figura 4.3: Túnel de vento de seção aberta do LNEC

O procedimento experimental em túnel de vento incluiu as seguintes etapas:

- Construção de modelo físico simplificado da célula de teste experimental, em escala conveniente (considerando princípios de semelhança geométrica, cinemática e dinâmica).
- Ensaio em túnel de vento para monitoramento da pressão em diferentes pontos do modelo e determinação dos coeficientes de pressão das aberturas de entrada e saída do ar, para diferentes direções do vento.
- Ensaio em túnel de vento para determinação de coeficientes de perda de carga ao longo da chaminé e cálculo de coeficientes de descarga, para diferentes direções do vento.

4.2.1 Construção de modelo físico simplificado da chaminé solar

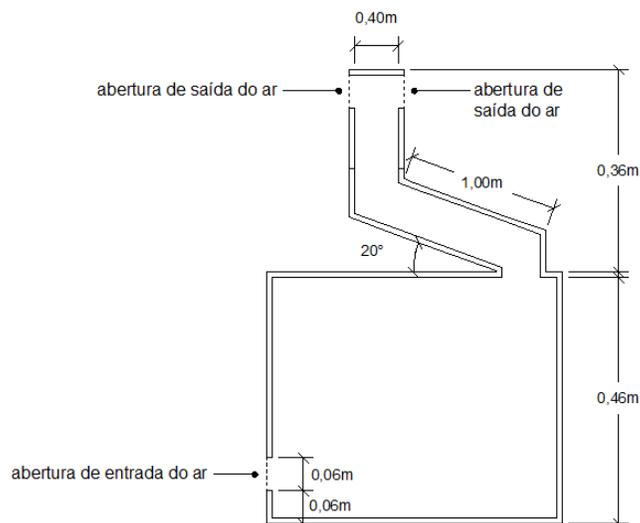


Figura 4.4: Modelo em escala 1:5 da chaminé solar (dimensões reais do modelo ensaiado no túnel de vento)

O modelo físico ensaiado no túnel de vento pode obstruir, no máximo, 5% da seção do túnel, o que significa uma área máxima de $0,3\text{m}^2$ na seção transversal. Em vista disso, optou-se por ensaiar um modelo semelhante ao protótipo experimental construído em São Carlos, em escala 1:5 (Figura 4.4). Foi utilizado, no

entanto, um canal de ar de maior espessura do que o apresentado no experimento, devido a problemas na passagem do ar e na leitura da pressão apresentados pelo canal mais estreito.

Para realização dos ensaios, optou-se por construir o modelo físico com chaminé inclinada a 20° , o que corresponde à inclinação ideal para máxima irradiância no mês de março, em São Carlos. Dentre os resultados coletados na pesquisa de campo, este mês foi escolhido pelo fato de ser estação de verão, período em que a ventilação natural é uma estratégia importante para promover conforto térmico.

4.2.2 Ensaios em túnel de vento para determinação de coeficientes de pressão

Foram inseridas tomadas de pressão internas e externas nos seguintes pontos do modelo: um ponto em cada face da envoltória (incluindo paredes e cobertura) e cinco pontos na abertura de entrada de ar, para medir pressão externa; mais cinco pontos próximos à entrada e seis pontos próximos à saída do canal da chaminé, para medir pressão interna; totalizando 21 tomadas de pressão (Figura 4.5). Para medir a pressão externa nas aberturas de saída do ar da chaminé, foram utilizados sensores externos em 12 diferentes posições, com capacidade de registro da pressão total (P_t) e estática correspondente (P_e) (Figura 4.6).

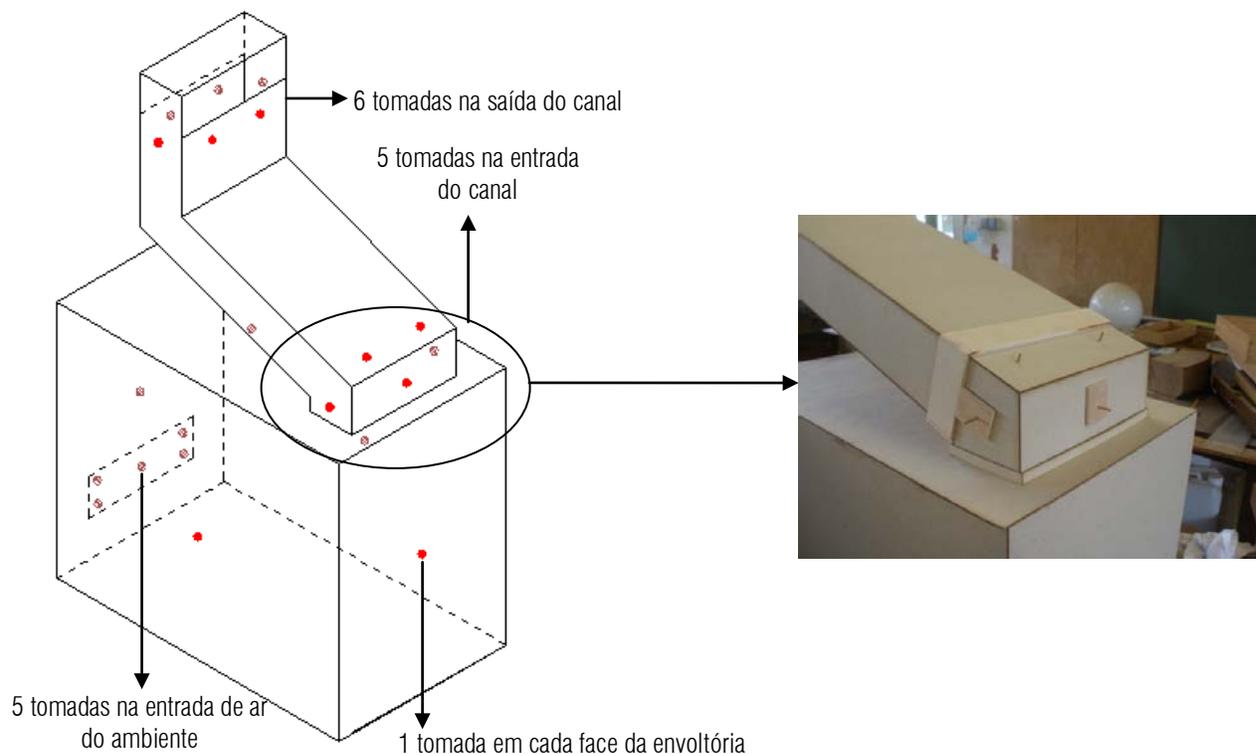


Figura 4.5: Tomadas de pressão no modelo

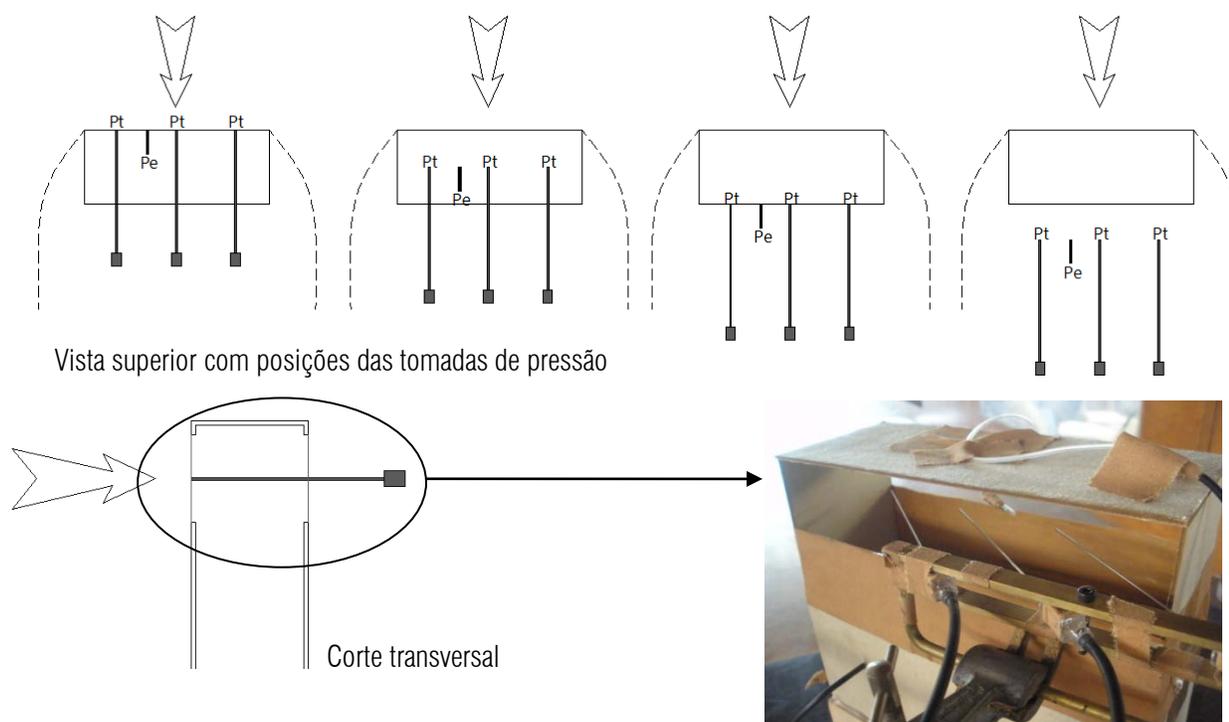


Figura 4.6: Tomadas de pressão na saída da chaminé

O modelo físico foi posicionado sobre uma base giratória no interior do túnel (Figura 4.7). Dentro da câmara de ensaios, um tubo de Pitot foi posicionado alinhado à direção do escoamento e foi conectado a um micromanômetro de leitura analógica (Figuras 4.8 e 4.9). O aparelho tem por objetivo medir a diferença entre pressão total e estática, de forma a calcular a pressão dinâmica do escoamento e, conseqüentemente, a velocidade local. O valor resultante foi utilizado como referência para o cálculo dos coeficientes de pressão.

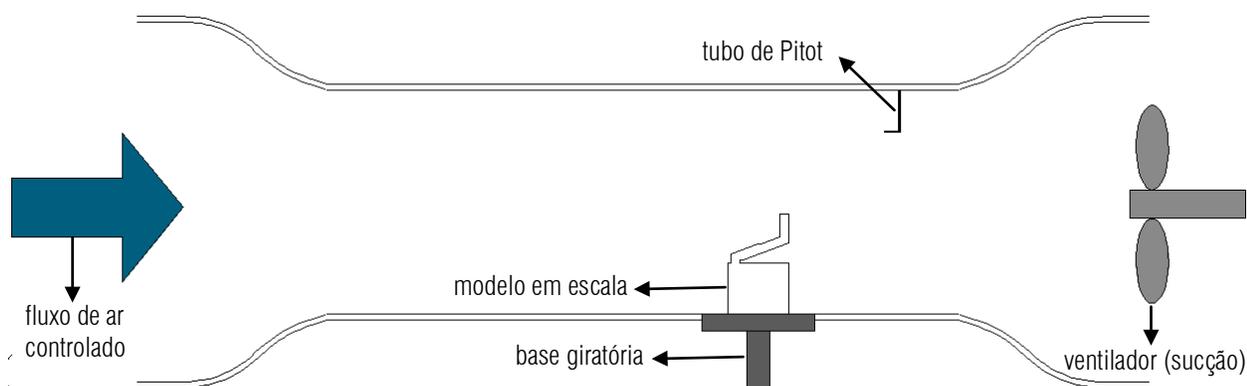


Figura 4.7: Corte esquemático dos ensaios realizados no túnel de vento

As tomadas de pressão tanto do modelo quanto do tubo de Pitot foram conectadas a um transdutor de pressão (*Electronic Pressure Scanner - ESP*) da Pressure Systems, modelo 16TC/DTC, com 32 canais (Figura 4.10). Um sistema de aquisição de dados, denominado *DTC Initium*, foi conectado ao transdutor de pressão e

programado para tomada de dados duas vezes a cada segundo. As medições foram realizadas pelo período aproximado de um minuto e um programa foi utilizado para calcular a média dos dados coletados, emitindo o relatório final em unidade Pascal. O micromanômetro foi utilizado para realização de leituras manuais, de modo a verificar a equivalência dos resultados com o transdutor de pressão.



Figura 4.8: Tubo de Pitot no interior do túnel



Figura 4.9: Micromanômetro e sistema de aquisição de dados



Figura 4.10: Transdutor de pressão

Os ensaios foram realizados para as seguintes direções do vento: 0° , 45° , 90° , 120° , 150° e 180° , a contar do Norte verdadeiro da célula de teste experimental (Figura 4.11). Optou-se por realizar um número maior de ensaios entre os ângulos de 90° e 180° , pelo fato de ser a região onde o vento incide diretamente sobre a abertura de entrada de ar do ambiente.

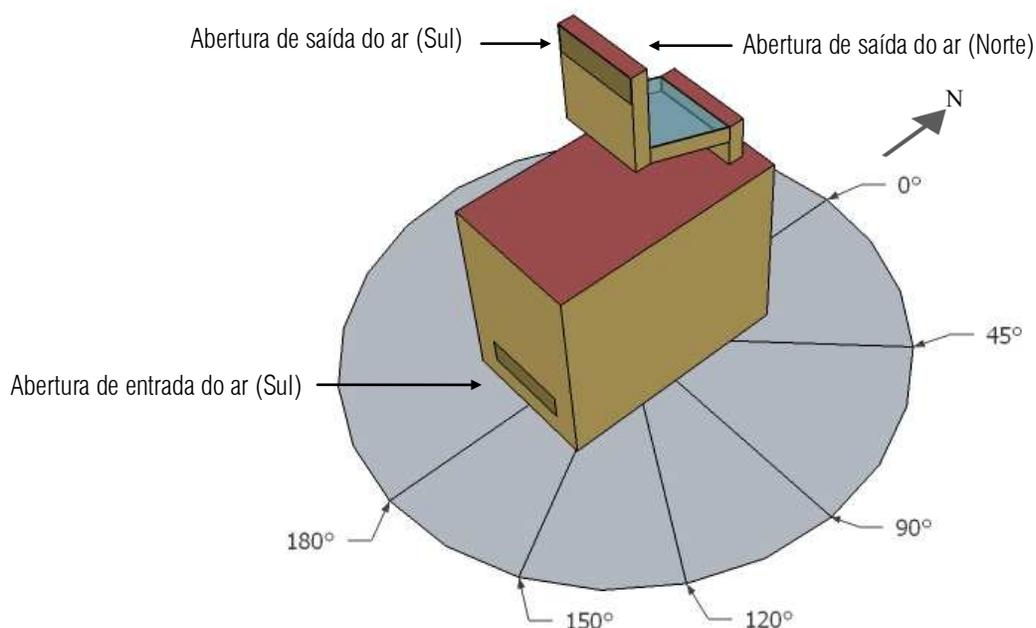


Figura 4.11: Direções do vento ensaiadas no túnel de vento

Os ensaios foram realizados de forma a refletir a situação encontrada na célula de teste originalmente construída em São Carlos. Como, na situação original, a célula de teste com chaminé solar foi construída em frente à outra célula de teste, os ensaios foram realizados levando em consideração a barreira provocada por essa construção (Figura 4.12), já que isso altera todo o comportamento do vento próximo à abertura de

entrada do ar. Foram realizados ensaios também sem a barreira. Todos os ensaios foram feitos com dois ventiladores do túnel ligados, o que corresponde a uma velocidade do vento de aproximadamente 6m/s.



Figura 4.12: Ensaios para determinação dos coeficientes de pressão – com barreira e sem barreira

4.2.3 Ensaios em túnel de vento para determinação de coeficientes de perda de carga

Para determinação dos coeficientes de perda de carga, foram realizados dois conjuntos de ensaios no túnel de vento:

- Sem vento ($V=0$) e com fluxo de ar variável no interior da chaminé.
- Com vento ($V\approx 3\text{m/s}$ e $V\approx 6\text{m/s}$) e com fluxo de ar variável no interior da chaminé.

A realização desses ensaios teve por objetivo determinar os coeficientes de perda de carga em dois trechos da chaminé: da altura da abertura de entrada do ar até o final do duto da chaminé e do final do duto da chaminé até a abertura de saída do ar (Figura 4.13). A comparação de casos com e sem vento teve como objetivo determinar a perda de carga na saída da chaminé por impulsão térmica isoladamente, através da subtração dos dois resultados.

Para simular o fluxo de ar no interior da chaminé, a base do modelo foi conectada a um conjunto de equipamentos composto por ventilador mais pleno. O pleno é uma caixa de 4m x 2,1m x 1,3m, que simula um ambiente interior em repouso, sujeito a condições de pressão impostas (LOUREIRO, 2008) (Figura 4.14). O conjunto é composto ainda por um ventilador mecânico de 4kW de potência e velocidade variável de 0 a 1500rpm, cuja função é insuflar (ou aspirar) ar para o interior do pleno, de forma a simular diferentes patamares de pressão (Figura 4.15).

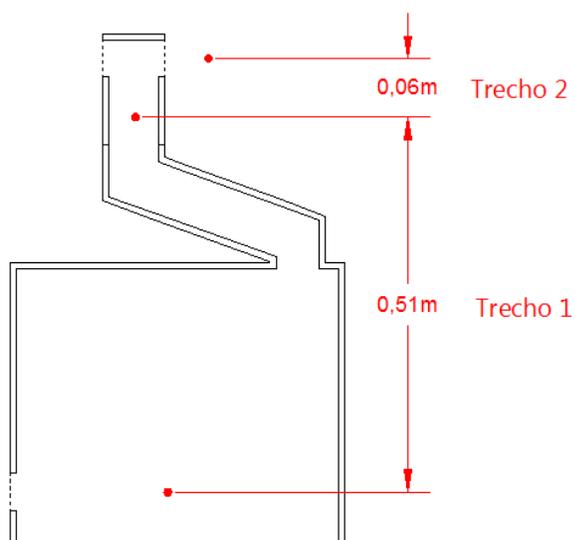


Figura 4.13: Ensaio para determinação dos coeficientes de perda de carga – trechos analisados (dimensões reais do modelo ensaiado no túnel de vento)



Figura 4.14: Pleno



Figura 4.15: Ventilador conectado ao pleno



Figura 4.16: Tubo Venturi

Um tubo cilíndrico de 0,12m de diâmetro liga o pleno a um tubo Venturi (Figura 4.16), onde o monitoramento do fluxo de ar é realizado através de um tubo de Pitot “S”. Este tubo possui duas tomadas de pressão posicionadas em lados opostos, alinhadas à direção do escoamento, de forma que uma delas esteja voltada para o escoamento, medindo a pressão total, e a outra esteja voltada para o lado oposto, medindo a pressão estática. A Figura 4.17 apresenta um esquema do túnel de vento conectado ao pleno.

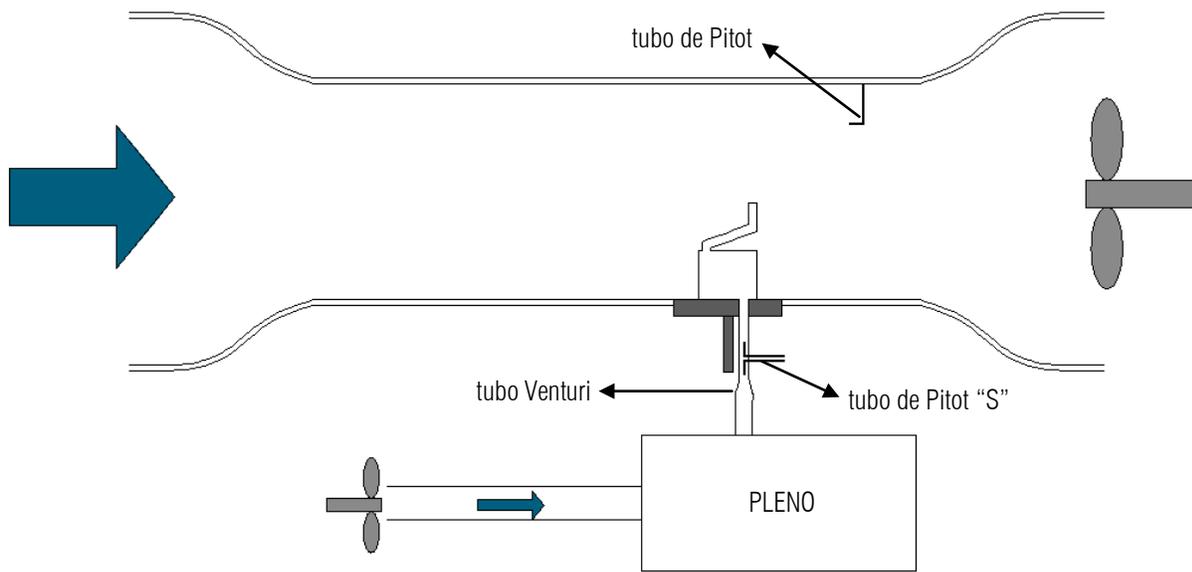


Figura 4.17: Corte esquemático dos ensaios realizados no túnel de vento conectado ao pleno

O Pitot "S" do tubo Venturi foi calibrado, com o intuito de possibilitar a obtenção do fluxo de ar desejado em função da diferença de pressão monitorada (pressão total menos pressão estática). O procedimento consistiu no uso de uma célula de pressão SETRA. Esta célula registra a diferença de pressão entre seus terminais e a converte em sinal elétrico, que pode ser lido sob a forma de diferença de potencial, em volts.

Primeiramente, a célula de pressão foi calibrada em um túnel de vento de circuito fechado, também pertencente ao LNEC, que possui uma câmara de ensaios de 1,2m x 1,0m x 3,0m e um ventilador com velocidade variável de 0 a 50 m/s. A diferença de potencial lida foi relacionada à velocidade correspondente no túnel, para diversos intervalos (Figura 4.18). Em seguida, a célula de pressão foi conectada ao Pitot "S" do Venturi, juntamente com o transdutor de pressão. A leitura de pressão do transdutor foi, então, relacionada à leitura de tensão da SETRA (Figura 4.19) sendo, finalmente, obtida a relação entre pressão e velocidade no Venturi (Figura 4.20).

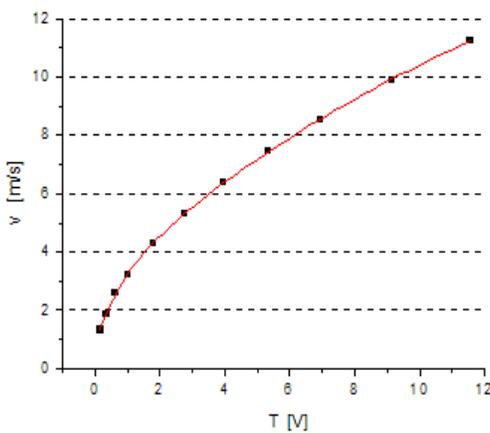


Figura 4.18: Calibração da SETRA

A equação correspondente à curva da Figura 4.18 é:

$$V = y_0 + A_1 \left(1 - e^{-\frac{x}{t_1}} \right) + A_2 \left(1 - e^{-\frac{x}{t_2}} \right) \quad \text{Eq. 4.13}$$

Sendo:

V	Velocidade do ar (m/s)
x	Tensão (V)
y ₀	Constante (0,77838)
A ₁	Constante (16,29348)
t ₁	Constante (15,71325)
A ₂	Constante (1,95665)
t ₂	Constante (0,73431)

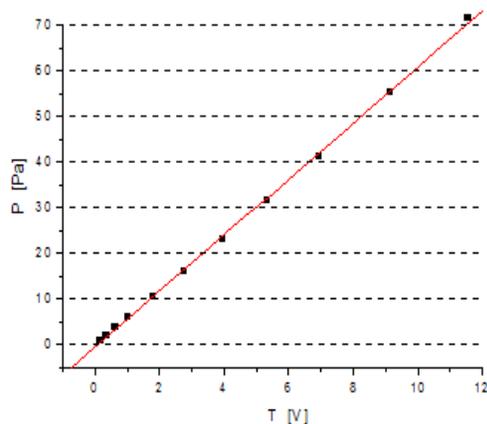


Figura 4.19: Relação entre SETRA e transdutor de pressão

A equação correspondente à curva da Figura 4.19 é:

$$P = A_1 \cdot x - A_2 \quad \text{Eq. 4.14}$$

Sendo:

P	Pressão (Pa)
A_1	Constante (6,1153)
x	Tensão (V)
A_2	Constante (0,4483)

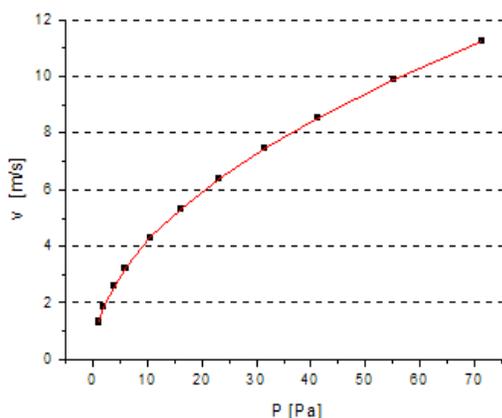


Figura 4.20: Obtenção de velocidade através do transdutor de pressão

A equação correspondente à curva da Figura 4.20 é:

$$V = y_0 + A_1 \left(1 - e^{-\frac{x}{t_1}}\right) + A_2 \left(1 - e^{-\frac{x}{t_2}}\right) \quad \text{Eq. 4.15}$$

Sendo:

V	Velocidade do ar (m/s)
x	Pressão (Pa)
y_0	Constante (0,78642)
A_1	Constante (14,14308)
t_1	Constante (77,72855)
A_2	Constante (1,93789)
t_2	Constante (4,54611)

Após a calibração do tubo de Pitot, foram realizados dois conjuntos de ensaios, o primeiro com vento e o segundo sem vento, ambos com fluxo de ar variável no interior da chaminé. Foi utilizado um variador de frequência no ventilador conectado ao pleno, de modo que a velocidade no interior da chaminé variasse, aproximadamente, entre 0 e 6m/s, o que corresponde a um intervalo entre 150 e 1000rpm. A velocidade no interior da chaminé pôde ser calculada através do conjunto de curvas de calibração da célula de pressão (Equações 4.13 a 4.15). Para esses ensaios, foi inserida uma nova tomada de pressão próxima à abertura de saída do ar da chaminé, composta por um tubo de Pitot para monitoramento das pressões total (P_t) e estática (P_e) (Figura 4.21).

A última etapa, após realização dos ensaios, consistiu na aplicação da equação de Bernoulli (Equação 4.1) para determinação da perda de pressão nos dois trechos da chaminé pré-estabelecidos (Figura 4.13) e na determinação da perda de carga e do coeficiente de perda de carga, através das Equações 4.2 e 4.3. Por fim, foi calculado o coeficiente de descarga correspondente, através da Equação 4.6.

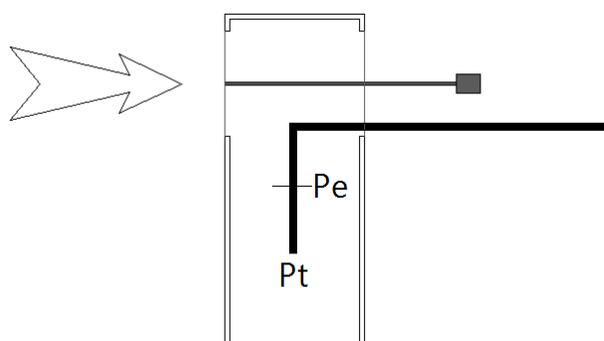


Figura 4.21: Tomadas de pressão na saída da chaminé

4.3 Resultados obtidos nos ensaios em túnel de vento

4.3.1 Resultados de coeficientes de pressão

Os ensaios para obtenção dos coeficientes de pressão nas aberturas de entrada e saída do ar foram realizados com e sem a barreira existente próximo à célula de teste. Foram mantidos ligados dois ventiladores do túnel de vento ($V \approx 6\text{m/s}$), de forma a garantir fluxo turbulento no interior da câmara. Os resultados são apresentados na Tabela 4.1. A Figura 4.22 mostra o posicionamento das aberturas de entrada e saída do ar, sendo o vento a 180° incidente diretamente sobre a abertura de entrada do ar do ambiente.

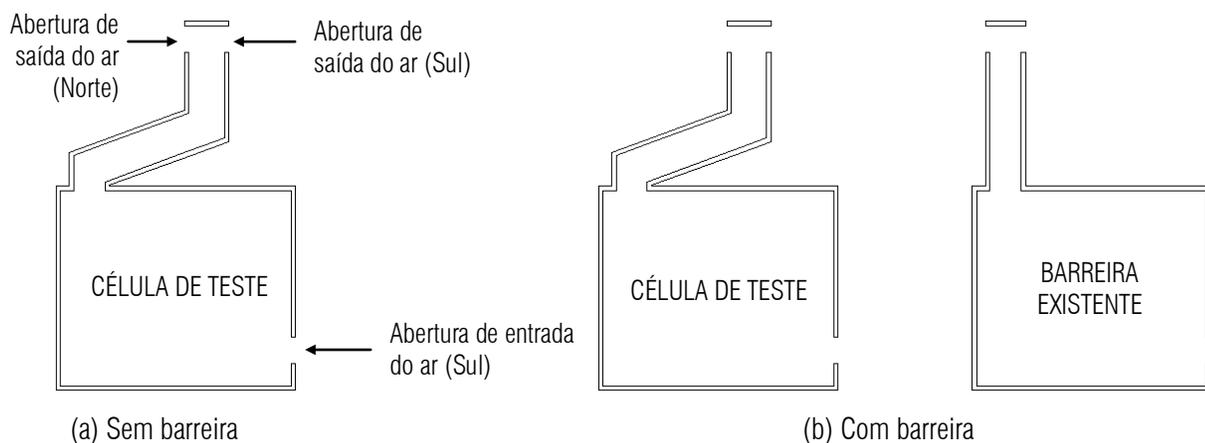


Figura 4.22: Posicionamento das aberturas de entrada e saída do ar

Tabela 4.1: Coeficientes de pressão (C_p) – sem barreira e com barreira

Direção do vento	Sem barreira				Com barreira			
	Abertura de entrada do ar	Aberturas de saída do ar		ΔC_p	Abertura de entrada do ar	Aberturas de saída do ar		ΔC_p
	C_p	C_p (Sul)	C_p (Norte)		C_p	C_p (Sul)	C_p (Norte)	
0°	-0,19	-0,67	0,93	1,12	-0,03	-0,48	0,67	0,70
45°	-0,11	-0,50	0,71	0,82	-0,14	-0,37	0,71	0,85
90°	-0,09	-0,02	-0,02	0,07	-0,38	-0,14	-0,14	0,52
120°	0,60	0,61	-0,30	0,90	0,22	1,07	-0,17	0,39
150°	0,31	1,12	-0,29	0,60	0,39	0,66	-0,36	0,75
180°	0,71	0,77	-0,59	1,30	0,24	0,39	-0,30	0,54

Pelos resultados, pode-se notar que a diferença de pressão entre as aberturas de entrada e saída do ar é maior no caso sem barreira, sendo esta situação mais vantajosa para a ventilação por ação dos ventos. No entanto, quando a incidência do vento é contrária à abertura de entrada do ar (direção 0°) a existência da barreira altera o comportamento do vento, devido à recirculação do ar próximo à abertura. Isso auxilia na redução de probabilidade de ocorrência de fluxo reverso na chaminé, já que o coeficiente de pressão na abertura de entrada do ar é próximo a zero (-0,03), sendo a diferença de pressão entre entrada e saída menor do que se não houvesse a barreira.

Os ensaios em túnel de vento permitiram concluir que o fluxo de ar no interior da chaminé apresenta ora regime laminar, ora turbulento, ora um regime de transição. Isso inviabiliza a realização de uma análise conjunta de diferentes configurações geométricas de chaminés solares, pois não há uma linearidade nos resultados que possibilite o desenvolvimento de conclusões que possam ser generalizadas. Para fluxo laminar, qualquer variação no número de Reynolds resulta na variação das características do escoamento e das pressões estáticas. Por isso, dependendo das características do fluxo de ar que passa pela chaminé, haverá um comportamento diferente frente ao vento. Sendo assim, os ensaios em túnel de vento foram direcionados a uma análise detalhada apenas da geometria adotada na célula de teste.

Em vista disso, as análises de desempenho subsequentes, abordando diferentes configurações geométricas da chaminé solar – incluindo alterações em comprimento, espessura do canal e ângulo de inclinação do coletor – serão realizadas considerando somente o fluxo de ar por efeito chaminé, sem incorporar uma análise da interferência do vento. O efeito da componente eólica sobre o desempenho da chaminé será analisado especificamente para a configuração geométrica adotada na célula de teste experimental.

4.3.2 Resultados de coeficientes de perda de carga e coeficientes de descarga

Os ensaios para determinação dos coeficientes de perda de carga foram realizados para as situações sem vento e com vento de aproximadamente 3m/s e 6m/s. A situação sem vento permitiu determinar a perda de carga do modelo em função do efeito chaminé isoladamente, as situações com vento permitiram determinar a perda de carga em função do efeito chaminé aliado à ação dos ventos e a diferença entre ambos permitiu determinar a perda de carga por ação dos ventos isoladamente. Para todos os casos, houve variação da velocidade do ar no interior da chaminé.

O primeiro conjunto de ensaios correspondeu à situação sem vento. Através dos resultados obtidos nos ensaios, calculou-se a perda de pressão (ΔP_h) do trecho correspondente à abertura da entrada de ar até o

final do duto da chaminé (trecho 1, Figura 4.13), sendo então calculados, para cada ensaio, o coeficiente de perda de carga (ζ) e o número de Reynolds (Re) correspondentes (Tabela 4.2). A partir desses dados, foi elaborado um gráfico do coeficiente de perda de carga em função do número de Reynolds (Figura 4.23), de forma a verificar se o intervalo de ensaios realizado era suficiente para estabilizar o resultado. Estando estabilizado, foi elaborado um gráfico para o cálculo do coeficiente de perda de carga, que corresponde ao coeficiente angular da reta (Figura 4.24). O coeficiente de perda de carga da instalação, considerando o efeito chaminé isoladamente, resultou em 1,19. O coeficiente de descarga correspondente resultou em 0,92.

Tabela 4.2: Resultados dos ensaios de perda de carga – sem vento

Ensaio	$V_{Venturi}$ (m/s)	$V_{chaminé}$ (m/s)	ΔPh (Pa)	Δh (mca)	$V^2/2g$	ζ	Re
150rpm	2,07	0,96	-5,367	-0,464	0,047	-9,94	7292
249rpm	2,56	1,44	-4,540	-0,393	0,106	-3,69	11008
300rpm	2,97	1,68	-3,836	-0,332	0,144	-2,30	12809
345rpm	3,29	1,90	-3,379	-0,292	0,184	-1,59	14461
405rpm	3,89	2,26	-2,356	-0,204	0,260	-0,78	17201
474rpm	4,53	2,60	-1,191	-0,103	0,344	-0,30	19790
537rpm	5,21	2,87	0,227	0,020	0,420	0,05	21861
600rpm	5,89	3,21	1,655	0,143	0,526	0,27	24470
654rpm	6,50	3,51	3,183	0,275	0,628	0,44	26736
705rpm	6,96	3,76	4,180	0,362	0,722	0,50	28679
765rpm	7,70	4,09	5,993	0,518	0,854	0,61	31191
828rpm	8,43	4,42	7,706	0,667	0,996	0,67	33674
888rpm	8,99	4,73	9,224	0,798	1,141	0,70	36039
930rpm	9,36	4,82	10,891	0,942	1,184	0,80	36712
1023rpm	10,12	5,30	13,726	1,188	1,433	0,83	40397

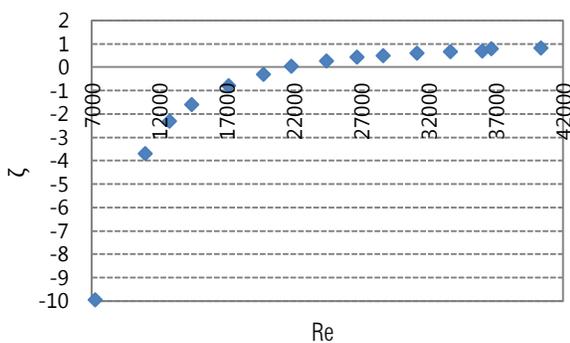


Figura 4.23: Coeficiente de perda de carga x número de Reynolds

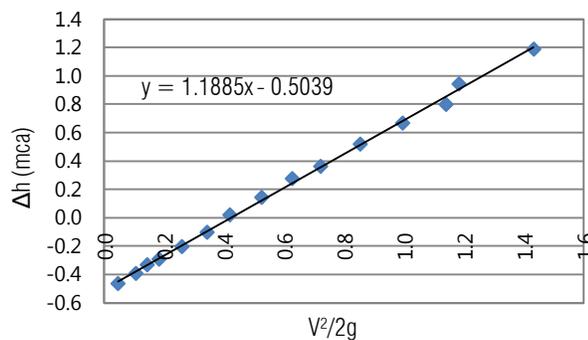


Figura 4.24: Perda de carga x velocidade do ar ($\zeta=1,19$)

O mesmo procedimento foi utilizado para determinação da perda de carga da situação com vento. Foi calculada a perda de carga do trecho correspondente à abertura da entrada de ar até o final do duto da chaminé (trecho 1) e do final do duto da chaminé até a abertura de saída do ar (trecho 2, Figura 4.13). Para o segundo trecho, foi adotada uma velocidade igual a zero no ponto logo após a saída da chaminé, pois o fluxo

de ar turbulento nesse ponto impediu a realização de um monitoramento adequado das pressões total e estática. Os resultados apresentam-se nas Tabelas 4.3, para $V \approx 3\text{m/s}$, e 4.4, para $V \approx 6\text{m/s}$.

Tabela 4.3: Resultados dos ensaios de perda de carga – vento $\approx 3\text{m/s}$

Direção do vento	Trecho 01							Trecho 02			
	$V_{\text{túnel}}$ (m/s)	V_{Venturi} (m/s)	ΔPh (Pa)	Δh (mca)	$V^2/2g$	ζ	Re	ΔPh (Pa)	Δh (mca)	$V^2/2g$	ζ
0°	3.25	1.99	-5.50	-0.48	0.05	-9.63	7498	5.05	0.44	0.05	8.85
	3.09	4.53	-1.02	-0.09	0.38	-0.23	20872	12.04	1.04	0.38	2.72
	3.21	5.53	0.92	0.08	0.53	0.15	24482	14.43	1.25	0.53	2.37
	3.17	7.14	4.35	0.38	0.79	0.48	29936	18.15	1.57	0.79	2.00
	3.13	8.70	8.53	0.74	1.10	0.67	35372	23.13	2.00	1.10	1.82
	3.15	9.99	12.95	1.12	1.43	0.78	40388	28.29	2.45	1.43	1.71
45°	3.29	4.57	-1.07	-0.09	0.33	-0.28	19374	10.79	0.93	0.33	2.83
	3.35	5.61	0.99	0.09	0.46	0.19	22876	12.81	1.11	0.46	2.41
	3.4	7.16	4.38	0.38	0.68	0.56	27827	16.82	1.46	0.68	2.14
	3.37	8.66	8.38	0.73	0.95	0.76	32895	21.15	1.83	0.95	1.93
	3.34	9.94	12.80	1.11	1.25	0.88	37768	26.41	2.28	1.25	1.82
90°	3.32	4.74	-1.32	-0.11	0.39	-0.29	21205	2.20	0.19	0.39	0.48
	3.15	5.77	0.44	0.04	0.57	0.07	25480	3.33	0.29	0.57	0.51
	3.23	7.22	3.52	0.30	0.85	0.36	31060	5.29	0.46	0.85	0.54
	3.23	8.62	6.64	0.57	1.14	0.50	36067	7.70	0.67	1.14	0.58
	3.09	9.86	10.56	0.91	1.47	0.62	40842	9.95	0.86	1.47	0.59
120°	3.29	4.79	-0.99	-0.09	0.34	-0.25	19799	8.25	0.71	0.34	2.07
	3.29	5.79	0.86	0.07	0.48	0.15	23467	11.21	0.97	0.48	2.01
	3.28	7.34	4.47	0.39	0.69	0.56	28045	15.79	1.37	0.69	1.98
	3.23	8.86	8.24	0.71	0.97	0.73	33262	21.17	1.83	0.97	1.89
	3.16	10.11	12.99	1.12	1.25	0.90	37738	27.06	2.34	1.25	1.87
150°	3.17	4.71	-2.09	-0.18	0.40	-0.45	21464	14.42	1.25	0.40	3.08
	3.21	5.72	-0.45	-0.04	0.56	-0.07	25333	14.14	1.22	0.56	2.17
	3.25	7.35	2.29	0.20	0.85	0.23	31191	19.55	1.69	0.85	1.98
	3.27	8.87	5.38	0.47	1.19	0.39	36846	25.95	2.25	1.19	1.88
	3.23	10.16	9.08	0.79	1.59	0.49	42541	32.69	2.83	1.59	1.78
180°	3.07	4.66	-1.04	-0.09	0.35	-0.26	19927	10.49	0.91	0.35	2.60
	3.16	5.71	0.85	0.07	0.49	0.15	23573	13.12	1.14	0.49	2.33
	3.15	7.33	4.15	0.36	0.72	0.50	28624	17.60	1.52	0.72	2.12
	3.13	8.89	8.11	0.70	0.99	0.71	33607	22.37	1.94	0.99	1.95
	3.17	10.18	12.56	1.09	1.29	0.84	38314	27.33	2.36	1.29	1.83

Tabela 4.4: Resultados dos ensaios de perda de carga – vento $\approx 6\text{m/s}$

Direção do vento	Trecho 01							Trecho 02			
	$V_{\text{túnel}}$ (m/s)	V_{Venturi} (m/s)	ΔPh (Pa)	Δh (mca)	$V^2/2g$	ζ	Re	ΔPh (Pa)	Δh (mca)	$V^2/2g$	ζ
0°	6.6	3.67	-3.51	-0.30	0.26	-1.15	17342	24.42	2.11	0.26	8.00
	6.62	5.18	0.30	0.03	0.59	0.04	25911	34.61	2.99	0.59	5.08
	6.63	6.06	2.28	0.20	0.72	0.28	28568	37.53	3.25	0.72	4.53
	6.54	7.58	5.72	0.50	0.98	0.51	33380	42.53	3.68	0.98	3.76
	6.54	9.02	9.83	0.85	1.27	0.67	38008	45.81	3.96	1.27	3.12
	6.53	10.25	14.44	1.25	1.62	0.77	42993	51.45	4.45	1.62	2.74
45°	6.91	5.53	1.02	0.09	0.49	0.18	23699	31.86	2.76	0.49	5.59
	6.9	6.43	3.03	0.26	0.61	0.43	26282	33.50	2.90	0.61	4.78
	6.99	7.81	6.56	0.57	0.80	0.71	30102	37.79	3.27	0.80	4.11
	6.93	9.18	10.64	0.92	1.06	0.87	34680	43.13	3.73	1.06	3.53
	6.99	10.30	15.19	1.31	1.33	0.99	38898	46.98	4.07	1.33	3.06
90°	6.71	6.29	1.60	0.14	0.67	0.21	27596	2.04	0.18	0.67	0.26
	6.67	7.17	3.19	0.28	0.83	0.33	30802	3.22	0.28	0.83	0.33
	6.75	8.30	6.21	0.54	1.07	0.50	34849	5.19	0.45	1.07	0.42
	6.54	9.62	9.46	0.82	1.42	0.58	40216	7.21	0.62	1.42	0.44
	6.8	10.46	12.92	1.12	1.75	0.64	44693	10.28	0.89	1.75	0.51
120°	6.93	5.94	1.32	0.11	0.51	0.22	24142	17.47	1.51	0.51	2.95
	6.99	6.81	3.16	0.27	0.62	0.44	26642	18.92	1.64	0.62	2.63
	6.94	8.20	6.80	0.59	0.84	0.70	30897	23.99	2.08	0.84	2.48
	6.93	9.51	10.84	0.94	1.09	0.86	35237	28.11	2.43	1.09	2.23
	6.93	10.56	15.50	1.34	1.38	0.98	39577	34.58	2.99	1.38	2.18
150°	6.82	5.64	-0.77	-0.07	0.59	-0.11	26009	29.46	2.55	0.59	4.29
	6.86	6.53	0.83	0.07	0.73	0.10	28898	32.10	2.78	0.73	3.79
	6.86	8.03	3.43	0.30	1.02	0.29	34132	36.97	3.20	1.02	3.13
	6.85	9.41	6.68	0.58	1.35	0.43	39172	43.38	3.75	1.35	2.79
	6.85	10.52	10.14	0.88	1.75	0.50	44575	50.05	4.33	1.75	2.48
180°	6.53	5.50	0.27	0.02	0.54	0.04	24802	29.75	2.57	0.54	4.76
	6.53	6.37	1.81	0.16	0.67	0.23	27709	33.19	2.87	0.67	4.26
	6.49	8.00	5.30	0.46	0.94	0.49	32744	37.38	3.23	0.94	3.43
	6.54	9.45	9.26	0.80	1.22	0.66	37224	40.60	3.51	1.22	2.89
	6.52	10.55	13.36	1.16	1.53	0.75	41781	45.60	3.95	1.53	2.57

As Figuras 4.25 e 4.26 apresentam os gráficos do cálculo do coeficiente de perda de carga para os trechos 1 e 2, para todas as direções de vento ensaiadas. Para o trecho 2, foram considerados apenas os resultados obtidos com o vento a 3m/s (Tabela 4.3), pois a turbulência ocasionada pelo vento a 6m/s interferiu no monitoramento e inviabilizou o uso dos resultados. O coeficiente angular da reta corresponde ao coeficiente de perda de carga da instalação, considerando o efeito chaminé aliado à ação dos ventos.

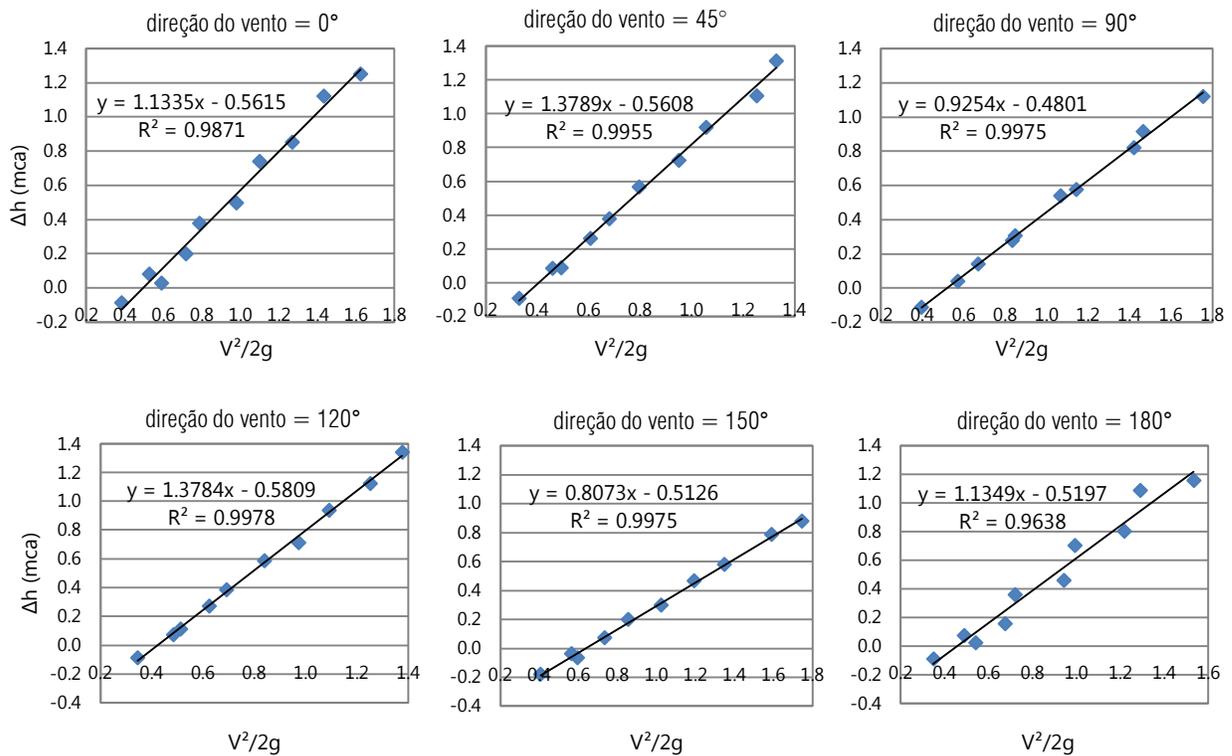


Figura 4.25: Gráficos para cálculo do coeficiente de perda de carga – trecho 1

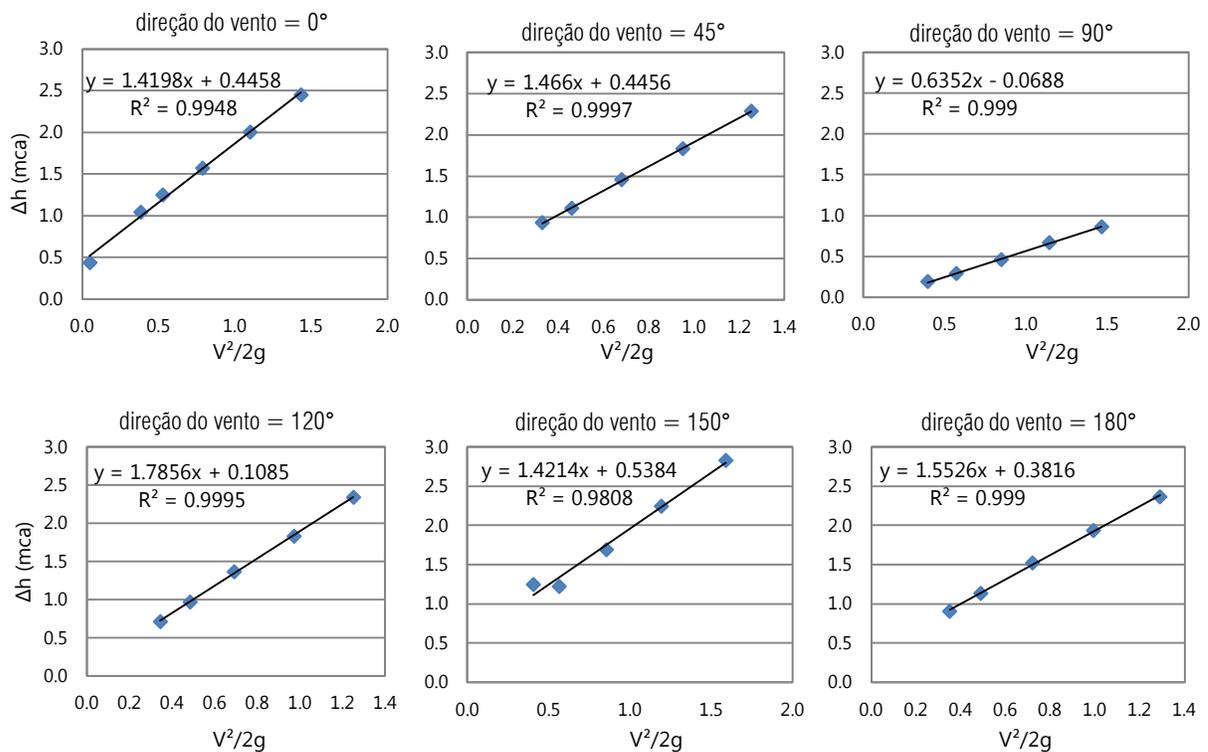


Figura 4.26: Gráficos para cálculo do coeficiente de perda de carga – trecho 2

Apresenta-se, na Figura 4.27, um resumo dos coeficientes de perda de carga encontrados, por direção do vento e por trecho (trecho 1 - abertura de entrada de ar até o fim do canal da chaminé e trecho 2 - fim do canal da chaminé até a abertura de saída do ar). Apresentam-se também os coeficientes de descarga correspondentes ao trecho todo (trechos 1 e 2 somados). A diferença entre os resultados dos ensaios com e sem vento determinam a perda de carga por ação dos ventos isoladamente, apresentados na Figura 4.28.

Pode-se observar que a menor perda de carga ocorreu para a direção de 90°, pois o vento incide paralelamente às aberturas de entrada e saída do ar, criando uma região de subpressão ao seu redor. Esse resultado destaca a vantagem do uso da chaminé solar em sítios onde não há a interferência da ação dos ventos, na medida em que, nessas situações, o sistema sofre menos resistências por ação do atrito e da turbulência. Houve também uma perda de carga reduzida para incidência do vento a 150°, sendo esta também a direção de vento mais favorável à ventilação por ação dos ventos na célula de teste do experimento. Esse resultado destaca também a importância do posicionamento adequado da saída de ar chaminé, de forma que aproveite melhor o vento.

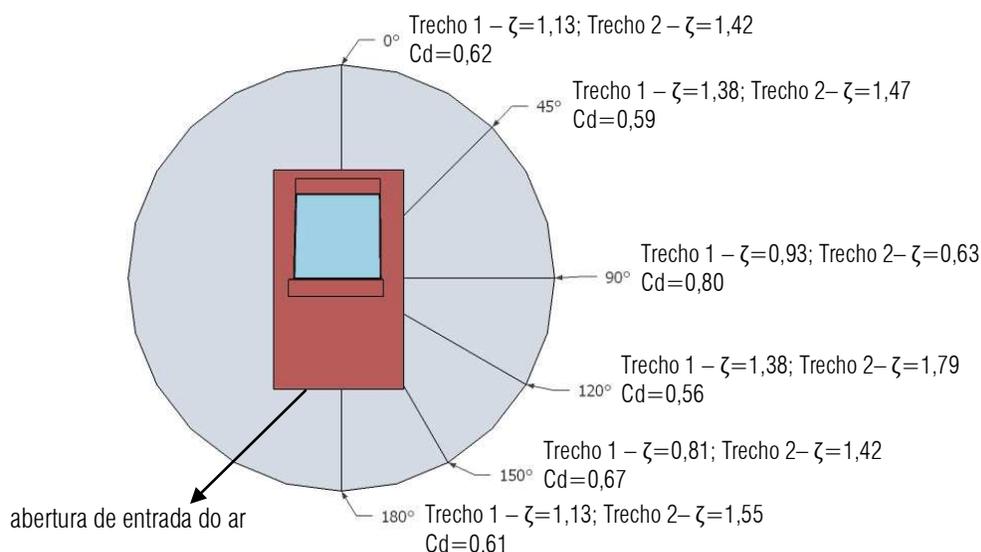


Figura 4.27: Coeficientes de perda de carga e coeficientes de descarga, por direção do vento

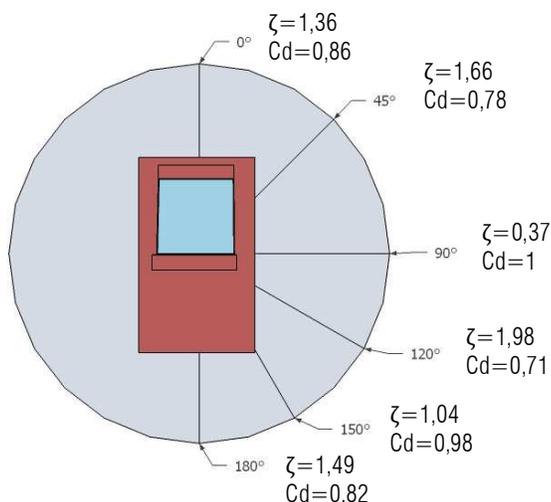


Figura 4.28: Coeficientes de perda de carga por ação dos ventos isoladamente

Uma possível desvantagem do uso de coletores solares com inclinação mais próxima à horizontal estaria no aumento da perda de carga da instalação, pois o uso de curvas mais acentuadas pode ocasionar um aumento na resistência ao escoamento. No entanto, pelos resultados apresentados nas Figuras 4.27 e 4.28, pode-se observar que grande parte da perda de carga da instalação ocorre por ação dos ventos e próximo à abertura de saída do ar, sendo a perda de carga no trecho do canal da chaminé menos significativa. Esse resultado é um indício de que o uso de um ângulo de inclinação mais próximo à horizontal pode efetivamente melhorar o desempenho da chaminé solar, desde que haja um ganho significativo na irradiância solar. Uma investigação mais detalhada sobre esse assunto se dará na análise paramétrica, apresentada no capítulo 6.

5. CALIBRAÇÃO DE MODELOS TEÓRICOS

5.1 Estudos teóricos sobre chaminés solares: revisão bibliográfica

Diversos estudos teóricos para a predição do desempenho de chaminés solares vêm sendo desenvolvidos, especialmente a partir da década de 1990 (vide Tabela 2.3). Nesses estudos, são considerados os processos de transferência de calor dentro da chaminé, por condução, convecção e radiação, e os fenômenos de conservação e transporte de massa e energia.

Há uma contribuição significativa de pesquisas baseadas no desenvolvimento ou adaptação de modelos analíticos, de forma a prever o fluxo de ar proporcionado pelo sistema. Esses modelos baseiam-se em hipóteses simplificadas dos fenômenos físicos que ocorrem em uma chaminé solar. Tais hipóteses são necessárias, devido à altíssima complexidade existente no fenômeno real, sendo tolerável, portanto, certo grau de desvio nos resultados obtidos. De acordo com Adam (2003), é usual obter diferenças de até 20% entre dados medidos e calculados.

Os modelos analíticos são constituídos, basicamente, por equações de balanço de energia e de cálculo de vazão. Os métodos de resolução do conjunto de equações são variados, sendo o método de diferenças finitas o mais popular. Uma das principais limitações desses modelos é a impossibilidade de observação do fenômeno de fluxo reverso que pode ocorrer no interior da chaminé (BAHARVAND, 2010).

Os estudos teóricos também podem ser realizados através de programas de simulação computacional específicos, que possuam seus próprios modelos de cálculo. Atualmente, existem três modelos de simulação computacional, com diferentes níveis de complexidade (BAHARVAND, 2010):

- *Building energy simulation* (BES): baseia-se em valores pré-estimados para o fluxo de ar.
- *AirflowNetwork* (AFN): baseia-se no balanço de massas da zona e nas relações de pressão interzonas.
- *Computational Fluid Dynamics* ou Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD): baseia-se nos princípios de conservação de massa, momento e energia de minúsculas células que compõem o domínio.

A utilização de programas de simulação para análise de desempenho de chaminés solares é uma prática menos comum na literatura especializada, se comparada ao desenvolvimento e aplicação direta de modelos matemáticos. Grande parte das pesquisas que abordam esta metodologia fazem uso de programas CFD.

Ahmad, Saleh e Hong (2006), por exemplo, utilizaram o programa Flovent para estimar a velocidade do ar dentro de uma chaminé solar projetada pelos autores; Bassiouny e Korah (2009) utilizaram o Ansys CFX para estudar o padrão do fluxo de ar interno de uma chaminé solar inclinada; Harris e Helwig (2007) usaram o Phoenix para avaliar as características do fluxo de ar no projeto de uma chaminé solar; Sakonidou et al (2008) usaram o Fluent para fazer comparações com os resultados de um modelo matemático, quanto à transferência de calor e à mecânica dos fluidos.

Lee e Strand (2009) utilizaram um programa AFN chamado EnergyPlus para estudo da chaminé solar. Os autores desenvolveram e implementaram um novo módulo no programa para simulação de chaminés solares,

e utilizaram os dados experimentais de Hirunlabh et al (1999) para validar a simulação.

Os resultados obtidos através do uso de modelos teóricos incluem dados de temperatura e velocidade do ar no canal da chaminé e temperaturas superficiais do vidro e do absorvedor. Para aplicação prática, a informação mais importante é o fluxo de ar resultante, pois determina o poder de ventilação de uma chaminé solar em um edifício.

5.1.1 Apresentação de um modelo teórico

Um dos primeiros modelos teóricos para predição de desempenho de chaminés solares foi publicado por Bansal, Mathur e Bhandari (1993). Os autores desenvolveram um modelo matemático em regime térmico estacionário, com o objetivo de verificar se o uso de uma chaminé solar poderia realmente incrementar a ventilação natural em edificações. O modelo considera a possibilidade de inclinação do coletor, diferentes tamanhos de abertura de entrada do ar na chaminé e valores variados de coeficiente de descarga. É composto por duas equações para cálculo de vazão e duas de balanço de energia para cálculo de temperatura.

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

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

Para prover um entendimento básico das propriedades de energia e transferência de massa em uma chaminé solar, um modelo matemático simples, bastante referenciado na literatura especializada, é apresentado aqui (MATHUR, MATHUR e ANUPMA, 2006; e BASSIOUNY e KORAH, 2009). O modelo é composto por equações de balanço de energia para o vidro, o ar no canal e a placa absorvedora, sendo três as variáveis desconhecidas no sistema de equações: temperaturas superficiais médias do vidro (T_v) e da placa absorvedora (T_p) e temperatura média do ar no canal da chaminé (T_c) (Equações 5.1 a 5.3).

- Equação do balanço de energia no vidro:

$$[I \cdot \alpha_v \cdot A_v] + [h_{rpv} \cdot A_p(T_p - T_v)] = [h_v \cdot A_v(T_v - T_c)] + [U_t \cdot A_v(T_v - T_e)] \quad \text{Eq. 5.1}$$

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

$$[h_p \cdot A_p(T_p - T_c)] + [h_v \cdot A_v(T_v - T_c)] = q'' \quad \text{Eq. 5.2}$$

- Equação do balanço de energia na placa absorvedora:

$$[I \cdot \alpha_p \cdot \tau_v \cdot A_p] = [h_p \cdot A_p (T_p - T_c)] + [h_{rpv} \cdot A_p (T_p - T_v)] + [U_b \cdot A_p (T_p - T_i)] \quad \text{Eq. 5.3}$$

Sendo:

I	Irradiância solar no plano do vidro (W/m ²)
α_v	Absortância solar do vidro (adimensional)
A _v	Área do vidro (m ²)
h _{rpv}	Coefficiente de transferência de calor por radiação entre o vidro e a placa absorvedora (W/(m ² .K))
A _p	Área da placa absorvedora (m ²)
T _p	Temperatura média da placa absorvedora (K)
T _v	Temperatura média do vidro (K)
h _v	Coefficiente de transferência de calor por convecção entre o vidro e o ar no canal (W/(m ² .K))
T _c	Temperatura média do ar no canal (K)
U _t	Coefficiente global de perda de calor do vidro para o ambiente externo (W/(m ² .K))
T _e	Temperatura do ar externo (K)
q"	Fluxo de calor no canal da chaminé (W)
h _p	Coefficiente de transferência de calor por convecção entre a placa absorvedora e o ar no canal (W/(m ² .K))
T _i	Temperatura média do ar no ambiente interno ventilado pela chaminé (K)
α_p	Absortância da placa absorvedora (adimensional)
τ_v	Transmitância ótica do vidro (adimensional)
U _b	Coefficiente global de transferência de calor da placa absorvedora (W/(m ² .K))

Para possibilitar a resolução do modelo matemático, os autores adotam as seguintes hipóteses: o ar é considerado incompressível, em fluxo laminar e sob regime estacionário; as trocas de energia entre o vidro, o ar e a placa absorvedora são tratadas como unidimensionais; a temperatura do ar na entrada do canal é considerada a mesma do ambiente interno; todas as propriedades físicas do fluido que constitui a película são avaliadas a uma temperatura média entre o fluido e a superfície mais próxima.

Para resolução do modelo, as equações de balanço de energia são reformuladas em uma matriz, de forma a isolar as variáveis T_v, T_c e T_p (Equação 5.4). O processo é resolvido de forma iterativa, até atingir estabilidade nos resultados.

$$\begin{bmatrix} a1 & b1 & c1 \\ a2 & b2 & c2 \\ a3 & b3 & c3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_v \\ T_c \\ T_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R1 \\ R2 \\ R3 \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 5.4}$$

Sendo:

$$\begin{aligned} a1 &= h_{rpv} \cdot A_p + h_v \cdot A_v + U_t \cdot A_v \\ b1 &= -h_v \cdot A_v \\ c1 &= -h_{rpv} \cdot A_p \\ a2 &= h_v \cdot A_v \\ b2 &= -(h_v \cdot A_v + h_p \cdot A_p + q'') \\ c2 &= h_p \cdot A_p \\ a3 &= -h_{rpv} \cdot A_p \\ b3 &= -h_p \cdot A_p \\ c3 &= h_{rpv} \cdot A_p + h_p \cdot A_p + U_b \cdot A_p \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R1 &= I. \alpha_v. A_v + U_t. A_v. T_e \\ R2 &= -q'' \cdot T_i \\ R3 &= I. \alpha_p. \tau_p. A_p + U_b. A_p. T_i \end{aligned}$$

O coeficiente de transferência de calor por radiação entre a placa absorvedora e o vidro (hrpv) pode ser calculado conforme a Equação 5.5, para cavidades com planos paralelos (DUFFIE e BECKMAN, 1991; HOLMAN, 2002; INCROPERA e DEWITT, 1992).

$$hrpv = \frac{\sigma(T_p^2 + T_v^2)(T_p + T_v)}{\left(\frac{1 - \epsilon_v}{\epsilon_v}\right) \left(\frac{1 - \epsilon_p}{\epsilon_p}\right) \left(\frac{1}{F_{pv}}\right)} \quad \text{Eq. 5.5}$$

Onde:

σ	Constante de Steffan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$)
ϵ_g	Emissividade da face externa do vidro (adimensional)
ϵ_p	Emissividade da placa absorvedora (adimensional)
F_{pv}	Fator de forma entre o vidro e a placa absorvedora (para planos paralelos é considerado 1)

O coeficiente global de transferência de calor da placa absorvedora (U_b) representa as perdas de calor do sistema para o entorno próximo, incluindo o fluxo de calor através do isolante térmico e as resistências por convecção e radiação para o ambiente. De acordo com Duffie e Beckman (1991), as magnitudes das resistências por convecção e radiação são tais que usualmente é possível assumir que seu valor é igual a zero, sendo que toda a resistência ao fluxo de calor é dada pelo isolamento térmico. Em vista disso, o coeficiente U_b passaria a representar a transferência de calor por condução do material, sendo definido por:

$$U_b = \frac{k_{is}}{\Delta is} \quad \text{Eq. 5.6}$$

Onde:

k_{is}	Condutividade térmica do isolante térmico ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)
Δis	Espessura do isolamento térmico (m)

Os coeficientes de transferência de calor por convecção (h_v e h_p), o coeficiente global de perda de calor do vidro para o ambiente externo (U_t) e o fluxo térmico do ar no canal (q'') são variáveis cujo cálculo pode ser realizado através de diferentes modelos (MATHUR, MATHUR e ANUPMA, 2006; SAKONIDOU et al, 2008; BASSIOUNY e KORAH, 2009). Algumas equações para cálculo desses coeficientes são apresentadas a seguir.

5.1.2 Coeficientes de transferência de calor por convecção (h_v e h_p)

A ascensão do ar no canal de uma chaminé decorre do fenômeno de convecção livre ou natural, originário de gradientes de densidade que, para o caso de chaminés solares, se devem a um gradiente de temperatura (INCROPERA e DEWITT, 1992). Em chaminés inclinadas, as forças de empuxo terão uma componente normal e outra paralela à superfície da placa. Com a redução do empuxo na direção paralela à superfície, haverá redução das velocidades do fluido ao longo da placa e uma correspondente redução na transferência convectiva de calor (Figura 5.1). Os fluxos de calor através do canal inclinado se exprimem por (INCROPERA e DEWITT, 1992):

$$q'' = h(T_1 - T_2) \quad \text{Eq. 5.7}$$

Sendo:

q''	Fluxo de calor através do canal (W/m^2)
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)
T_1	Temperatura da superfície quente (equivalente a T_p na chaminé solar) (K)
T_2	Temperatura da superfície fria (equivalente a T_v na chaminé solar) (K)

Tais fluxos dependem da razão de aspecto da espessura do canal sobre o comprimento do coletor (e/C) e do valor da inclinação do coletor em relação à horizontal (θ).

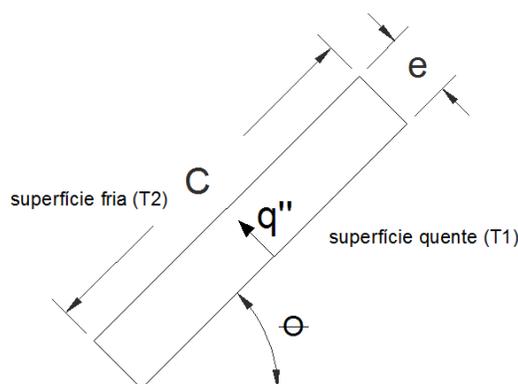


Figura 5.1: Convecção livre em um canal inclinado (adaptado de INCROPERA e DEWITT, 1992)

Alguns parâmetros adimensionais governam o escoamento e a transferência de calor na convecção livre. São eles (INCROPERA e DEWITT, 1992):

- Número de Grashof (Gr): é a razão entre o empuxo (flutuabilidade) e as forças viscosas, na camada limite cinética. Seu papel, na convecção livre, é muito semelhante ao do número de Reynolds (Re), na convecção forçada (Equação 5.8).

$$Gr = \frac{g \cdot \beta (T_{sup} - T_e) C^3}{\nu^2} \quad \text{Eq. 5.8}$$

Sendo:

g	Aceleração da gravidade ($9,807 \text{m}/\text{s}^2$)
β	Coefficiente de expansão volumétrica ($1/\text{K}$)
T_{sup}	Temperatura superficial (K)
C	Comprimento característico (m)
ν	Viscosidade cinemática (m^2/s)

- Número de Prandtl (Pr): é a razão entre difusividade de momento (viscosidade cinemática) e difusividade térmica. Proporciona uma medida da eficiência relativa do transporte de momento e do transporte de energia, por difusão, nas camadas limites cinética e térmica. Seu valor influencia a espessura relativa das camadas limites cinética e térmica (Equação 5.9).

$$\text{Pr} = \frac{\mu \cdot c}{k} = \frac{\nu}{\alpha} \quad \text{Eq. 5.9}$$

Sendo:

μ	Viscosidade dinâmica (Pa.s)
c	Calor específico do fluido (J/(kg.K))
k	Condutividade térmica do fluido (W/(m.K))
α	Difusividade térmica (m ² /s)

- Número de Rayleigh (Ra): é a medida do balanço entre as forças que promovem a convecção e as que se lhe opõem (fricção devido à viscosidade e à difusão térmica). A transição entre o escoamento laminar e o turbulento na camada limite da convecção livre depende da relação entre as forças de empuxo e as forças viscosas no fluido. Correlaciona-se sua ocorrência com o número de Rayleigh, que é o produto entre os números de Grashof e de Prandtl (Equação 5.10).

$$\text{Ra} = \text{Gr} \cdot \text{Pr} = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{\text{sup}} - T_e) \cdot C^3}{\nu \cdot \alpha} \quad \text{Eq. 5.10}$$

- Número de Nusselt (Nu): representa o gradiente adimensional de temperatura numa superfície, pois proporciona uma medida da transferência convectiva de calor na superfície. É a grandeza utilizada para determinação da transferência de calor por convecção (Equação 5.11).

$$\text{Nu} = \frac{h \cdot C}{k} \quad \text{Eq. 5.11}$$

Esses parâmetros adimensionais são utilizados para o cálculo dos coeficientes de troca de calor por convecção (h_v e h_p). No caso de convecção livre e quando os efeitos da convecção forçada podem ser desprezados (quando a condição $(\text{Gr}/\text{Re}^2) \gg 1$ for satisfeita), o número de Nusselt é uma função dos números de Grashof e Prandtl: $\text{Nu} = f(\text{Gr}, \text{Pr})$.

As equações podem ser aplicadas para regimes de escoamento laminar, transiente ou turbulento, o que interfere diretamente no cálculo do número de Rayleigh e, conseqüentemente, no número de Nusselt. Os seguintes intervalos são usualmente utilizados para uma chapa vertical e ar em convecção natural (INCROPERA e DEWITT, 1992):

- Fluxo laminar: $0 < \text{Gr} \cdot \text{Pr} < 4 \times 10^8$
- Fluxo transiente: $4 \times 10^8 < \text{Gr} \cdot \text{Pr} < 10^9$
- Fluxo turbulento: $10^9 < \text{Gr} \cdot \text{Pr}$

O valor de 10^9 é denominado número crítico de Rayleigh, pois define o limite de transição entre fluxo laminar e turbulento. Para superfícies inclinadas, basta multiplicar o número de Rayleigh pelo ângulo de inclinação da superfície com o plano horizontal ($\text{Ra} \cdot \text{sen}\theta$).

Para o cálculo dos coeficientes de transferência de calor por convecção no canal da chaminé são necessários os seguintes dados de entrada: o comprimento da placa (C), a inclinação da superfície em relação ao plano horizontal (θ), a irradiância solar na superfície inclinada (I), a absorvância do vidro (α_v) e da placa absorvedora (α_p), a transmitância do vidro (τ_v) e a temperatura média entre o ar e a superfície em questão

(T_m). O seguinte conjunto de equações é utilizado para o cálculo dos coeficientes de convecção h_v e h_p :

Tabela 5.1: Equações para cálculo de h_v e h_p (temperaturas em Kelvin)

Variável	Equação
Temperatura média	Para o vidro: $T_m = (T_v + T_c)/2$ Para o absorvedor: $T_m = (T_p + T_c)/2$
Coefficiente de expansão volumétrica	$\beta = 1/T_m$
Radiação solar absorvida	Para o vidro: $\alpha_v \cdot I$ Para o absorvedor: $\tau_v \cdot \alpha_p \cdot I$
Altura da chaminé	$H = C \cdot \text{sen}\theta$
Viscosidade dinâmica do ar	$\mu = [1,846 + 0,00472(T_m - 300)] \times 10^{-5}$
Densidade do ar	$\rho = 1,1614 - 0,00353(T_m - 300)$
Condutividade térmica do ar	$k = 0,0263 + 0,000074(T_m - 300)$
Calor específico do ar	$c = [1,007 + 0,00004(T_m - 300)] \times 10^3$
Viscosidade cinemática do ar	$\nu = \mu/\rho$
Coefficiente de convecção	$h = \text{Nu} \cdot k/C$

Na literatura, há algumas relações empíricas para dutos, cavidades estreitas e placas planas que podem ser usadas para determinar os coeficientes de transferência de calor por convecção entre o vidro e o ar (h_v) e entre a placa absorvedora e o ar (h_p), em uma chaminé solar. Geralmente, o cálculo é realizado para transferência de calor em regime turbulento pois, nessas condições, há melhor mistura do ar e, conseqüentemente, melhor transferência de calor. Em vista disso, o coeficiente de transferência de calor torna-se independente da localização.

A seguir, são apresentados os métodos de cálculo adotados em alguns modelos matemáticos selecionados. Neles, variam as equações utilizadas para o cálculo do número de Nusselt.

- Cálculo de h_v e h_p por Mathur, Mathur e Anupma (2006):

Para o cálculo dos coeficientes de convecção, os autores utilizam uma combinação do número de Grashof com a lei de Fourier para condução de calor, ao substituírem a diferença de temperatura ($\Delta T = T_{\text{sup}} - T_e$) do número de Grashof (Equação 5.8) pelas seguintes equações:

$$\Delta T = \frac{\alpha_v \cdot I \cdot C}{k} \quad \Delta T = \frac{\alpha_p \cdot \tau_v \cdot I \cdot C}{k} \quad \text{Eq. 5.12}$$

Vidro e ar Placa absorvedora e ar

As equações finais utilizadas para o cálculo do número modificado de Grashof resultam em:

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot \beta \cdot \alpha_v \cdot I \cdot C^4}{k \cdot \nu^2} \quad \text{Gr} = \frac{g \cdot \beta \cdot \alpha_p \cdot \tau_v \cdot I \cdot C^4}{k \cdot \nu^2} \quad \text{Eq. 5.13}$$

Vidro e ar Placa absorvedora e ar

As equações para o cálculo do número de Nusselt são resultantes de relações empíricas obtidas por Holman

(2002) (Equação 5.14). Não há distinção para o cálculo do coeficiente em regimes laminar ou turbulento.

$$\text{Nu} = 0,6(\text{Gr} \cdot \cos\theta \cdot \text{Pr})^{1/5} \quad \text{Eq. 5.14}$$

- Cálculo de h_v e h_p por Bassiouny e Korah (2009):

Para o cálculo do número de Rayleigh ($\text{Gr} \cdot \text{Pr}$) (Equação 5.15), Bassiouny e Korah utilizam a forma tradicional de cálculo do número de Grashof (Equação 5.8). O cálculo dos coeficientes de convecção baseiam-se em Holman (2002), que apresenta equações diferentes para fluxo laminar (Equação 5.16) e turbulento (Equação 5.17).

$$\text{Ra} = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_v - T_c) \cdot C^3 \cdot c \cdot \rho}{k \cdot v} \quad \text{Eq. 5.15}$$

Vidro e ar

$$\text{Ra} = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_p - T_c) \cdot C^3 \cdot c \cdot \rho}{k \cdot v} \quad \text{Eq. 5.15}$$

Placa absorvedora e ar

$$\text{Nu} = 0,6 (\text{Gr} \cdot \cos\theta \cdot \text{Pr})^{1/5} \quad \text{Eq. 5.16}$$

Fluxo laminar ($0 < \text{Ra} < 4 \times 10^8$)

$$\text{Nu} = 0,17 (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{1/4} \quad \text{Eq. 5.17}$$

Fluxo turbulento ($10^9 < \text{Ra}$)

- Cálculo de h_v e h_p por Incropera e DeWitt (1992):

Para convecção livre no interior de canais inclinados com paredes planas e paralelas, Incropera e DeWitt (1992) citam o experimento de Azevedo e Sparrow (1985) para canais inclinados em água, considerando placas isotérmicas simétricas, ângulos de inclinação com a horizontal entre 0 e 45° e condições no limite da placa única de $[\text{Ra} \cdot (e/C)] > 200$. A correlação entre resultados medidos e estimados foi de mais ou menos 10%. A expressão obtida foi a seguinte:

$$\text{Nu} = 0,645 \cdot [\text{Ra} \cdot (e/C)]^{1/4} \quad \text{Eq. 5.18}$$

Os afastamentos foram mais pronunciados nos ângulos de inclinação mais acentuados e foram atribuídos à intensificação de correntes tridimensionais secundárias na placa inferior aquecida. Para o cálculo do número de Rayleigh, são utilizadas as formas tradicionais de cálculo dos números de Grashof (Equação 5.8) e Prandtl (Equação 5.9).

5.1.3 Coeficiente global de perda de calor do vidro para o ambiente externo (U_t)

O coeficiente global de perda de calor do vidro para o ambiente externo (U_t) representa o efeito combinado das perdas de calor do vidro para o ambiente por convecção devido ao vento, por radiação e por condução. São apresentados a seguir alguns valores e equações para seu cálculo:

- Cálculo de U_t por Sakonidou et al (2008):

Os autores utilizaram um valor fixo de 9 W/(m².K), escolhido de um intervalo de 1 a 15 W/(m².K), proposto

por Garg (1987).

- Cálculo de U_t por Mathur, Mathur e Anupma (2006) e Bassiouny e Korah (2009):

Os autores desenvolveram o conceito de perdas de calor pelo coletor solar, baseado no modelo matemático de coletores solares de placas planas apresentado por Duffie e Beckman (1991). A Equação 5.19 é utilizada para o cálculo de U_t .

$$U_t = h_{\text{vento}} + h_{\text{rceu}} + h_c \quad \text{Eq. 5.19}$$

Onde:

h_{vento}	Coefficiente de transferência de calor por convecção devido ao vento sobre o vidro ($W/(m^2.K)$)
h_{rceu}	Coefficiente de transferência de calor por radiação de ondas longas entre o vidro e o céu ($W/(m^2.K)$)
h_c	Coefficiente de transferência de calor por condução do vidro ($W/(m^2.K)$)

Para o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção devido ao vento sobre o vidro (h_{vento}), os autores utilizaram a equação desenvolvida por Watmuff, Charters e Proctor (1977), apresentada em Duffie e Beckman (1991) (Equação 5.20). Para chegar a essa relação, Duffie e Beckman alertam que o comprimento característico do coletor deve ser de 0,5m, sendo que a relação não é necessariamente válida para outros comprimentos.

$$h_{\text{vento}} = 2,8 + 3,0.V \quad \text{Eq. 5.20}$$

Onde:

V	Velocidade do vento (m/s)
-----	---------------------------

A velocidade do vento é obtida, geralmente, em estações meteorológicas, que realizam medições em áreas planas e abertas, a dez metros de altura do solo. Para ajustar esses dados às condições de análise de uma edificação, devem ser aplicados coeficientes de correção de altura e de rugosidade do terreno. A ASHRAE (2005) apresenta uma equação para o cálculo da velocidade do ar na altura da zona ocupada, onde há obstáculos como edificações e vegetação, utilizando-se dos dados obtidos em estações meteorológicas (Equação 5.21).

$$V_H = V_{\text{met}} \left(\frac{\delta_{\text{met}}}{H_{\text{met}}} \right)^{a_{\text{met}}} \left(\frac{H}{\delta} \right)^a \quad \text{Eq. 5.21}$$

Onde:

V_H	Velocidade do vento na altura desejada (m/s)
V_{met}	Velocidade do vento na estação meteorológica (m/s)
δ_{met}	Espessura da camada limite atmosférica, para a estação meteorológica (m) (Tabela 5.2)
H_{met}	Altura da estação meteorológica (geralmente 10m)
a_{met}	Expoente da equação, para a estação meteorológica (adimensional) (Tabela 5.2)
H	Altura desejada para o cálculo da velocidade do vento (m)
δ	Espessura da camada limite atmosférica, para o local desejado (m) (Tabela 5.2)
a	Expoente da equação, para o local desejado (adimensional) (Tabela 5.2)

Tabela 5.2: Parâmetros para a camada limite atmosférica (ASHRAE, 2005, tradução da autora)

Categoria do terreno	Descrição	Expoente (a)	Espessura da camada limite (δ)
1	Centros urbanos, onde pelo menos 50% dos edifícios são maiores de 21,3m	0,33	460
2	Áreas urbanas ou suburbanas, ou terrenos com numerosas obstruções próximas umas às outras	0,22	370
3	Terreno aberto com construções esparsas, de altura menor que 9,1m, incluindo áreas abertas típicas de estações meteorológicas	0,14	270
4	Áreas planas, desobstruídas, exposta aos ventos sobre água por pelo menos 1,6km	0,10	210

Para o cálculo do coeficiente de transferência de calor por radiação de ondas longas entre o vidro e o céu (hr_{ceu}), os autores utilizaram uma equação apresentada por Duffie e Beckman (1991) (Equação 5.22).

$$hr_{ceu} = \frac{\sigma \cdot \epsilon_v (T_v + T_{ceu})(T_v^2 + T_{ceu}^2)(T_v - T_{ceu})}{(T_v - T_e)} \quad \text{Eq. 5.22}$$

Sendo:

σ	Constante de Steffan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$)
ϵ_v	Emissividade da face externa do vidro
T_v	Temperatura superficial do vidro (K)
T_{ceu}	Temperatura do céu (K)
T_e	Temperatura do ar externo (K)

A temperatura do céu (T_{ceu}) é um valor fictício, útil para cálculos de transferência de calor entre o céu e qualquer superfície no nível do solo. Ela depende da distribuição vertical de vapor d'água e da mudança da temperatura atmosférica com a altura. Muitos modelos e correlações empíricas já foram propostos, sendo cada modelo aceitável sob condições específicas de tempo e localidade (TANG, ETZION e MEIR, 2004). Mathur, Mathur e Anupma (2006) e Bassiouny e Korah (2009) adotam o cálculo de temperatura do céu sugerido por Swinbank (1963) (Equação 5.23).

$$T_{ceu} = 0,0552 \cdot T_e^{1,5} \quad \text{Eq. 5.23}$$

Esse é um dos modelos mais simples existentes e é aplicável apenas a céus limpos, sendo o valor da temperatura do céu resultante geralmente superestimado. Outros autores apresentam cálculos mais detalhados, que consideram a nebulosidade do céu. Duffie e Beckman (1991), por exemplo, mencionam diversas relações propostas para estimar a temperatura do céu para céus claros e nebulosos, a partir de variáveis meteorológicas monitoradas. A nebulosidade elevada tende a aumentar a temperatura do céu, se comparada ao céu claro. Os autores apresentam a relação proposta por Berdahl e Martin (1984), obtida através de dados climáticos dos Estados Unidos, de forma a relacionar a temperatura de céu com a temperatura de ponto de orvalho, a temperatura de bulbo seco e a hora (Equação 5.24).

$$T_{ceu} = T_e(0,711 + 0,0056 \cdot \text{Torv} + 0,000073 \cdot \text{Torv}^2 + 0,013 \cdot \cos(15t))^{0,25} \quad \text{Eq. 5.24}$$

Onde:

T _{ceu}	Temperatura do céu (K)
T _e	Temperatura do ar externo (K)
T _{orv}	Temperatura de ponto de orvalho (°C)
t	Tempo solar (h)

Os dados experimentais cobriram um intervalo de temperatura de ponto de orvalho de -20°C a 30°C. O intervalo de diferença entre temperatura do céu e do ar varia entre 5°C, em climas quentes e úmidos, a 30°C, em climas frios e secos.

O programa de simulação EnergyPlus (ENERGYPLUS, 2010a), também traz um método para estimar a temperatura do céu, a partir de dados de nebulosidade (N), temperatura de ponto de orvalho (T_{orv}) e temperatura de bulbo seco do ar externo (T_e). O método baseia-se no algoritmo apresentado por Walton (1983), e apresenta a seguinte sequência de equações:

$$\varepsilon_{ceu} = (0,787 + 0,764 \cdot \ln\left(\frac{T_{orv}}{273}\right)) (1 + 0,0224 \cdot N + 0,0035 \cdot N^2 + 0,00028 \cdot N^3) \quad \text{Eq. 5.25}$$

$$H_{IV} = \varepsilon_{ceu} \cdot \sigma \cdot T_e^4 \quad \text{Eq. 5.26}$$

$$T_{ceu} = \left(\frac{I_{hrz}}{\sigma}\right)^{0,25} \quad \text{Eq. 5.27}$$

Onde:

ε_{ceu}	Emissividade do céu
T _{orv}	Temperatura de ponto de orvalho (K)
N	Nebulosidade (adimensional – de 0 a 10)
I _{hrz}	Radiação infravermelha horizontal (W/m ²)
σ	Constante de Steffan-Boltzmann (5,67x10 ⁻⁸ W/(m ² .K ⁴))
T _e	Temperatura do ar externo (K)
T _{ceu}	Temperatura do céu (K)

5.1.4 Fluxo de calor no canal da chaminé (q'')

Para o cálculo do fluxo de calor no canal da chaminé (q''), variável presente na equação do balanço de energia do ar que circula no canal (Equação 5.2), Mathur, Mathur e Anupma (2006) e Bassiouny e Korah (2009) apresentam a seguinte equação:

$$q'' = \frac{m \cdot c \cdot (T_c - T_i)}{\gamma} \quad \text{Eq. 5.28}$$

Onde:

q''	Fluxo de calor no canal da chaminé (W)
m	Vazão mássica (kg/s)
c	Calor específico do ar na película próxima à placa absorvedora (J/(Kg.K))
T _c	Temperatura média do ar no canal (K)
T _i	Temperatura média do ar no ambiente ventilado pela chaminé (K)

γ Constante de ponderação da temperatura média do ar no canal (Ong e Chow (2003) sugerem o valor de 0,74)

Na equação, o cálculo da vazão mássica (m) varia conforme alguns modelos propostos por diferentes autores. São apresentadas aqui as equações utilizadas por Mathur, Mathur e Anupma (2006), Bassiouny e Korah (2009) e Sakonidou et al (2008) para resolução dessa variável.

- Cálculo de m por Mathur, Mathur e Anupma (2006) e Bassiouny e Korah (2009):

Os autores apresentam o cálculo da vazão mássica na chaminé (m), considerando-se um ambiente com duas aberturas e com temperatura do ar uniforme (Equação 5.29).

$$m = Cd \cdot \rho \cdot As \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot C \cdot \text{sen}\theta \cdot (Tc - Ti)}{(1 + Ar^2)Ti}} \quad \text{Eq. 5.29}$$

Sendo:

Cd	Coeficiente de descarga (adimensional)
ρ	Densidade do ar na película próxima à placa absorvedora (Kg/m^3)
As	Área da seção de saída do ar na chaminé (m^2)
C	Comprimento da chaminé (m)
θ	Inclinação do coletor, a partir da horizontal ($^\circ$)
Tc	Temperatura média do ar no canal (K)
Ti	Temperatura média do ar no ambiente ventilado pela chaminé (K)
Ar	Razão entre a área de saída e a área de entrada da chaminé (adimensional)

O coeficiente de descarga pode variar de 0 a 1, dependendo da geometria das aberturas e das perdas por diferença na seção disponível para passagem do escoamento. O valor de 0,57 é comumente utilizado para cálculos de vazão em chaminés solares, conforme sugerido por Andersen (1995)¹.

- Cálculo de m por Sakonidou et al (2008):

Os autores utilizam duas correlações para prever a velocidade média do ar na saída da chaminé, supondo seção retangular e áreas iguais nas aberturas de entrada e saída do canal. Na primeira equação, assume-se que a pressão dentro da chaminé inclinada contrabalança com a queda de pressão devido à fricção nas paredes e com as perdas de carga na entrada e na saída do canal. A expressão é a seguinte:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot C \cdot g \cdot (\text{sen}\theta)^2 \cdot (\rho_i - \rho_e)}{\left(f \cdot \frac{C}{D_H} + \zeta_e + \zeta_s\right) \cdot \rho_e}} \quad \text{Eq. 5.30}$$

Onde:

V	Velocidade do ar (m/s)
ρ_i	Densidade média do ar no ambiente ventilado pela chaminé (Kg/m^3)

¹ Vide item 4.1.1.

ρ_e	Densidade média do ar externo (Kg/m ³)
f	Fator de fricção do canal (adimensional)
D_H	Diâmetro hidráulico da chaminé (m)
ζ_e	Coefficiente de perda de carga da entrada da chaminé (adimensional)
ζ_s	Coefficiente de perda de carga da saída da chaminé (adimensional)

A segunda expressão testada por Sakonidou et al (2008) também foi utilizada nos modelos descritos por Bansal, Mathur e Bandhari (1993) e por Andersen (1995). É uma correlação empírica, que usa o conceito de coeficiente de descarga para ajustar a velocidade do ar para todas as resistências do fluxo no sistema – perdas por fricção ao longo da superfície da chaminé, perdas de carga na entrada e na saída do canal, entre outras. Para o caso de áreas de seção iguais na entrada e na saída da chaminé, a relação consiste em:

$$V = Cd \cdot \frac{\rho \cdot T_c}{\rho_e \cdot T_e} \cdot \sqrt{\frac{C \cdot g(\text{sen}\theta)^2(T_c - T_e)}{T_e}} \quad \text{Eq. 5.31}$$

Sendo:

Cd	Coefficiente de descarga (adimensional)
ρ	Densidade do ar na película próxima à placa absorvedora (Kg/m ³)
ρ_e	Densidade do ar externo (Kg/m ³)
T_c	Temperatura média do ar no canal (K)
T_e	Temperatura do ar externo (K)
C	Comprimento da chaminé (m)
θ	Inclinação do coletor, a partir da horizontal (°)

Para aplicação dos resultados dos modelos propostos por Sakonidou et al (2008) na equação de fluxo de calor (Equação 5.28), a velocidade do ar (V) deve ser transformada em vazão mássica (m), através da Equação 3.2².

5.2 Calibração de modelos teóricos: materiais e métodos

Para avaliação do desempenho de uma chaminé solar, desenvolveram-se predições teóricas por meio de dois métodos: aplicação de um modelo matemático e uso de um programa de simulação computacional.

Para aferir as soluções teóricas adotadas, realizou-se uma etapa inicial de calibração, através da comparação dos modelos teóricos selecionados com os resultados obtidos na etapa experimental. O processo de calibração consistiu em selecionar modelos de cálculo de diversos coeficientes e adotar os que produziram resultados mais próximos aos valores de fluxo de ar medidos no experimento.

A calibração foi realizada para o dia 11 de março de 2010. A escolha dessa data, dentre os resultados experimentais coletados, deve-se ao fato de ser estação de verão, período em que a ventilação natural é uma estratégia importante para promover conforto térmico. Apresenta-se, na Tabela 5.3, um resumo dos dados climáticos do dia selecionado.

² $m = \rho \cdot V \cdot A$

Tabela 5.3: Resumo dos dados climáticos de São Carlos, SP – dia 11/03/2010 (INMet)

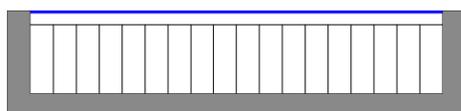
Dados climáticos – 11/03/2010	
TBS máxima	29,7°C
TBS mínima	17,3°C
Irradiância horizontal global máxima	966 W/m ²
Irradiância horizontal direta máxima	435 W/m ²
Irradiância horizontal difusa máxima	531 W/m ²
Direção predominante do vento (neste dia)	Noroeste
Velocidade média do vento a 10m de altura	1,6 m/s

Como dados de entrada dos modelos, foram utilizadas as características geométricas e as propriedades físicas dos materiais similares à célula de teste construída em São Carlos (Tabela 5.4).

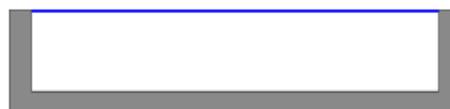
Tabela 5.4: Dados de entrada dos modelos teóricos, conforme etapa experimental

Parâmetro	Dado de entrada
Dimensões do coletor solar	Comprimento = 1m
	Largura = 1m
	Espessura do canal = 0,18m
Altura da chaminé solar	Altura total do conjunto de 1,80m, incluindo extensor
Inclinação do coletor com o plano horizontal (para máxima irradiância no plano do vidro)	20°
Espessura do isolante térmico	0,05m
Condutividade térmica do isolante	0,03 W/m.K
Fator solar do vidro	0,86
Transmitância térmica do vidro	5,78W/m ² .K
Emissividade da face externa do vidro	0,84
Absortância da placa absorvedora	0,80
Emissividade da placa absorvedora	0,95

Devido às limitações dos modelos teóricos adotados, as aletas foram desconsideradas na volumetria do coletor solar. Em troca, o sistema foi modelado como uma caixa simples, com o absorvedor em contato direto com o isolamento da base (Figura 5.2). As aletas funcionam como radiador da placa absorvedora; como não foi possível inseri-las no modelo, o calor que seria perdido da placa para as aletas não pôde ser contabilizado. Diferenças na absorção da radiação solar e na resistência térmica devido à ausência de aletas foram levadas em consideração na análise de resultados.



(a) Experimento (com aletas)



(b) Modelos teóricos (sem aletas)

Figura 5.2: Corte transversal do coletor solar

Para quantificar as resistências por ação do atrito presentes na chaminé solar do experimento, as perdas de carga foram calculadas e inseridas nos modelos teóricos, representadas pelo coeficiente de descarga (Cd). O cálculo foi realizado através da equação de vazão volumétrica (Equação 2.1)³. Para o cálculo, foram utilizados como dados de entrada os resultados obtidos no monitoramento experimental. O coeficiente de descarga resultante foi de 0,12, o que representa as perdas de carga totais da chaminé solar, incluindo as resistências das seções curvas, das aletas do coletor e das aberturas de entrada e saída do ar. Este valor consiste em uma média dos valores calculados hora a hora, para o período de março de 2010. Neste período, o número de Reynolds variou entre 1400 e 4000, sendo o fluxo de ar no interior da chaminé variável entre regime laminar e turbulento.

A análise de resultados consistiu na comparação entre resultados estimados por meio de modelos teóricos (modelo matemático e simulação) com os obtidos experimentalmente, para as seguintes variáveis: temperaturas superficiais do vidro (Tv) e da placa absorvedora (Tp), temperatura do ar no canal (Tc) e vazão volumétrica (Q).

5.2.1 Processo de calibração do modelo matemático

O modelo matemático adotado nas análises consiste nas equações de balanço de energia para o vidro (Equação 5.1), o ar no canal da chaminé (Equação 5.2) e a placa absorvedora (Equação 5.3) apresentadas por Mathur, Mathur e Anupma (2006) e Bassiouny e Korah (2009). O processo de calibração baseou-se na análise de diferentes modelos de cálculo de algumas variáveis, de forma a identificar quais apresentavam resultados mais próximos aos obtidos no procedimento experimental. As seguintes variáveis foram abordadas:

- Coeficiente de transferência de calor por convecção entre o vidro e o ar (hv) e entre a placa absorvedora e o ar (hp): comparação entre métodos de cálculo apresentados por Mathur, Mathur e Anupma (2006), Bassiouny e Korah (2009) e Incropera e DeWitt (1992) (vide item 5.1.2).
- Temperatura do céu (Tceu): comparação entre métodos de cálculo propostos por Swinbank (1963) para céu limpo (N=0) e pelo EnergyPlus (2010a) para céu limpo (N=0) e nebuloso (N=6), ambos aplicados à equação para cálculo do coeficiente global de perda de calor do vidro para o ambiente externo (Ut) de Mathur, Mathur e Anupma (2006) (vide item 5.1.3).
- Vazão volumétrica no canal (Q): comparação entre métodos de cálculo apresentados por Mathur, Mathur e Anupma (2006) e Sakonidou et al (2008) (vide item 5.1.4).
- Coeficiente de descarga (Cd): comparação entre o cálculo através da equação de vazão volumétrica (Equação 2.1), com base nos resultados experimentais, com um valor amplamente utilizado nas pesquisas teóricas sobre chaminés solares (Cd=0,57), baseado no coeficiente de descarga específico para movimento de ar por impulsão térmica calculado por Andersen (1995) (vide item 4.1.1).

As equações cujos resultados mais se aproximaram aos dados medidos no experimento foram incorporadas ao modelo matemático. Para sua resolução, foi utilizado o programa Matlab (versão 7.9). Partindo-se de estimativas iniciais das temperaturas desconhecidas – temperatura superficial do vidro (Tv), temperatura do ar no canal da chaminé (Tc) e temperatura superficial da placa absorvedora (Tp) – por meio de sucessivas iterações obteve-se os valores finais das mesmas.

³ $Q = Cd \cdot A \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H_{NPN} (T_i - T_e) / T_i}$

No modelo matemático selecionado não é possível contabilizar os efeitos da ventilação por ação dos ventos sobre o desempenho da chaminé solar. Em vista disso, o vento foi considerado apenas na transferência de calor por convecção sobre o vidro do coletor solar.

5.2.2 Processo de calibração do modelo computacional

As simulações computacionais foram realizadas através do modelo para cálculo de fluxo de ar do programa EnergyPlus (versão 6.0), denominado AirflowNetwork. Os cálculos realizados pelo programa baseiam-se na hipótese de que as temperaturas superficiais e do ar são uniformemente distribuídas dentro de uma mesma zona térmica, não havendo possibilidade de desenvolver uma análise ponto a ponto no interior da chaminé. A maioria dos trabalhos teóricos sobre o desempenho de chaminés solares também baseia-se nessa hipótese, sendo os resultados obtidos considerados satisfatórios. Além disso, Chungloo e Limmeechokchai (2008) analisaram experimentalmente o assunto e obtiveram boa concordância entre a distribuição da temperatura do ar ao longo do canal e à meia altura.

Para calibração do modelo de simulação, elaborou-se primeiramente um modelo tridimensional da célula de teste adotada na etapa experimental, tendo este modelo as mesmas características geométricas e propriedades físicas dos materiais do experimento (Figura 5.3).

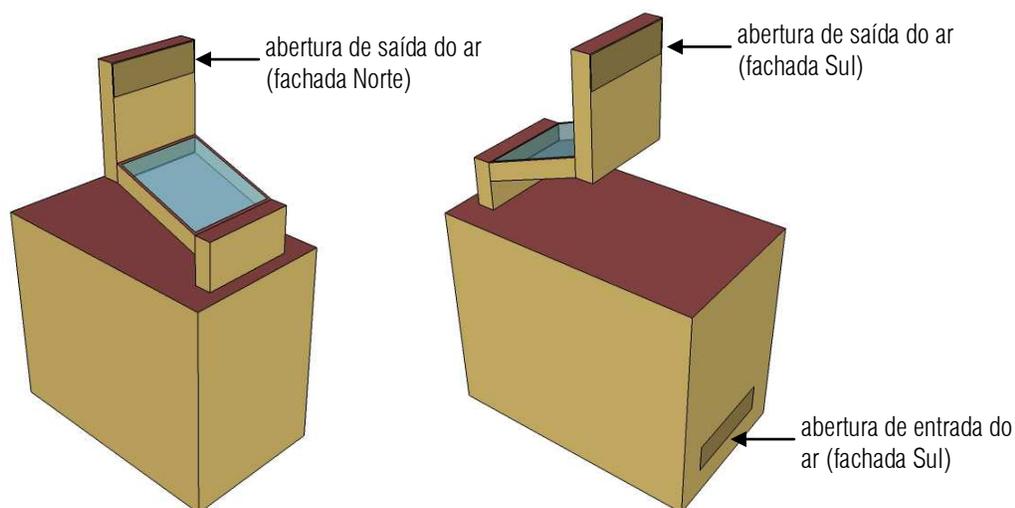


Figura 5.3: Modelo computacional da chaminé solar

O EnergyPlus oferece três opções de algoritmo para cálculo de coeficiente de convecção em superfícies internas e cinco opções para superfícies externas. Todos os algoritmos foram testados, sendo escolhidas as opções mais apropriadas para simulação da chaminé solar, que consistiram nos algoritmos *Detailed* para as superfícies internas e TARP (*Thermal Analysis Research Program*) para as externas. Esses algoritmos correlacionam o coeficiente de transferência de calor com a orientação da superfície e a diferença entre a temperatura do ar na zona térmica e na superfície. Adotam equações de transferência de calor por convecção natural para superfícies horizontais, verticais ou inclinadas, voltadas para cima quando aquecidas ou para baixo quando resfriadas (ENERGYPLUS, 2010a).

O método de inicialização linear foi escolhido, pois adequa-se à simulação de ventilação por efeito chaminé e

tende a estabelecer uma direção adequada para o fluxo de ar (ENERGYPLUS, 2010b). Nele, os valores iniciais para fluxo mássico (m) são obtidos por uma aproximação linear, relacionando fluxo de ar com queda de pressão (Equação 5.32).

$$m = C_i \cdot \rho \left(\frac{\Delta p}{\mu} \right) \quad \text{Eq. 5.32}$$

Sendo:

m	Vazão mássica (kg/s)
C_i	Coefficiente de fluxo mássico (m^3)
ρ	Densidade do ar (kg/m^3)
Δp	Diferença de pressão entre dois nós considerados (Pa)
μ	Viscosidade do ar (Pa.s)

Para realização das simulações, um arquivo climático em formato epw (*EnergyPlus weather data file*) foi criado, com base nos dados climáticos adquiridos na estação climatológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Para que fosse possível verificar os efeitos do vento nas previsões teóricas, foram realizadas simulações com e sem vento. Para contabilizar corretamente os efeitos da ventilação por ação dos ventos, foram inseridos, como dados de entrada, os coeficientes de pressão das aberturas de entrada e saída do ar obtidos nos ensaios em túnel de vento com barreira (Tabela 4.1). No caso sem vento, a velocidade do ar foi zerada no arquivo climático.

As perdas de carga por atrito foram contabilizadas através do coeficiente de descarga adotado para as aberturas. Assim como no modelo matemático, também para as simulações os coeficientes de descarga estimados com base nos resultados experimentais foram comparados com o valor de 0,57 sugerido por Andersen (1995).

5.3 Resultados obtidos na calibração

5.3.1 Resultados da calibração do modelo matemático

A primeira análise empreendida para calibração do modelo matemático consistiu na comparação entre resultados experimentais e valores estimados por diferentes equações de cálculo para os coeficientes de transferência de calor por convecção entre o vidro e o ar (h_v) e entre a placa absorvedora e o ar (h_p). Os resultados para temperatura superficial do vidro (Figura 5.4) indicaram que o h_v proposto por Bassiouny e Korah (2009), tanto para fluxo laminar como para fluxo turbulento, apresentaram valores mais próximos aos dados experimentais, com uma diferença média de apenas 3% entre os resultados. Apesar dos resultados experimentais indicarem um fluxo predominantemente laminar no interior da chaminé, o uso de diferentes métodos de cálculo para fluxos laminar e turbulento no modelo matemático não apresentou diferenças significativas nos resultados.

Os resultados para temperatura superficial da placa absorvedora (Figura 5.5) indicaram valores estimados de 26% a 48% acima dos dados medidos, para o período entre 8 e 17h. Tais diferenças podem ser explicadas pelo fato dos cálculos teóricos terem desconsiderado a presença das aletas, o que faz com que o calor absorvido se concentre na placa, não havendo dissipação para as aletas. O modelo matemático para cálculo do hp que melhor correspondeu aos resultados experimentais foi o de Mathur, Mathur e Anupma (2006).

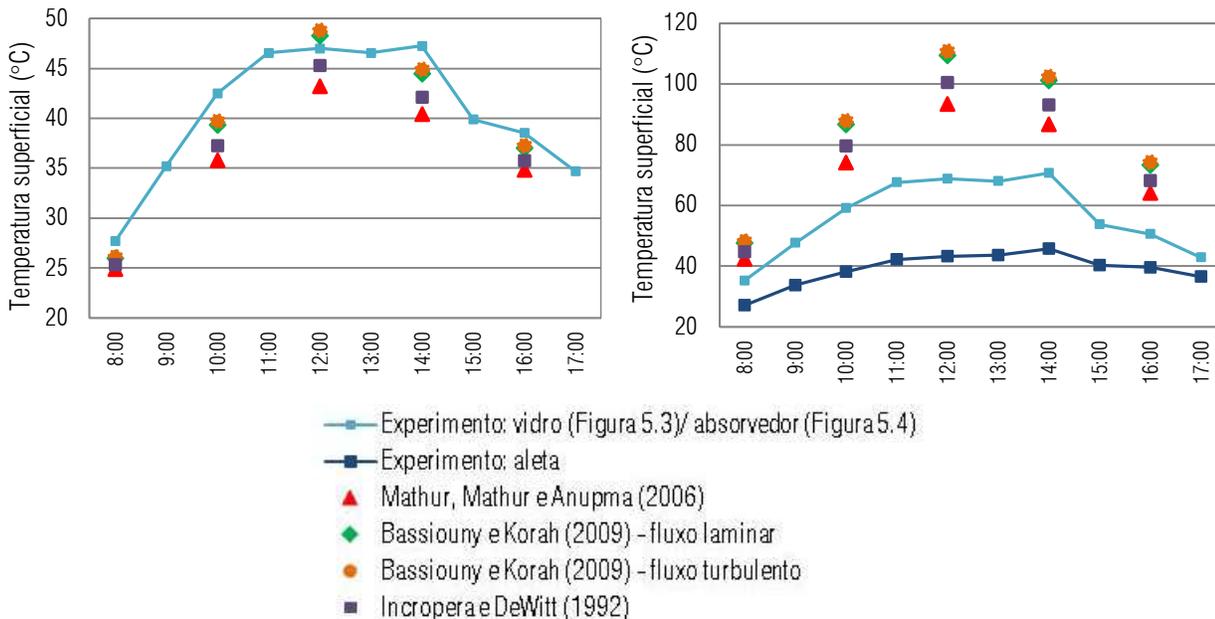


Figura 5.4: Temperatura superficial do vidro (°C) – teste de hv e hp

Figura 5.5: Temperatura superficial da placa absorvedora (°C) – teste de hv e hp

Para os resultados de temperatura do ar no canal da chaminé (Figura 5.6), os valores previstos pelo modelo matemático ficaram bastante próximos à temperatura do ar no canal entre aletas, do experimento. A diferença entre valores previstos e medidos no canal entre aletas foi de 2%, para o modelo matemático com cálculo de hv e hp propostos por Mathur, Mathur e Anupma (2006), e de 7% para o modelo com cálculo de hv e hp propostos por Bassiouny e Korah (2009) para fluxo turbulento. Já as diferenças entre valores previstos e a média entre os valores monitorados nos dois canais (canal entre aletas e canal entre vidro e absorvedor) variou entre 10% e 18%.

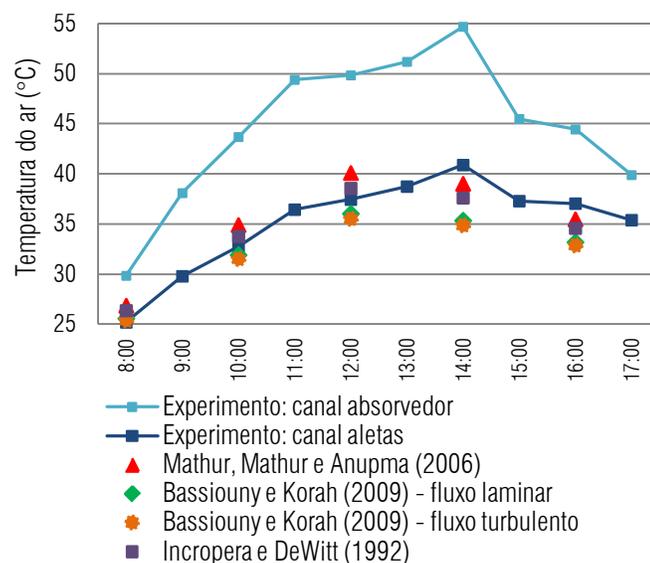


Figura 5.6: Temperatura do ar no canal da chaminé – teste de hv e hp

A segunda análise empreendida para calibração do modelo matemático consistiu na comparação entre equações para cálculo de temperatura do céu (T_{ceu}) com os resultados experimentais. Os resultados são apresentados na Figura 5.7, para temperatura superficial do vidro. A variação no cálculo de temperatura do céu utilizando céu limpo (nebulosidade igual a zero), realizada através dos modelos propostos por Swinbank (1963), Duffie e Beckman (1991) e EnergyPlus (2010a) não ocasionou variações significativas na temperatura superficial do vidro.

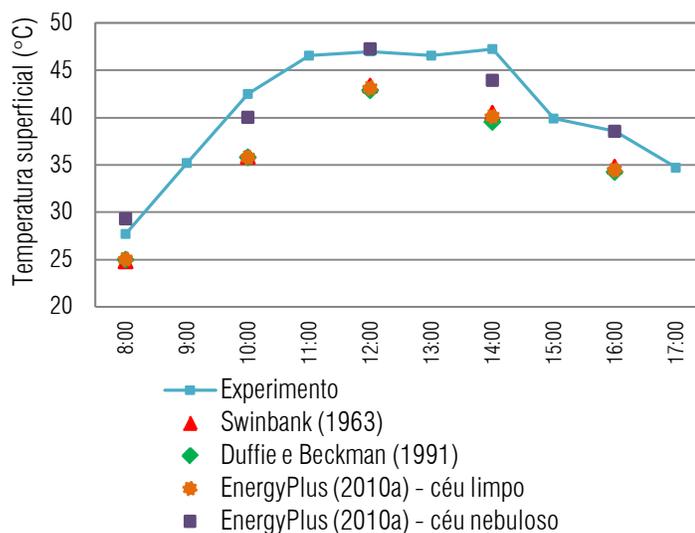


Figura 5.7: Temperatura superficial do vidro – teste de Tceu

Uma avaliação da influência da nebulosidade do céu nos resultados de temperatura superficial do vidro do coletor foi realizada através de testes com o modelo de cálculo de temperatura do céu do EnergyPlus (2010a) para céu limpo ($N=0$) e para céu com nebulosidade média ($N=6$). Para o segundo caso, as temperaturas superficiais do vidro apresentaram uma aproximação significativa com os dados experimentais, indicando a importância da temperatura do céu e do grau de nebulosidade no cálculo do coeficiente global de perda de

calor do vidro para o ambiente externo. A diferença entre dados medidos e calculados, para este caso, foi de apenas 1%. Para os demais casos (céu limpo), a diferença ficou em 12%.

A terceira análise de calibração do modelo matemático compreendeu a comparação entre equações de cálculo de vazão volumétrica da chaminé solar (Q) com os resultados experimentais. O coeficiente de descarga utilizado nos cálculos foi de 0,12, conforme cálculo previamente realizado com base nos resultados experimentais. Os resultados são apresentados na Figura 5.8.

O primeiro modelo apresentado por Sakonidou et al (2008) (Equação 5.30) superestimou o fluxo de ar no período diurno em 70%, em média, e o segundo (Equação 5.31) subestimou o fluxo de ar em torno de 69%. O modelo de cálculo proposto por Mathur, Mathur e Anupma (2006) foi o que apresentou vazão volumétrica mais próxima aos dados experimentais, sendo a diferença entre cálculo teórico e experimento, para a média diária do período diurno, de 31%. Ainda assim, os modelos calibrados produziram resultados insatisfatórios, especialmente se for considerado que são usuais diferenças de até 20% entre dados medidos e calculados (ADAM, 2003). Como o modelo matemático de Mathur, Mathur e Anupma (2006) subestimou a temperatura do ar no canal da chaminé (Figura 5.6), é de se esperar que a vazão volumétrica também fosse subestimada.

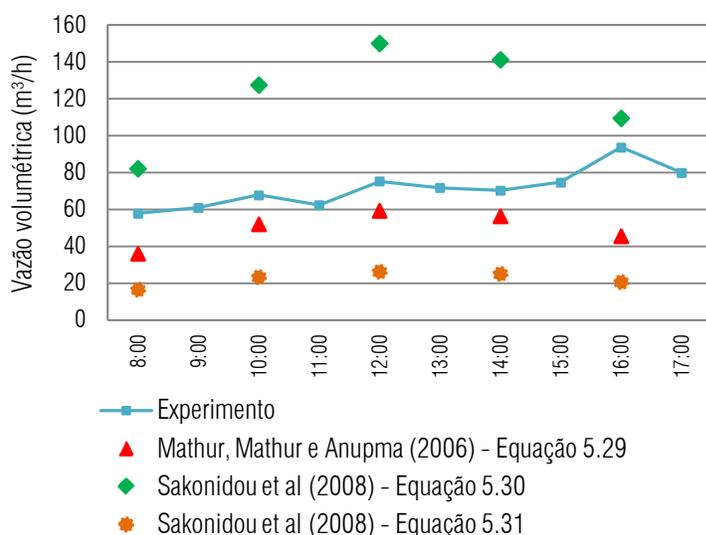


Figura 5.8: Vazão volumétrica da chaminé (m^3/h) – teste de diferentes modelos de cálculo

A última análise de calibração do modelo matemático consistiu na comparação entre o coeficiente de descarga calculado com base nos resultados experimentais ($C_d=0,12$) e o coeficiente de descarga específico para movimento de ar por impulsão térmica calculado por Andersen (1995) ($C_d=0,57$). Os resultados são apresentados na Figura 5.9. Para o primeiro caso, a diferença entre valores estimados e medidos, considerando a média diária do período diurno, foi de 31%, conforme mencionado acima. No caso do coeficiente de descarga calculado por Andersen (1995), a diferença média subiu para 102%.

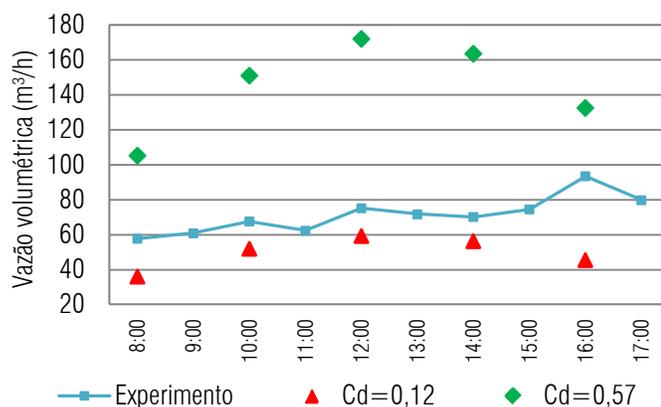


Figura 5.9: Vazão volumétrica no canal da chaminé – teste de Cd

O coeficiente de transferência de calor por convecção é considerado o coeficiente de transferência de calor mais importante na análise de uma chaminé solar (ADAM, 2003), pois a maior parte da troca de calor, neste sistema, se dá pelo ar do canal. Comparativamente, a perda de calor por radiação pelo vidro e por condução pela parte de trás do canal não são consideráveis. Entretanto, a escolha do coeficiente de descarga na análise de calibração mostrou maior impacto nas predições do que a escolha do coeficiente de transferência de calor por convecção. Este resultado mostra que maior atenção deve ser tomada na escolha do coeficiente de descarga, o que contraria a prática corrente de assumir um valor próximo de 0,6, independentemente do detalhamento das aberturas e do canal da chaminé.

5.3.2 Resultados da calibração do modelo computacional

As simulações computacionais foram realizadas com os algoritmos de cálculo de coeficientes de convecção considerados mais adequados às transferências de calor em uma chaminé solar, disponíveis no programa EnergyPlus (algoritmos *Detailed* para as superfícies internas e TARP para as externas). O coeficiente de descarga utilizado nas simulações consistiu no valor de 0,12, obtido através dos resultados experimentais. Os resultados obtidos nas simulações foram comparados com os melhores resultados obtidos na análise do modelo matemático (item 5.3.1) e com os resultados da etapa experimental.

As predições de temperatura superficial do vidro apresentaram boa concordância com o experimento, pois a diferença média entre os resultados simulados e medidos foi de apenas 3%, para o período entre 8 e 17h (Figura 5.10). Os resultados ficaram próximos aos obtidos pela aplicação do modelo matemático. Já os valores estimados por simulação para a temperatura superficial da placa absorvedora não apresentaram concordância tão satisfatória, ficando 15% acima dos dados medidos, para o mesmo período (Figura 5.11). Se comparados aos resultados do modelo matemático, no entanto, a simulação computacional apresentou melhor desempenho, já que as diferenças entre modelo matemático e experimento ficaram em torno de 30%.

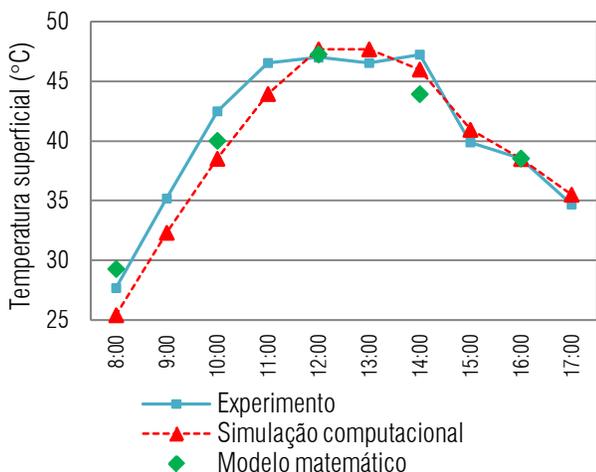


Figura 5.10: Temperatura superficial do vidro (°C)

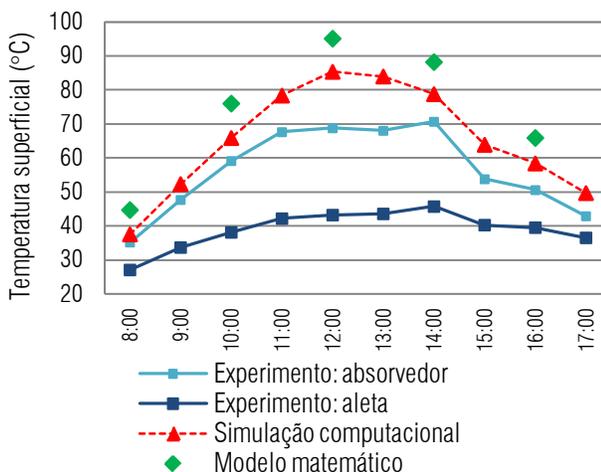


Figura 5.11: Temperatura superficial do absorvedor (°C)

Para a temperatura do ar no canal da chaminé, os valores previstos por simulação ficaram próximos à média entre os valores monitorados nos dois canais do experimento (canal entre vidro e absorvedor e canal entre aletas), sendo a diferença média entre resultados de apenas 1% (Figura 5.12). Já os valores previstos pelo modelo matemático ficaram bastante próximos à temperatura do ar no canal entre aletas. A diferença entre valores previstos pelo modelo matemático e a média entre os valores monitorados nos dois canais foi de 11%.

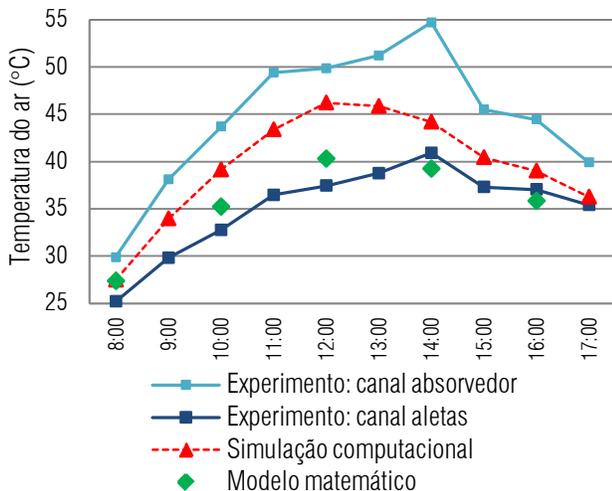


Figura 5.12: Temperatura do ar no canal da chaminé (°C)

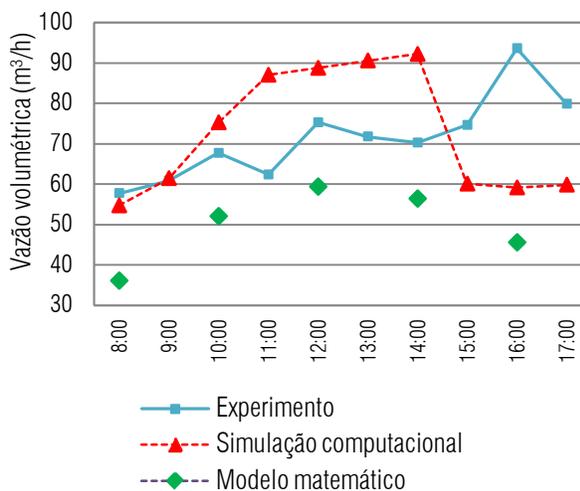


Figura 5.13: Vazão volumétrica da chaminé (m³/h)

Os resultados de vazão volumétrica no canal da chaminé mostraram, tanto para a curva obtida pela simulação computacional como para a obtida pelos resultados experimentais, uma grande variação no fluxo de ar ao longo do tempo (Figura 5.13). Essa variação foi provocada pela mudança constante na velocidade e direção do vento, na célula de teste. Como os cálculos pelo modelo matemático não consideraram a interferência do vento, neste caso a vazão volumétrica resultante dependeu apenas da temperatura do ar externo e da irradiância solar.

Ao comparar simulação computacional e experimento, pode-se notar diferenças nas taxas de variação dos resultados. A simulação subestimou os resultados durante os períodos da manhã e do fim da tarde e superestimou ao meio dia, horário de pico de radiação solar (Tabela 5.5). A diferença entre médias diárias do período diurno ficou em 7%. No caso do modelo matemático, os valores obtidos foram sempre inferiores aos experimentais, o que pode ter ocorrido, em parte, devido à influência do vento, que não pôde ser considerada por conta de limitações do modelo. A diferença entre médias diárias ficou em 31%.

Tabela 5.5: Vazão volumétrica no canal da chaminé

Hora (11/03/2010)	Experimento (m ³ /h)	Simulação computacional (m ³ /h)	Diferença (%)	Modelo matemático (m ³ /h)	Diferença (%)
8:00	57,77	54,71	-6%	36,10	-60%
9:00	60,88	61,45	1%	-	-
10:00	67,70	75,25	10%	52,04	-30%
11:00	62,36	87,01	28%	-	-
12:00	75,25	88,71	15%	59,35	-27%
13:00	71,77	90,55	21%	-	-
14:00	70,26	92,16	24%	56,39	-25%
15:00	74,61	60,09	-24%	-	-
16:00	93,60	59,15	-58%	45,57	-105%
17:00	79,85	59,84	-33%	-	-

A Figura 5.14 apresenta os resultados de simulações com e sem vento e com coeficientes de descarga de 0,12 (resultados experimentais) e de 0,57 (sugerido por ANDERSEN, 1995). A adoção de um coeficiente de descarga de 0,12, um valor à primeira vista surpreendentemente baixo, respondeu bem à calibração. A comparação entre simulações com vento, para coeficientes de descarga de 0,12 e de 0,57, mostrou diferenças de até 18% entre os dois resultados, sendo o coeficiente de 0,12 o que apresenta resultados mais próximos aos dados medidos. Ressalta-se aqui a importância da adoção de um valor adequado ao coeficiente de descarga, o que contraria a prática corrente de assumir valores padrão baseados na literatura especializada, independentemente da geometria analisada.

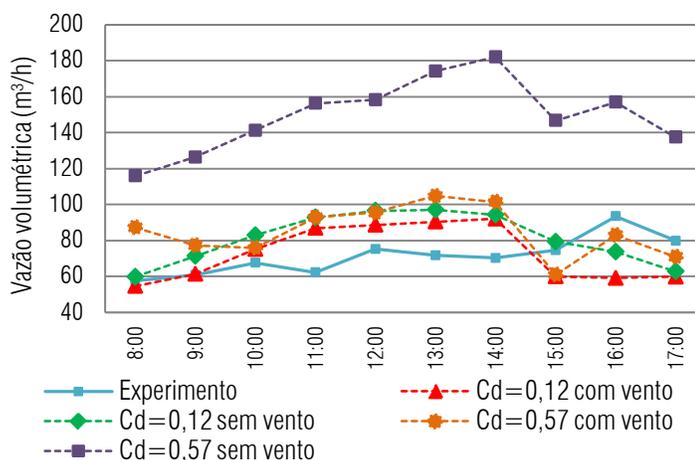


Figura 5.14: Vazão volumétrica no canal da chaminé – teste de Cd e da presença ou ausência de ventos

Esses resultados, juntamente com os obtidos pela análise realizada através do modelo matemático (Figura 5.9) mostram o grande impacto causado pela escolha adequada do coeficiente de descarga sobre o resultado final das previsões teóricas.

A comparação entre resultados de simulações com e sem vento permite traçar uma análise simplificada dos efeitos do vento sobre o desempenho da chaminé solar. Para o caso das simulações com coeficiente de descarga de 0,12, a ausência de ventos provocou um acréscimo médio de 13% na vazão volumétrica da chaminé. Já no caso das simulações com coeficiente de descarga de 0,57, a ausência de ventos provocou um acréscimo médio de 91% na vazão volumétrica. Os resultados mostram que o vento interferiu negativamente no desempenho da chaminé solar. De fato, a direção do vento para o período analisado estava predominantemente contrária à abertura de entrada de ar da célula de teste, variando entre 290° e 330°.

Sabe-se que o valor do coeficiente de descarga é inversamente proporcional à perda de carga do sistema, ou seja, quanto maior a perda de carga, menor o valor do coeficiente de descarga. Em vista disso, no caso do coeficiente de descarga igual a 0,12, a elevada perda de carga da chaminé somada à incidência de ventos contrária à abertura de entrada do ar resultou em um pequeno decréscimo na vazão volumétrica, em comparação com a situação sem vento. Já no caso do coeficiente de descarga igual a 0,57, a menor perda de carga da chaminé resultou em um maior decréscimo na vazão volumétrica, em comparação com a situação sem vento, já que a instalação apresentou menor resistência à incidência contrária de ventos.

5.4 Considerações finais

É importante mencionar as incertezas originadas do sistema de monitoramento usado no procedimento experimental, especialmente dos anemômetros de fio quente, que podem ter contribuído para as diferenças observadas entre experimento e modelos teóricos. Também contribui para este fato a imprecisão dos dados de entrada utilizados nos modelos teóricos, como transmitância térmica do vidro e condutividade térmica do isolante, por exemplo.

Os dois modelos teóricos adotados (cálculo e simulação) mostraram ser ferramentas apropriadas para avaliação de desempenho de uma chaminé solar, desde que as perdas de carga da chaminé sejam corretamente previstas. Comparando os dois modelos, pode-se concluir que a simulação computacional apresentou melhor concordância com os dados experimentais, sendo, portanto, mais viável e confiável para uso na avaliação de outros parâmetros de projeto e para o desenvolvimento de estudos comparativos de chaminés solares. Em vista disso, este modelo teórico foi selecionado para o desenvolvimento da análise paramétrica subsequente.

6. ANÁLISE PARAMÉTRICA DA CHAMINÉ SOLAR PARA CLIMAS TÍPICOS DO TERRITÓRIO BRASILEIRO

6.1 Análise de desempenho de uma chaminé solar: revisão bibliográfica

O bom funcionamento de uma chaminé solar, visando prover resfriamento passivo em edificações através da ventilação natural, depende, basicamente, de seu desempenho em vazão. As chaminés solares podem produzir um fluxo de ar considerável no interior de um ambiente, quando utilizadas sob condições favoráveis. Em vista disso, o fluxo de ar proporcionado pelo sistema é a informação mais importante de uma chaminé solar para aplicação prática, já que determina seu poder de ventilação em um edifício.

O projeto de uma chaminé solar depende da latitude do local de implantação e de suas características climáticas, em especial dos dados de temperatura do ar externo, irradiância solar e vento. Sabe-se que o potencial de ventilação em um dado ambiente é dado pela diferença de pressões de origem térmica somada à diferença de pressões de origem eólica (MARQUES DA SILVA, 2003). Como o potencial de ventilação por ação dos ventos é, geralmente, maior do que o potencial de ventilação por efeito chaminé, torna-se de maior interesse a aplicação do recurso da chaminé solar em sítios sem vento, ou com vento a velocidades insignificantes. Nestas ocasiões, a temperatura do ar externo e a irradiância solar passam a ser as variáveis climáticas de maior importância.

Aliado a isso, o detalhamento de parâmetros construtivos de uma chaminé solar, incluindo configuração geométrica e propriedades físicas de materiais e superfícies, garante um funcionamento adequado do sistema. Diversas pesquisas encontradas na literatura especializada discutem características projetuais de chaminés solares, com o objetivo de incrementar a ventilação natural em ambientes. Alguns resultados obtidos em pesquisas são apresentados a seguir.

6.1.1 Configuração geométrica de uma chaminé solar

De acordo com Baharvand (2010) e Khanal e Lei (2011), os aspectos geométricos que mostraram ter efeito predominante no desempenho em ventilação de uma chaminé solar são a razão entre a altura da chaminé (distância entre aberturas de entrada e saída do ar) e a espessura do canal e o ângulo de inclinação da chaminé (Figura 6.1).

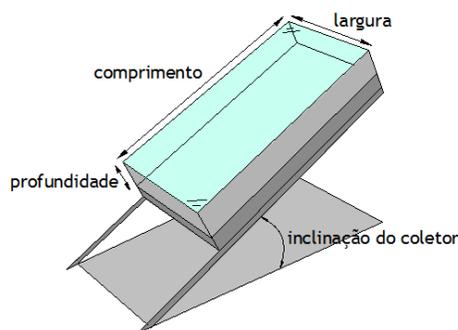


Figura 6.1: Esquema de uma chaminé solar (adaptado de ADAM et al, 2002)

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

Lee e Strand (2009) analisaram os efeitos da variação no comprimento de uma chaminé solar vertical com 0,3m de espessura do canal de ar, para três diferentes condições climáticas, nos Estados Unidos. O comprimento da chaminé variou de 3,5m a 9,5m. Os resultados obtidos na análise variaram entre 0,04m³/s e 0,13m³/s, aproximadamente (Figura 6.2), para a temperatura ambiente mais elevada do dia típico selecionado para análise (21 de agosto). A radiação solar direta normal à superfície máxima foi de 917Wh/m² para a cidade de Phoenix, 965Wh/m² para Spokane e 209Wh/m² para Minneapolis. Os autores concluíram, através dos resultados, que o desempenho da chaminé solar é fortemente dependente tanto da altura da chaminé como da radiação solar disponível no local.

Ong e Chow (2003), ao avaliarem o desempenho de chaminés solares verticais de baixa altura sob diversas características ambientais e geométricas, chegaram a velocidades do ar entre 0,25 e 0,39m/s no interior do canal, para uma chaminé de 2m de altura, 1m de largura, espessura do canal variando de 0,1 a 0,3m e radiação solar de intensidade 650W/m² (Figura 6.3). Os autores observaram que, conforme aumenta a espessura do canal e a radiação solar incidente, aumenta a eficiência instantânea da chaminé. A espessura de 0,3m apresentou um incremento de 56% em relação à de 0,1m. Não foi observada circulação inversa.

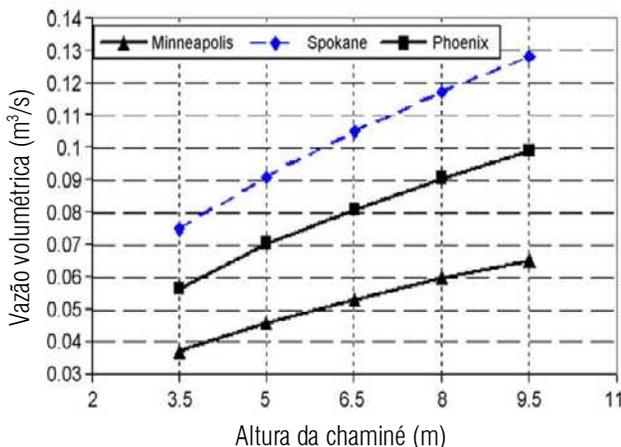


Figura 6.2: Resultados obtidos por Lee e Strand (2009) para chaminé vertical

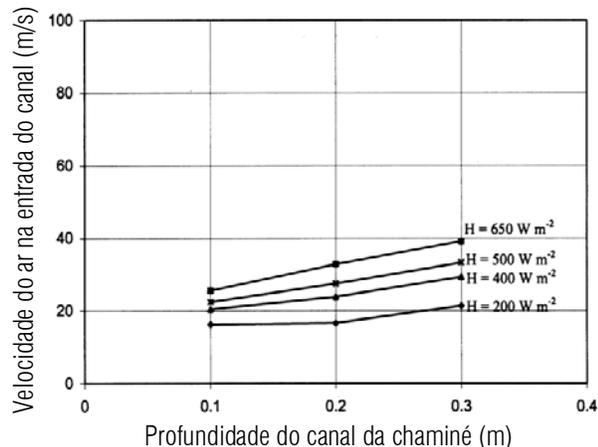


Figura 6.3: Resultados obtidos por Ong e Chow (2003) para chaminé vertical

De acordo com Adam (2003), ao aumentar a espessura do canal, há um aumento na área de abertura para passagem do ar e uma redução nas perdas de carga por fricção, resultando em um melhor desempenho do sistema. No entanto, quando a espessura ótima é excedida pode ocorrer fluxo de ar inverso no canal. Dois fatores podem causá-lo: uma espessura do canal muito elevada e uma reduzida área de abertura de entrada de ar. Baharvand (2010) e Chen (2003) indicam um valor de 0,3m como ideal, para as condições de projeto analisadas.

A intensidade da radiação solar incidente na cobertura de vidro da chaminé tem grande influência no seu desempenho. Como a latitude do local influencia o ângulo de incidência da radiação solar, em localidades de baixa latitude torna-se vantajoso utilizar coletores solares inclinados, na medida em que há uma redução do ângulo de incidência da radiação (contado a partir da normal da superfície) e uma consequente elevação da irradiância na cobertura de vidro. Além disso, a inclinação do canal da chaminé ocasiona um aquecimento mais uniforme do ar no interior do canal, aumentando o fluxo de ar (ADAM, 2003).

Um dos primeiros trabalhos a avaliar a influência da inclinação da chaminé sobre seu desempenho foi o artigo de Bansal, Mathur e Bhandari (1993). Para tal avaliação, os autores desenvolveram um modelo matemático em regime térmico estacionário, considerando diferentes tamanhos de abertura da chaminé, para as condições climáticas da cidade de Jaipur, Índia ($26^{\circ}53'$ latitude Norte). Os melhores resultados indicaram um fluxo de ar de $331\text{m}^3/\text{h}$ para um coletor solar de $2,25\text{m}^2$, $0,15\text{m}$ de espessura do canal de ar, 30° de inclinação entre o coletor e a horizontal e $1000\text{W}/\text{m}^2$ de irradiância solar no plano do vidro (Figura 6.4).

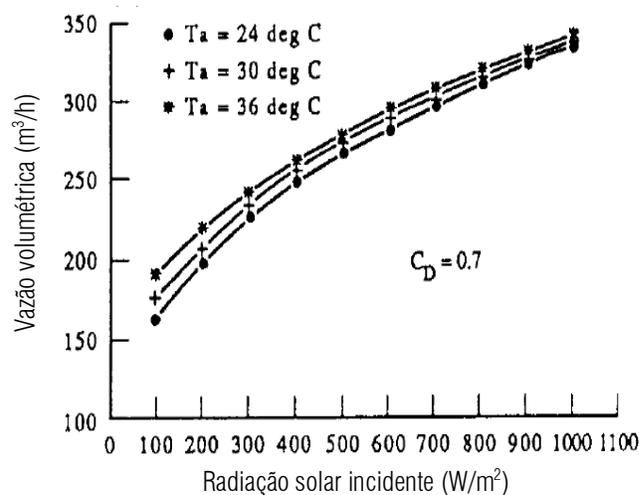


Figura 6.4: Resultados obtidos por Bansal, Mathur e Bhandari (1993) para chaminé inclinada

Tabela 6.1: Inclinação ótima da chaminé solar com a latitude (MATHUR, MATHUR e ANUPMA, 2006)

Latitude ($^{\circ}$)	Inclinação ótima da chaminé solar ($^{\circ}$)
0	55
5	50
10	50
15	50
20	45
25	45
30	45
35	50
40	50
45	55
50	55
55	60
60	60
65	60

Também na Índia, Mathur, Mathur e Anupma (2006) usaram métodos experimentais e teóricos para investigar os efeitos do ângulo de inclinação do coletor na taxa de ventilação de uma chaminé solar. Os resultados mostraram um ângulo ótimo de inclinação do coletor variando entre 45° e 60° , dependendo da latitude (Tabela 6.1). O modelo teórico estimou uma velocidade média do ar de $0,18\text{m}/\text{s}$, para uma chaminé de seção transversal de $1,0\text{m} \times 0,35\text{m}$, a 45° de inclinação, submetida a uma irradiância solar de $750\text{W}/\text{m}^2$ e à temperatura do ar exterior de $39,9^{\circ}\text{C}$.

Bassiouny e Korah (2009) observaram um efeito notável da inclinação da chaminé solar no padrão de fluxo de ar interno, através de simulações CFD (Figura 6.5). Os estudos teóricos mostraram ângulos de inclinação ótimos entre 45° e 75° com a horizontal, para uma latitude de $28,4^{\circ}$ Norte. Foi encontrada uma correlação entre trocas de ar no interior da chaminé e intensidade de radiação solar, largura da chaminé e ângulo de inclinação, com limitações de intensidade de radiação maior ou igual a $500\text{W}/\text{m}^2$ e canal para fluxo de ar entre $0,10$ e $0,35\text{m}$ de espessura (Equação 6.1). A correlação obteve um erro médio de 20% , em relação aos dados experimentais apresentados por Mathur, Mathur e Anupma (2006).

$$Nr = 0,795 \cdot (\text{sen}(\theta))^{0,3189} \cdot I^{0,3818} \cdot L^{0,1658} \tag{Eq. 6.1}$$

Sendo:

- Nr Número de renovações de ar por hora no interior da chaminé
- θ Ângulo de inclinação da chaminé, contado a partir da horizontal (°)
- I Irradiância solar no plano do vidro (W/m²)
- L Largura da chaminé (m)

Adam (2003) afirma que a camada limite no interior do canal aumenta quando a inclinação do coletor é reduzida, o que influencia diretamente nas perdas de carga por atrito, e, conseqüentemente, no fluxo de ar proporcionado pela chaminé.

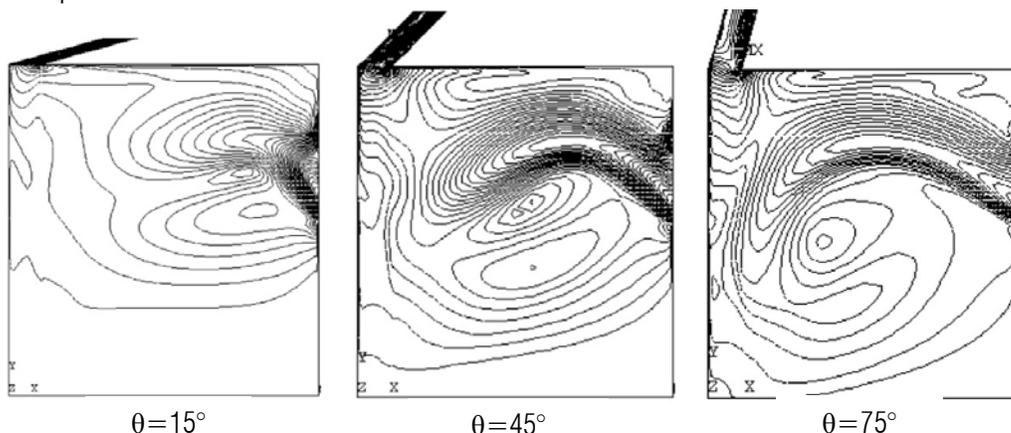


Figura 6.5: Resultados obtidos por Bassiouny e Korah (2009) para variação no padrão do fluxo de ar em função da inclinação da chaminé

6.1.2 Propriedades físicas de materiais e superfícies

Khanal e Lei (2011) evidenciam a importância das características térmicas da superfície da placa absorvedora no desempenho de uma chaminé solar. Estudos realizados através de simulação computacional por Lee e Strand (2009) comprovaram um aumento de cerca de 37% na absorção da radiação solar, ao aumentar a absorptância solar de uma placa absorvedora de 0,25 para 1,0. Essa melhoria correspondeu a um aumento no fluxo de ar da chaminé de 42% a 57%, dependendo da localização da edificação (Figura 6.6).

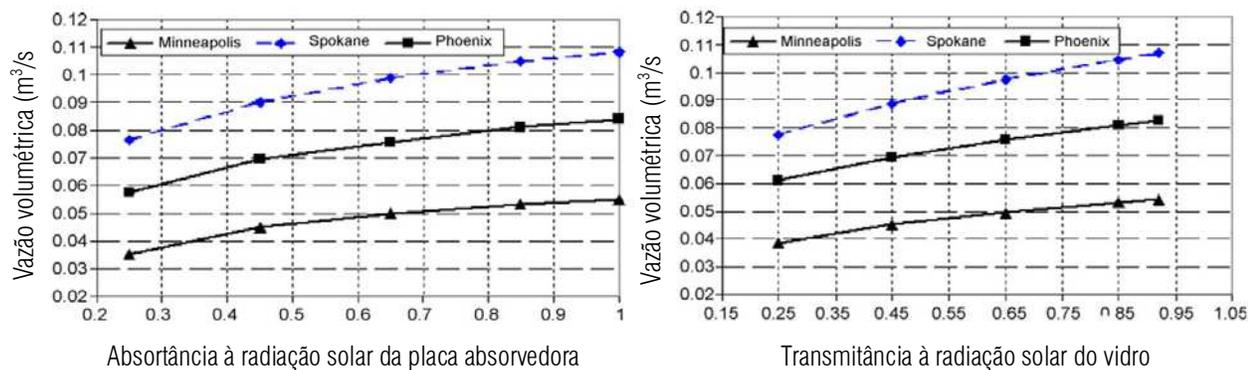


Figura 6.6: Resultados obtidos por Lee e Strand (2009) em função da placa absorvedora e do vidro

As propriedades físicas da cobertura de vidro do coletor solar também podem interferir significativamente no desempenho do sistema. Lee e Strand (2009) testaram o uso de vidro com transmitância à radiação solar variando entre 0,25 e 0,92 e obtiveram aumentos na taxa de ventilação entre 36% e 40% (Figura 6.6). Um possível problema advindo da cobertura de vidro é o acúmulo de sujeira sobre sua superfície, o que pode reduzir a transmitância à radiação solar. O uso de um vidro autolimpante pode atenuar o problema. A utilização de vidros de baixa emissividade pode auxiliar na redução da perda de calor através do vidro e, conseqüentemente, na melhoria da eficiência do sistema.

6.2 Análise paramétrica: materiais e métodos

Após conclusão do processo de calibração dos modelos teóricos (capítulo 5), foi selecionada a simulação computacional no programa EnergyPlus como ferramenta para o desenvolvimento da análise paramétrica. Esta análise consistiu na previsão de desempenho em ventilação de diferentes configurações geométricas e construtivas de chaminés solares, aplicadas às condições climáticas e geográficas de uma cidade representativa de cada zona bioclimática brasileira (ABNT, 2005) (Tabela 6.2).

Os programas Architectural Bioclimatic Classification (ABC, versão 1.3) e Analysis Bio (versão 2.1.3) foram utilizados para a verificação da necessidade de ventilação natural como estratégia bioclimática para cada cidade, em porcentagem de horas durante um ano (Tabela 6.2). Tais programas são baseados na carta bioclimática proposta por Givoni (1992), onde os limites máximos de conforto foram expandidos, considerando a aclimação de pessoas que vivem em países de clima quente.

Tabela 6.2: Cidades representativas do zoneamento bioclimático brasileiro

Zona bioclimática	Cidade	Latitude	Recomendações de ventilação natural (% do ano)
ZB1	Curitiba, PR	25°31'S	1,5% (janeiro a março)
ZB2	Santa Maria, RS	29°42'S	4,2% (janeiro a março)
ZB3	Florianópolis, SC	27°42'S	20,7% (novembro a abril)
ZB4	Brasília, DF	15°54'S	4,7% (novembro a março)
ZB5	Santos, SP	23°54'S	27% (outubro a abril)
ZB6	Campo Grande, MS	20°30'S	14,1% (novembro a abril)
ZB7	Petrolina, PE	9°24'S	32,9% (outubro a junho)
ZB8	Belém, PA	1°24'S	70,7% (ano todo)

Os arquivos climáticos utilizados nas simulações foram elaborados com base nas séries históricas de dados climáticos medidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMet), do período de 2000 a 2010. Foram, primeiramente, identificados os anos típicos (*Test Reference Year*) de cada cidade e depois calculados os dias típicos para o solstício de verão (22/12), com base em dados de temperatura de bulbo seco (TBS), umidade relativa do ar e radiação direta e difusa incidentes no plano horizontal (Tabela 6.3). Em todos os casos, considerou-se o vento com velocidade nula, de forma a verificar o desempenho isolado do efeito chaminé.

Tabela 6.3: Resumo dos dados climáticos das cidades selecionadas

Cidade	TBS máxima (°C)	TBS mínima (°C)	Umidade relativa máxima (%)	Umidade relativa mínima (%)	Irradiância solar global máxima (W/m ²)
Curitiba, PR	25,4	15,4	94	68	650
Santa Maria, RS	29,5	18,3	84	56	888
Florianópolis, SC	26,6	20,3	92	71	738
Brasília, DF	26,2	17,5	89	65	637
Santos, SP	27,0	20,1	94	73	717
Campo Grande, MS	29,8	20,4	93	68	711
Petrolina, PE	33,1	22,5	68	41	762
Belém, PA	31,9	22,0	97	73	731

6.2.1 Cálculo da inclinação da chaminé solar para máxima irradiância

Sabe-se, que, em baixas latitudes, coletores solares com menores ângulos de inclinação em relação à horizontal recebem com maior intensidade a radiação solar. Em vista disso, calculou-se a inclinação ideal do coletor solar para máxima irradiância no plano de vidro do coletor solar, para o meio dia do solstício de verão (22/12), em cada uma das cidades selecionadas para análise (Tabela 6.4). Para evitar que o coletor ficasse na horizontal, o que poderia prejudicar a ascensão do ar no interior do canal, adotou-se um ângulo mínimo de inclinação de 10° em relação ao plano horizontal. As cidades localizadas acima do trópico de Capricórnio tiveram os coletores voltados para o Sul e as cidades abaixo do trópico tiveram os coletores voltados para o Norte.

Tabela 6.4: Inclinação ideal do coletor para máxima irradiância, para as cidades selecionadas

Zona bioclimática	Cidade	Latitude	Ângulo ótimo de inclinação com a horizontal (22/12 às 12h)
ZB1	Curitiba, PR	25°31'S	10°N
ZB2	Santa Maria, RS	29°42'S	10°N
ZB3	Florianópolis, SC	27°42'S	10°N
ZB4	Brasília, DF	15°54'S	10°S
ZB5	Santos, SP	23°54'S	10°N
ZB6	Campo Grande, MS	20°30'S	10°S
ZB7	Petrolina, PE	9°24'S	15°S
ZB8	Belém, PA	1°24'S	25°S

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

A inclinação da chaminé solar para máximo fluxo de ar corresponde ao melhor ângulo de inclinação da chaminé visando elevar o gradiente de pressão em seu interior e, conseqüentemente, aumentar o fluxo de ar. O cálculo deve ser realizado considerando um balanço entre a radiação solar incidente na cobertura de vidro e a diferença de altura entre as aberturas de entrada e saída do ar.

Para identificar qual seria o melhor ângulo de inclinação do coletor solar para máximo fluxo de ar, foram simuladas 14 configurações geométricas de chaminés, com variação no ângulo de inclinação da chaminé entre 10° e 75°, em relação ao plano horizontal. As chaminés possuíam 2m de comprimento, 1m de largura e 0,3m de espessura do canal de ar. A irradiância solar global sobre o plano horizontal foi mantida constante, no valor de 870W/m², ao meio dia. Conforme variou a inclinação da chaminé, variou, conseqüentemente, a distância vertical entre as aberturas de entrada e saída do ar e a diferença de temperatura entre o ar no canal e o ar externo. A variação na inclinação da chaminé e a correspondente diferença de altura entre as aberturas de entrada e saída do ar são apresentadas na Tabela 6.5.

Tabela 6.5: Configurações analisadas de inclinação do coletor solar

Ângulo de inclinação da chaminé	Distância vertical entre aberturas de entrada e saída do ar (Δh)
10°	0,35m
15°	0,52m
20°	0,68m
25°	0,85m
30°	1,00m
35°	1,15m
40°	1,29m
50°	1,53m
55°	1,64m
60°	1,73m
65°	1,81m
70°	1,88m
75°	1,93m

De acordo com Marques da Silva (2003), o uso da aproximação de Boussinesq em conjunto com a lei dos gases perfeitos permite que o gradiente de pressão de origem térmica entre dois pontos em diferentes alturas seja expresso, aproximadamente, pela seguinte equação:

$$\Delta P^T \approx 0,0021 \cdot \Delta z \cdot \Delta T \quad \text{Eq. 6.2}$$

Onde:

- ΔP^T = Gradiente de pressão de origem térmica (Pa)
- Δz = Distância vertical entre aberturas de entrada e saída do ar (m)
- ΔT = Diferença de temperatura entre o ar no canal e o ar externo (°C)

Aplicando-se a Equação 6.2 sobre os resultados das simulações, verificou-se que a chaminé com ângulo de inclinação de 50° resultou em um gradiente máximo de pressão térmica dentro da chaminé e, conseqüentemente, em uma vazão máxima (Figura 6.7).

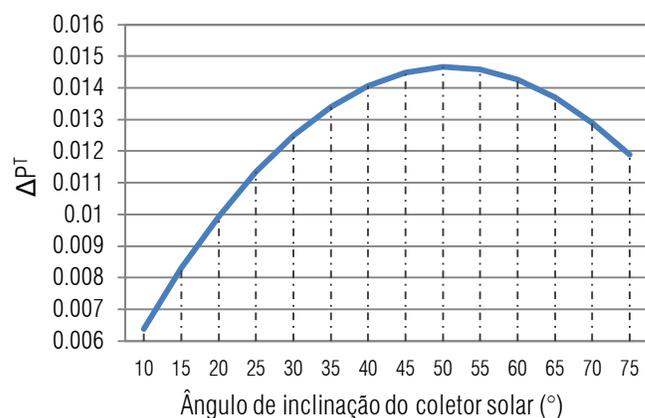


Figura 6.7: Ensaios de inclinação do coletor e gradiente de pressão resultante

6.2.3 Parâmetros de projeto analisados

A análise paramétrica consistiu na variação de alguns parâmetros de projeto pré-selecionados, de forma a verificar seus efeitos sobre o desempenho em fluxo de ar da chaminé solar. Foi escolhida uma configuração base para o sistema, através da adoção de valores padrão (Tabela 6.6). O coletor solar foi modelado como uma caixa simples, com o absorvedor em contato direto com o isolamento térmico da base (sem aletas). Para a análise das diferentes configurações, houve modificação de apenas um parâmetro por vez, de modo a determinar a sensibilidade do sistema para cada parâmetro isoladamente.

Tabela 6.6: Configuração base da chaminé solar utilizada na análise paramétrica

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

A escolha dos parâmetros analisados baseou-se em características indicadas, na literatura especializada, como significativas para o desempenho de uma chaminé solar (Tabela 6.7). Para simular apropriadamente a geometria de uma chaminé solar acoplada a uma edificação, foi necessário adicionar um segmento vertical, responsável por conectar a chaminé ao ambiente. A análise foi desenvolvida para diferentes valores de cada parâmetro, sendo a quantidade de valores selecionados dependente do parâmetro analisado.

Tabela 6.7: Descrição dos parâmetros e valores utilizados nas simulações

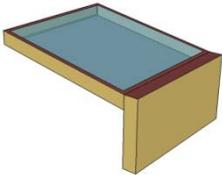
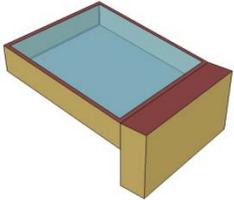
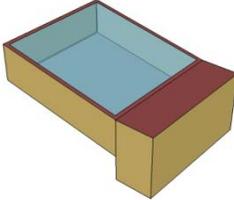
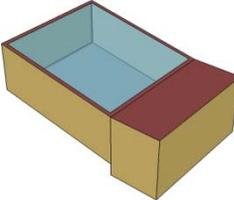
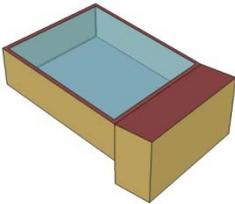
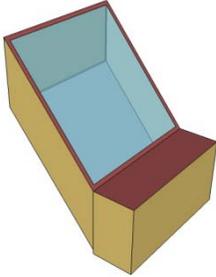
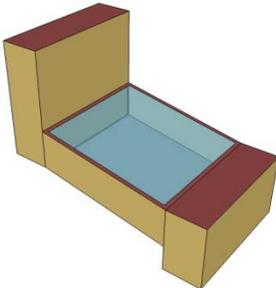
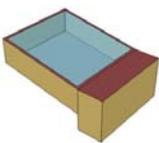
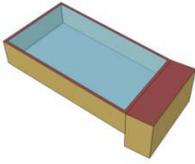
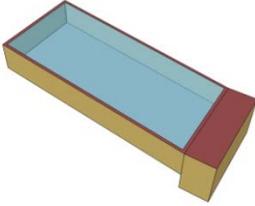
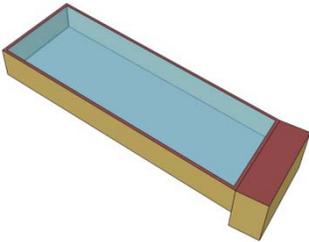
Parâmetro 1	Espessura do canal de ar			
Justificativa	Tem grande influência na vazão volumétrica da chaminé solar, pois é diretamente relacionada com o volume da chaminé e sua área de abertura. Por outro lado, canais muito espessos estão susceptíveis à ocorrência de fluxo reverso.			
Valores analisados	Analisam-se aqui espessuras do canal de ar de 0,10m a 0,40m, com variação em intervalos de 0,05m.			
Imagens				
	0,10m	0,20m	0,30m	0,40m
Parâmetro 2	Inclinação do coletor solar			
Justificativa	No Brasil, o uso de coletores solares com inclinação ideal para máxima irradiância podem resultar em uma diferença significativa de irradiância solar sobre o plano de vidro do coletor. No entanto, o uso de coletores com inclinação próxima à horizontal ocasiona uma perda na diferença de altura entre as aberturas de entrada e saída do ar. Como alternativa para solucionar o problema, propõe-se o uso de um extensor vertical acoplado à chaminé, de modo a garantir uma diferença de altura constante entre as aberturas, independentemente da inclinação do coletor solar. Por outro lado, sabe-se que o ângulo de inclinação ideal da chaminé solar para máximo fluxo de ar é de 50°, considerando-se os gradientes de pressão em seu interior.			
Valores analisados	Analisam-se aqui, para cada cidade selecionada, as seguintes configurações: <ul style="list-style-type: none"> • Inclinação para máxima irradiância, variando conforme a cidade (conforme item 6.2.1). • Inclinação para máximo fluxo de ar, de 50° (conforme item 6.2.2). • Inclinação para máxima irradiância, com extensor que garanta uma diferença de altura entre aberturas equivalente à chaminé de 50° de inclinação. 			
Imagens				
	Inclinação para máxima irradiância (exemplo de Brasília)	Inclinação para máximo fluxo de ar (50°)	Inclinação para máxima irradiância com extensor (exemplo de Brasília)	

Tabela 6.7 (continuação): Descrição dos parâmetros e valores utilizados nas simulações

Parâmetro 3	Comprimento da chaminé			
Justificativa	O aumento no comprimento da chaminé ocasiona um aumento na área de absorção da radiação solar e na área de transferência de calor entre a placa coletora e o ar. Consequentemente, provoca um incremento na vazão volumétrica do sistema.			
Valores analisados	Analisam-se aqui chaminés solares com comprimento entre 1,0m e 2,5m, com variação em intervalos de 0,5m.			
Imagens	 1,0m	 1,5m	 2,0m	 2,5m
Parâmetro 4	Tipo de vidro utilizado no coletor solar			
Justificativa	Tem relação direta tanto na quantidade de energia solar absorvida pela placa absorvedora como na quantidade de calor perdido por condução e convecção através do vidro.			
Valores analisados	Analisam-se aqui dois tipos de vidro: vidro incolor comum ($\epsilon_v=0,84$ e $\tau_v=0,84$) e vidro de baixa emissividade ($\epsilon_v=0,20$ e $\tau_v=0,84$).			

Os resultados obtidos na análise paramétrica são apresentados na forma de gráficos comparativos, incluindo dados de diferença de temperatura entre o ar no canal da chaminé e o ar externo (ΔT) e de vazão volumétrica no canal (Q), de forma a destacar as configurações de melhor desempenho. Incluem-se também análises por regressão linear múltipla, de modo a encontrar correlações de interesse entre as variáveis e determinar equações para estimar o desempenho em vazão da chaminé solar, a partir de algumas variáveis selecionadas.

6.2.4 Cálculo da perda de carga da instalação

Para cada configuração de chaminé analisada (Tabela 6.7), as resistências locais dos canais de ar foram calculadas através dos coeficientes de perda de carga (ζ) e os valores obtidos foram utilizados como dados de entrada nas simulações computacionais.

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

- Seções curvas: cálculo do ângulo de curvatura do canal, da razão entre o raio de curvatura médio do

canal e o diâmetro hidráulico da chaminé (Equação 4.5)¹ e da razão entre altura e largura da seção da chaminé (método gráfico).

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

Para determinação do número de Reynolds, foram utilizados resultados obtidos no monitoramento experimental. Tais resultados indicaram valores entre 1400 e 4000, demonstrando uma variação entre fluxo laminar e turbulento. Em vista disso, as perdas de carga foram calculadas, caso a caso, para os intervalos de fluxo laminar e turbulento e, posteriormente, uma média entre os dois valores foi obtida. Para aplicação dos dados nas simulações, os coeficientes de perda de carga foram utilizados para calcular os coeficientes de descarga, através da Equação 4.6². Os valores resultantes são apresentados na Tabela 6.8, para cada configuração de chaminé analisada.

Tabela 6.8: Cálculo das perdas de carga das configurações de chaminé analisadas

Configuração da chaminé solar (conforme Tabela 6.6)		ζ fluxo laminar	ζ fluxo turbulento	ζ médio	Cd	
Parâmetro 1	e=0,10m	1,87	1,83	1,85	0,74	
	e=15cm	1,62	1,58	1,60	0,79	
	e=0,20m	1,43	1,41	1,42	0,84	
	e=0,25m	1,35	1,33	1,34	0,86	
	e=0,30m	1,29	1,27	1,28	0,88	
	e=0,35m	1,27	1,24	1,25	0,89	
	e=0,40m	1,24	1,22	1,23	0,90	
Parâmetro 2	$\theta=10^\circ$	sem extensor	1,29	1,27	1,28	0,88
		com extensor	1,68	1,65	1,66	0,83
	$\theta=15^\circ$	sem extensor	1,26	1,25	1,26	0,89
		com extensor	1,62	1,61	1,62	0,84
	$\theta=25^\circ$	sem extensor	1,24	1,23	1,23	0,90
		com extensor	1,58	1,56	1,57	0,85
$\theta=50^\circ$	sem extensor	1,18	1,16	1,17	0,92	
Parâmetro 3	C=1,0m	1,29	1,27	1,28	0,88	
	C=1,5m	1,30	1,28	1,29	0,88	
	C=2,0m	1,32	1,30	1,31	0,87	
	C=2,5m	1,33	1,31	1,32	0,87	
Parâmetro 4	Vidro incolor comum	1,29	1,27	1,28	0,88	
	Vidro de baixa emissividade	1,29	1,27	1,28	0,88	

$$^1 D_H = \frac{2 \cdot L \cdot e}{L + e}$$

$$^2 Cd = \frac{1}{\sqrt{\zeta}}$$

6.2.5 Comparação entre uma chaminé solar e uma chaminé convencional

A chaminé solar de configuração para máximo fluxo de ar (50° de inclinação) foi selecionada para realização de uma análise comparativa de desempenho em ventilação com uma chaminé convencional, ambas com as mesmas características geométricas (1m de comprimento, 1m de largura, 0,30m de espessura do canal de ar e 50° de inclinação) e a mesma diferença de altura entre as aberturas de entrada e saída de ar (Figura 6.8). Assume-se aqui uma chaminé convencional como sendo uma chaminé desprovida de coletor para captação da energia solar, ou seja, sem a cobertura de vidro, a placa coletora e o isolamento térmico na face externa.

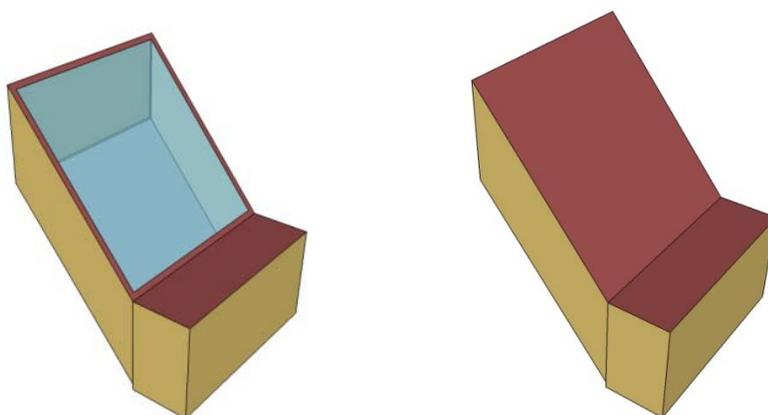


Figura 6.8: Chaminé solar e chaminé convencional

6.3 Resultados obtidos na análise paramétrica

6.3.1 Resultados da variação na espessura do canal de ar

Analisa-se aqui a variação na espessura do canal de ar de uma chaminé solar, de modo a identificar o valor ideal para máximo fluxo de ar, em cada cidade representativa do zoneamento bioclimático brasileiro. A Figura 6.9 apresenta os resultados de vazão volumétrica e a Figura 6.10 apresenta os resultados de diferença de temperatura entre o ar no canal e o ar externo, para as 12h do solstício de verão.

O fluxo de ar na chaminé mostrou-se fortemente dependente da espessura do canal, pois um canal mais profundo permite uma maior área de abertura para passagem do ar e uma menor perda por atrito, resultando em uma maior vazão. Por outro lado, em canais muito espessos há uma redução na eficiência do aquecimento do ar dentro do coletor, podendo inclusive ocorrer uma inversão no sentido do fluxo (o ar passa a entrar pela saída da chaminé).

Pela Figura 6.9, pode-se notar a existência de uma espessura ótima do canal para cada cidade analisada. Quando a espessura ótima é excedida, há uma estabilização do fluxo de ar no interior da chaminé. Para todos os casos, estabeleceu-se um valor limite de 0,40m de espessura, de modo a evitar a ocorrência de fluxo reverso no canal.

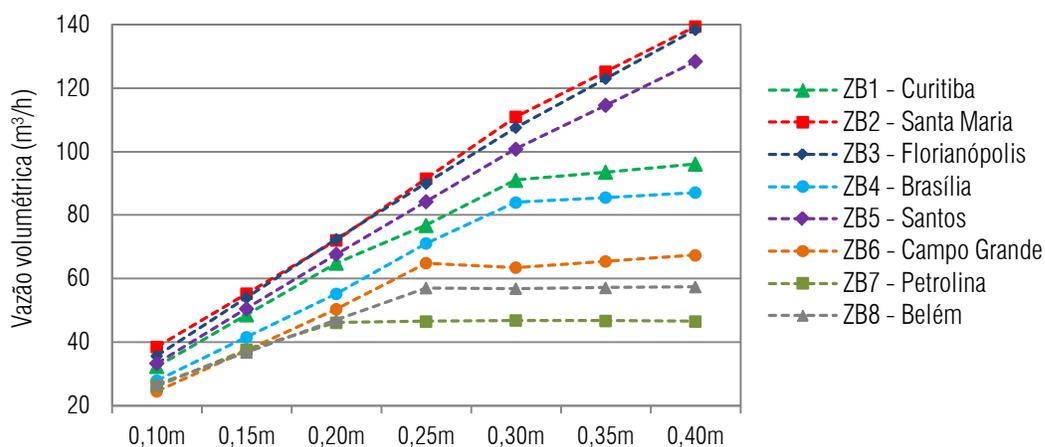


Figura 6.9: Variação na espessura do canal – Q (m³/h)

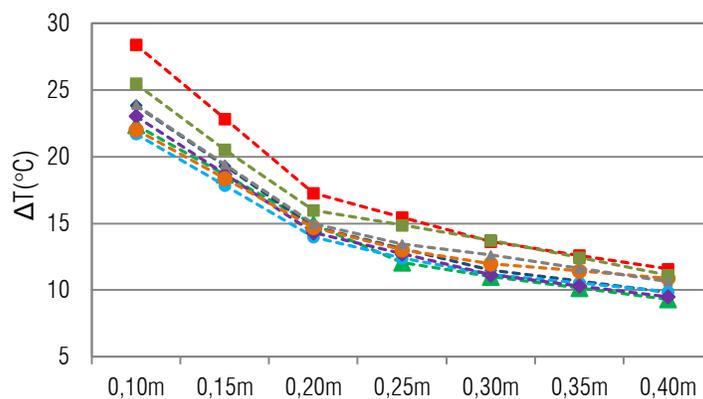


Figura 6.10: Variação na espessura do canal – ΔT (°C)

Para o caso de Curitiba, por exemplo, o aumento da espessura do canal da chaminé de 0,10m para 0,30m resultou em uma queda de até 11,4°C na temperatura do ar no canal (Figura 6.10). Uma das razões para esta queda está no fato do aumento na espessura do canal ocasionar uma redução no aquecimento do ar por convecção. Em contrapartida, houve um incremento médio de 42m³/h na vazão volumétrica durante o período diurno, chegando a 64m³/h de incremento no horário de pico, ao meio dia (Figura 6.9). Já o aumento da espessura do canal de 0,30m para 0,40m não ocasionou um incremento significativo na vazão.

Os resultados, por cidade, de irradiância solar no plano do coletor ao meio dia, espessura ótima do canal e vazão volumétrica correspondente apresentam-se na Tabela 6.9.

Tabela 6.9: Resultados de desempenho para a espessura ótima do canal de ar da chaminé solar, por cidade

Cidade	Irradiância solar no plano do coletor (22/12 às 12h)	Espessura ótima do canal (m)	Vazão volumétrica correspondente (m³/h)
ZB1 - Curitiba, PR	646	0,30	91
ZB2 - Santa Maria, RS	881	0,40	140
ZB3 - Florianópolis, SC	735	0,40	139
ZB4 - Brasília, DF	640	0,30	84
ZB5 - Santos, SP	712	0,40	129
ZB6 - Campo Grande, MS	702	0,25	65
ZB7 - Petrolina, PE	773	0,20	46
ZB8 - Belém, PA	733	0,25	57

A partir dos resultados da simulação, foram desenvolvidas análises por regressão, de modo a encontrar uma equação para estimativa da vazão volumétrica da chaminé solar, para cada cidade selecionada. Foram encontradas correlações entre a vazão volumétrica e as seguintes variáveis: temperatura superficial do vidro (T_v), temperatura do ar no canal da chaminé (T_c), diferença de temperatura entre o ar no canal e o ar externo (ΔT) e espessura do canal de ar (e). A equação resultante (Equação 6.3) é aplicável apenas para intervalos de espessura que não excedam a espessura ótima, determinada na Tabela 6.9.

$$Q = A_1 \cdot T_v + A_2 \cdot T_c + A_3 \cdot \Delta T + A_4 \cdot e + B \quad \text{Eq. 6.3}$$

Seguem, abaixo, os valores das constantes da Equação 6.3 para cada cidade e uma figura relacionando os valores obtidos por simulação com os obtidos por regressão. A partir da aplicação da equação, pode-se ter uma estimativa inicial da vazão volumétrica proporcionada pela chaminé solar.

- ZB1 – Curitiba (Equação 6.3):

- $A_1 =$ Constante (valor= 12,01096)
- $A_2 =$ Constante (valor= -21,36369)
- $A_3 =$ Constante (valor= 11,61552)
- $A_4 =$ Constante (valor= 190,73131)
- $e =$ Espessura do canal de ar (variável de 0,10m a 0,30m)
- $B =$ Constante (valor= 256,34404)

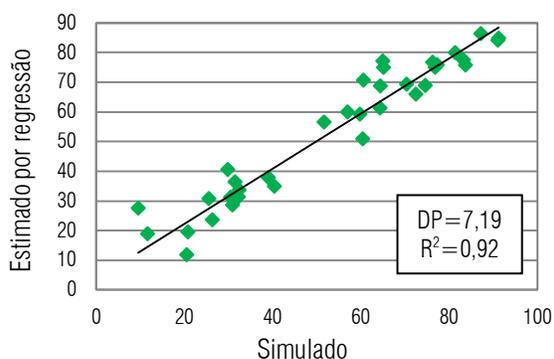


Figura 6.11: Análise por regressão da profundidade do canal - Curitiba

- ZB2 – Santa Maria (Equação 6.3):
 - $A_1 =$ Constante (valor= 11,82442)
 - $A_2 =$ Constante (valor= -19,47142)
 - $A_3 =$ Constante (valor= 8,8462)
 - $A_4 =$ Constante (valor= 170,2587)
 - $e =$ Espessura do canal de ar (variável de 0,10m a 0,40m)
 - $B =$ Constante (valor= 252,03029)

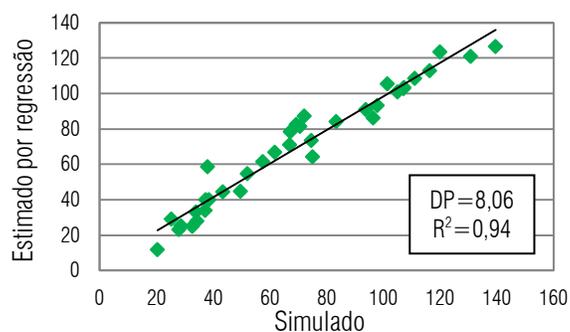


Figura 6.12: Análise por regressão da profundidade do canal – Santa Maria

- ZB3 – Florianópolis (Equação 6.3):
 - $A_1 =$ Constante (valor= 12,44111)
 - $A_2 =$ Constante (valor= -18,25891)
 - $A_3 =$ Constante (valor= 7,14228)
 - $A_4 =$ Constante (valor= 170,61207)
 - $e =$ Espessura do canal de ar (variável de 0,10m a 0,40m)
 - $B =$ Constante (valor= 204,10163)

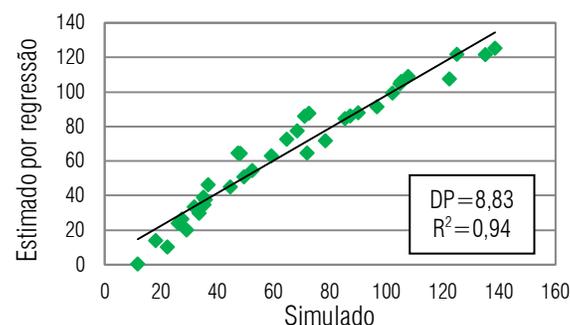


Figura 6.13: Análise por regressão da profundidade do canal – Florianópolis

- ZB4 – Brasília (Equação 6.3):
 - $A_1 =$ Constante (valor= 14,74694)
 - $A_2 =$ Constante (valor= -25,008)
 - $A_3 =$ Constante (valor= 12,61193)
 - $A_4 =$ Constante (valor= 71,87709)
 - $e =$ Espessura do canal de ar (variável de 0,10m a 0,30m)
 - $B =$ Constante (valor= 326,09446)

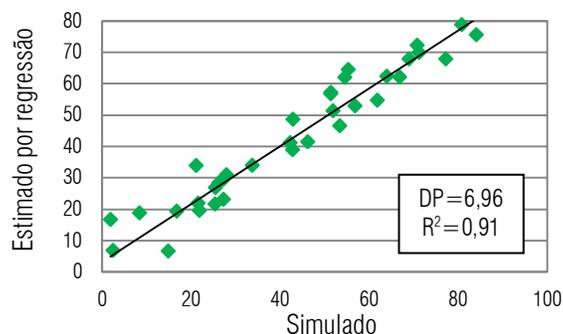


Figura 6.14: Análise por regressão da profundidade do canal – Brasília

- ZB5 – Santos (Equação 6.3):
 - $A_1 =$ Constante (valor= 11,35799)
 - $A_2 =$ Constante (valor= -17,51909)
 - $A_3 =$ Constante (valor= 7,63479)
 - $A_4 =$ Constante (valor= 177,92139)
 - $e =$ Espessura do canal de ar (variável de 0,10m a 0,40m)
 - $B =$ Constante (valor= 205,45483)

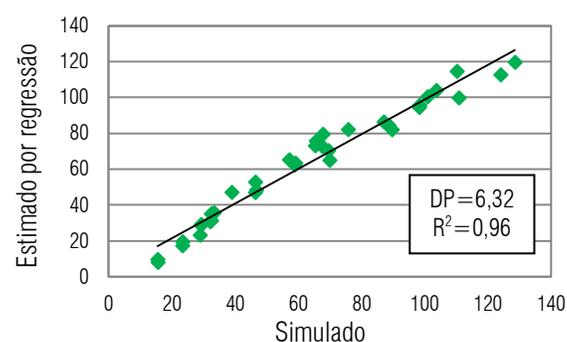


Figura 6.15: Análise por regressão da profundidade do canal – Santos

- ZB6 – Campo Grande (Equação 6.3):
 - $A_1 =$ Constante (valor= 15.40842)
 - $A_2 =$ Constante (valor= -23.70934)
 - $A_3 =$ Constante (valor= 10.01091)
 - $A_4 =$ Constante (valor= -29.50266)
 - $e =$ Espessura do canal de ar (variável de 0,10m a 0,25m)
 - $B =$ Constante (valor= 321.45569)

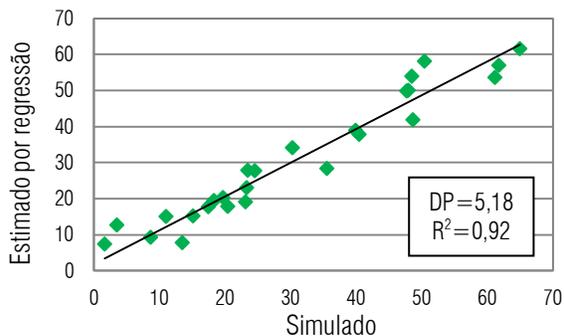


Figura 6.16: Análise por regressão da profundidade do canal – Campo Grande

- ZB7 – Petrolina (Equação 6.3):
 - $A_1 =$ Constante (valor= 4,15468)
 - $A_2 =$ Constante (valor= -7,30945)
 - $A_3 =$ Constante (valor= 4,84673)
 - $A_4 =$ Constante (valor= 55,96366)
 - $e =$ Espessura do canal de ar (variável de 0,10m a 0,20m)
 - $B =$ Constante (valor= 98,34774)

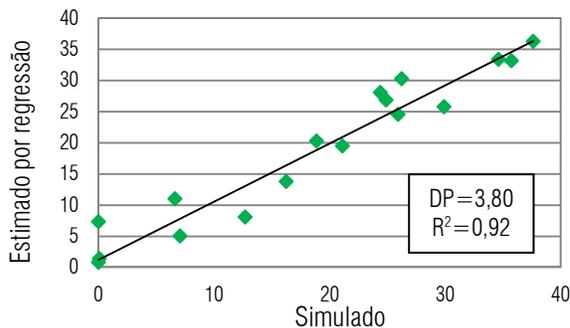


Figura 6.17: Análise por regressão da profundidade do canal – Petrolina

- ZB8 – Belém (Equação 6.3):
 - $A_1 =$ Constante (valor= 11,55423)
 - $A_2 =$ Constante (valor= -18,00039)
 - $A_3 =$ Constante (valor= 8,65659)
 - $A_4 =$ Constante (valor= 66,29933)
 - $e =$ Espessura do canal de ar (variável de 0,10m a 0,25m)
 - $B =$ Constante (valor= 224,77605)

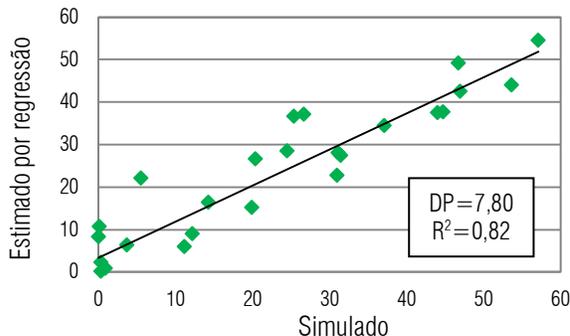


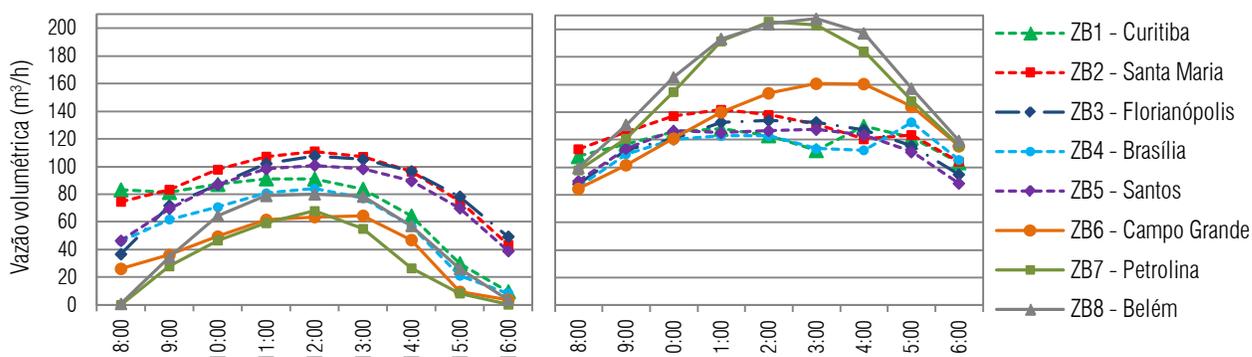
Figura 6.18: Análise por regressão da profundidade do canal – Belém

6.3.2 Resultados da variação na inclinação do coletor solar

A análise de variação na inclinação do coletor solar da chaminé foi realizada considerando características de projeto específicas para cada cidade. Primeiramente, foi realizada uma comparação de desempenho entre uma chaminé com inclinação ideal para máxima irradiância no plano do coletor com uma chaminé de mesma configuração, mas provida de um extensor vertical, de forma a aumentar a diferença de altura entre as aberturas de entrada e saída do ar. O extensor vertical foi projetado visando manter uma diferença de altura entre as aberturas semelhante à obtida com uma chaminé de 50° de inclinação (Tabela 6.10). Os resultados de vazão volumétrica apresentam-se nas Figuras 6.19 e 6.20.

Tabela 6.10: Inclinação ideal do coletor para máxima irradiância e altura do extensor vertical, para as cidades selecionadas

Cidade	Inclinação para máxima irradiância (22/12 às 12h)	Altura do extensor (m)
ZB1 - Curitiba, PR	10°N	0,60
ZB2 - Santa Maria, RS	10°N	0,60
ZB3 - Florianópolis, SC	10°N	0,60
ZB4 - Brasília, DF	10°S	0,60
ZB5 - Santos, SP	10°N	0,60
ZB6 - Campo Grande, MS	10°S	0,60
ZB7 - Petrolina, PE	15°S	0,50
ZB8 - Belém, PA	25°S	0,35

**Figura 6.19:** Chaminé inclinada para máxima irradiância, sem extensor – Q (m³/h)**Figura 6.20:** Chaminé inclinada para máxima irradiância, com extensor – Q (m³/h)**Tabela 6.11:** Chaminé inclinada para máxima irradiância, com extensor x sem extensor - resultados de vazão volumétrica

Cidade	Média diária de vazão volumétrica - 8 às 16h (m³/h)	
	Chaminé sem extensor	Chaminé com extensor
ZB1 - Curitiba, PR	69,0	118,7
ZB2 - Santa Maria, RS	88,4	126,1
ZB3 - Florianópolis, SC	81,6	117,6
ZB4 - Brasília, DF	56,3	113,9
ZB5 - Santos, SP	77,7	114,7
ZB6 - Campo Grande, MS	40,1	131,3
ZB7 - Petrolina, PE	32,4	158,0
ZB8 - Belém, PA	47,1	163,8

Pode-se observar, em todos os casos, um aumento significativo no fluxo de ar da chaminé solar, resultante do uso do extensor vertical. Os maiores incrementos ocorreram nas cidades localizadas mais próximas à linha do Equador, das zonas bioclimáticas 4, 6, 7 e 8. Para estes casos, a diferença de desempenho em vazão ficou acima de 100%, considerando a média diária do período diurno. Para as cidades restantes, a diferença de

desempenho variou entre 40% e 70% (Tabela 6.11).

A segunda comparação de desempenho foi entre uma chaminé com inclinação ideal para máximo fluxo de ar (50° de inclinação, conforme calculado no item 6.2.2) com uma chaminé com inclinação ideal para máxima irradiância no plano do coletor, provida de extensor vertical. As duas configurações possuíam mesma diferença de altura entre as aberturas de entrada e saída do ar. Os resultados de vazão volumétrica apresentam-se nas Figuras 6.21 e 6.22.

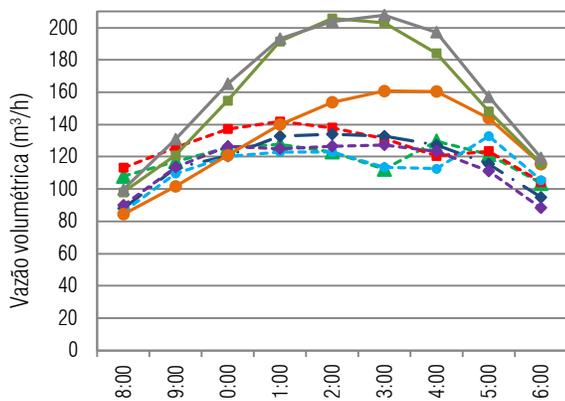


Figura 6.21: Chaminé inclinada para máxima irradiância, com extensor – Q (m³/h)

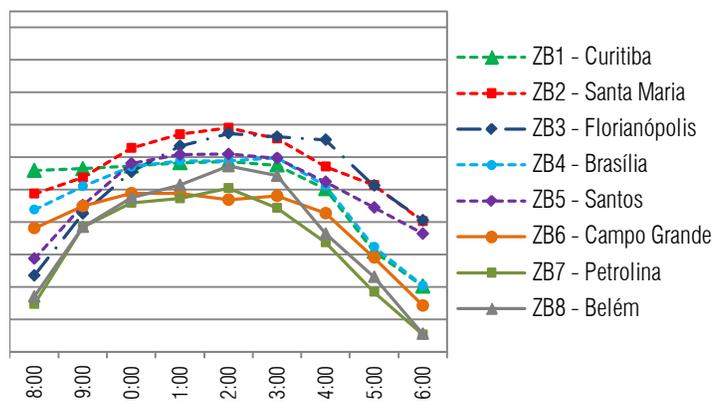


Figura 6.22: Chaminé inclinada para máximo fluxo de ar – Q (m³/h)

Tabela 6.12: Chaminé inclinada para máxima irradiância, com extensor x chaminé inclinada para máximo fluxo de ar - resultados de vazão volumétrica

Cidade	Média diária de vazão volumétrica - 8 às 16h (m ³ /h)	
	Chaminé inclinada para máxima irradiância, com extensor	Chaminé inclinada para máximo fluxo de ar
ZB1 - Curitiba, PR	118,7	98,9
ZB2 - Santa Maria, RS	126,1	114,6
ZB3 - Florianópolis, SC	117,6	105,7
ZB4 - Brasília, DF	113,9	96,2
ZB5 - Santos, SP	114,7	99,2
ZB6 - Campo Grande, MS	131,3	80,3
ZB7 - Petrolina, PE	158,0	66,3
ZB8 - Belém, PA	163,8	73,4

Para as cidades localizadas nas zonas bioclimáticas 1 a 5, pode-se observar um fluxo de ar bastante semelhante para as duas configurações analisadas, ao longo do dia. O melhor desempenho oscilou entre uma configuração e outra, hora a hora. No entanto, considerando a média diária de vazão volumétrica no período diurno, a chaminé inclinada para máxima irradiância provida de extensor apresentou um resultado de 10% a 20% superior à chaminé inclinada para máximo fluxo de ar. Para os casos das cidades localizadas nas zonas bioclimáticas 6 a 8, o uso do extensor na chaminé com coletor inclinado para máxima irradiância provocou um incremento significativo na vazão volumétrica, com resultados em média 64% superiores para Campo Grande, 138% superiores para Petrolina e 123% superiores para Belém (Tabela 6.12).

Os principais fatores de variação nos resultados foram a inclinação do coletor solar e a irradiância solar sobre o plano de vidro, que variam conforme a localidade. Apresentam-se, a seguir, resultados comparativos de irradiância solar no plano do vidro (Figura 6.23), diferença de temperatura entre o ar no canal da chaminé e o ar externo (Figura 6.24) e vazão volumétrica proporcionada pelo sistema (Figura 6.25), para as três configurações analisadas, às 12h do solstício de verão.

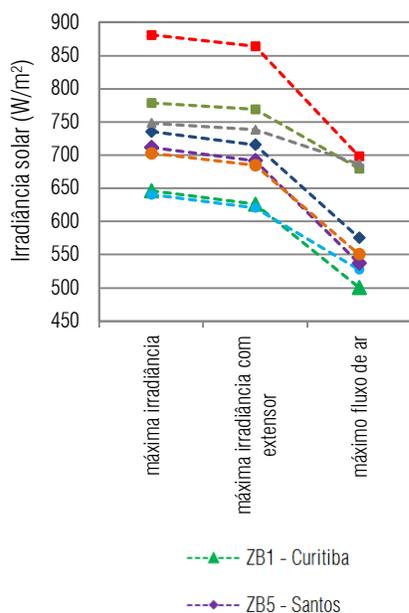


Figura 6.23: Irradiância solar no plano do coletor (W/m^2)

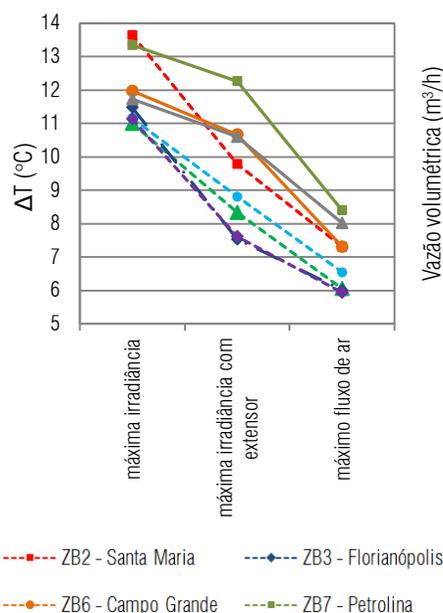


Figura 6.24: Diferença de temperatura entre o ar no canal e o ar externo ($^{\circ}C$)

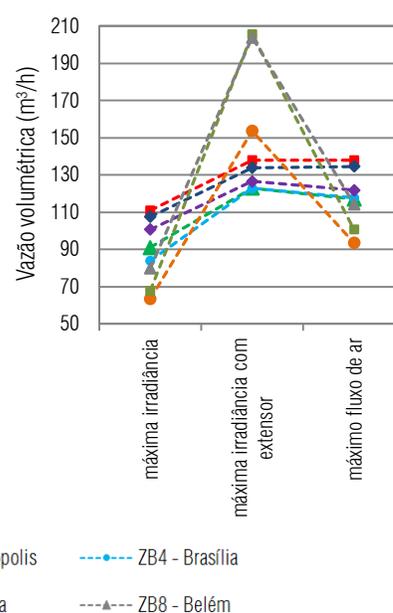


Figura 6.25: Vazão volumétrica da chaminé solar (m^3/h)

Pela Figura 6.23, pode-se notar que o uso do extensor na chaminé inclinada para máxima irradiância provocou uma pequena redução na irradiância solar sobre o plano do vidro, se comparada à configuração sem extensor. A redução ficou na ordem de 3% para as cidades cuja inclinação ideal do coletor para máxima irradiância é de 10° (zonas bioclimáticas 1 a 6) e na ordem de 1% para as demais cidades (zonas bioclimáticas 7 e 8). Uma provável causa desta redução está na sombra que o extensor pode provocar sobre a placa coletora, pois, mesmo sem esconder o sol, ele pode ocultar uma parcela do céu, reduzindo a parcela de irradiância difusa. Já a configuração de máximo fluxo de ar apresentou uma queda na radiação solar incidente no plano do vidro entre 12% e 22%.

O uso do extensor na chaminé inclinada para máxima irradiância provocou uma redução na temperatura do ar no interior do canal da chaminé, se comparada à configuração sem extensor (Figura 6.24). Houve, no entanto, um aumento na vazão, já que o uso do extensor faz com que a diferença de altura entre as aberturas de entrada e saída do ar seja maior. No caso da chaminé inclinada para máximo fluxo de ar, a queda na temperatura do ar no interior do canal foi significativa, para todas as cidades analisadas. A diferença com relação à chaminé com extensor ficou entre 20% e 32%, variando conforme a cidade. O desempenho em vazão também foi inferior: a diferença foi mínima para as cidades localizadas nas zonas bioclimáticas 1 a 5, ficando na ordem de -1% a -5%, e mais significativa nas cidades localizadas nas zonas bioclimáticas 6 a 8, ficando na ordem de -39% a -51%.

A análise comparativa de inclinação do coletor para máxima irradiância e para máximo fluxo de ar mostrou que, para o solstício de verão, nem todos os horários do dia são favoráveis ao uso do extensor, especialmente nas cidades com latitudes mais elevadas. Isto se deve ao fato deste aparato fazer sombra no coletor quando a altura angular do sol estiver muito próxima de 90° , o que prejudica o desempenho total do conjunto. Entretanto, o sistema com extensor apresentou um desempenho médio de vazão superior, para todos os casos analisados. Em vista disso, constatou-se adequada a proposta de uso do extensor, em cidades de baixas latitudes, de modo a aumentar a irradiância solar na placa coletora e o fluxo de ar proporcionado pelo sistema.

6.3.3 Resultados da variação no comprimento da chaminé

Apresentam-se aqui os resultados obtidos na análise de variação no comprimento da chaminé, para cada cidade representativa do zoneamento bioclimático brasileiro. A Figura 6.26 apresenta os resultados de vazão volumétrica e a Figura 6.27 apresenta os resultados de diferença de temperatura entre o ar no canal e o ar externo, para as 12h do solstício de verão.

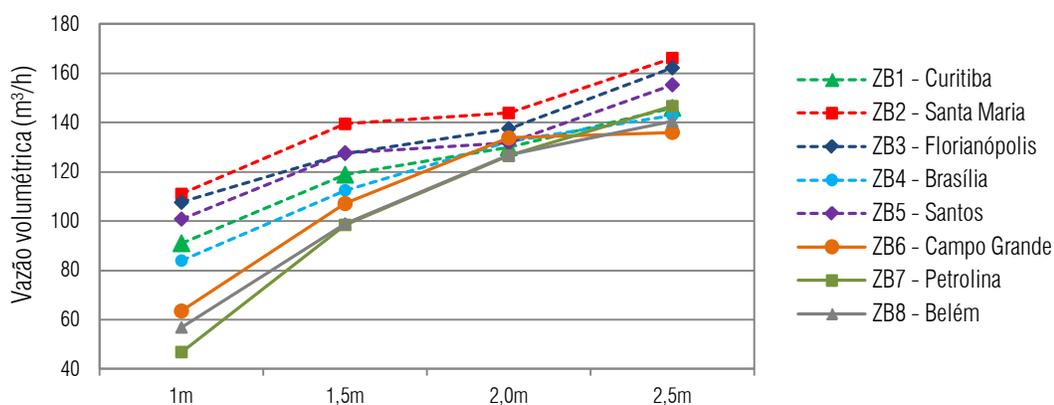


Figura 6.26: Variação no comprimento da chaminé – Q (m^3/h)

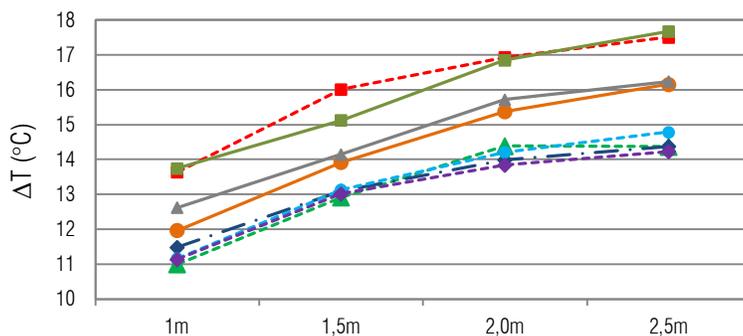


Figura 6.27: Variação no comprimento da chaminé – ΔT ($^\circ C$)

Observou-se, para todas as cidades analisadas, um maior incremento no fluxo de ar decorrente do aumento no comprimento da chaminé de 1,0m para 1,5m. A cidade que apresentou menor diferença nos resultados foi Florianópolis, com 18% de incremento, chegando, para o caso de Santos, a 110% de incremento. Já as variações subsequentes no comprimento da chaminé (de 1,5m para 2,0m e de 2,0m para 2,5m) resultaram

em incrementos progressivamente menores no fluxo de ar resultante. A chaminé de 2,0m apresentou diferenças de 3% a 28% no fluxo de ar, em relação à chaminé de 1,5m de comprimento, e a chaminé de 2,5m apresentou diferenças de 0% a 18%, em relação à chaminé de 2,0m de comprimento. O mesmo ocorreu com a temperatura do ar no interior do canal da chaminé.

Apesar do aumento nas perdas de carga por atrito em função do aumento no comprimento da chaminé não ser significativo (Tabela 6.8), nota-se que o incremento na vazão volumétrica da chaminé não é proporcional ao seu aumento em comprimento. Em vista disso, deve-se estabelecer, caso a caso, um comprimento ideal para a chaminé, de modo que optimize seu desempenho em função do ambiente que se deseja ventilar. Para isso, foi desenvolvida uma equação para a estimativa da vazão volumétrica da chaminé solar, desenvolvida através de análises por regressão, a partir dos resultados das simulações.

A equação resultante (Equação 6.4) foi obtida através de correlações encontradas entre a vazão volumétrica e as seguintes variáveis: temperatura do ar no canal da chaminé (T_c), diferença de temperatura entre o ar no canal e o ar externo (ΔT) e comprimento da chaminé (C). A equação foi desenvolvida para cada cidade selecionada. Seguem, abaixo, os valores das constantes da Equação 6.4 para cada cidade e uma figura relacionando os valores obtidos por simulação com os obtidos por regressão. A partir da aplicação da equação, pode-se ter uma estimativa inicial da vazão volumétrica proporcionada pela chaminé solar.

$$Q = A_1 \cdot C + A_2 \cdot T_c + A_3 \cdot \Delta T + B \quad \text{Eq. 6.4}$$

- ZB1 – Curitiba (Equação 6.4):

- $A_1 =$ Constante (valor= 22,06629)
- $A_2 =$ Constante (valor= -9,63462)
- $A_3 =$ Constante (valor= 18,54709)
- $B =$ Constante (valor= 193,78325)

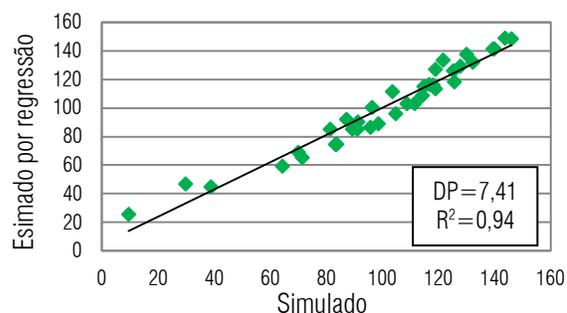


Figura 6.28: Análise por regressão do comprimento da chaminé – Curitiba

- ZB2 – Santa Maria (Equação 6.4):

- $A_1 =$ Constante (valor= 19,81369)
- $A_2 =$ Constante (valor= -4,7618)
- $A_3 =$ Constante (valor= 11,83464)
- $B =$ Constante (valor= 123,46442)

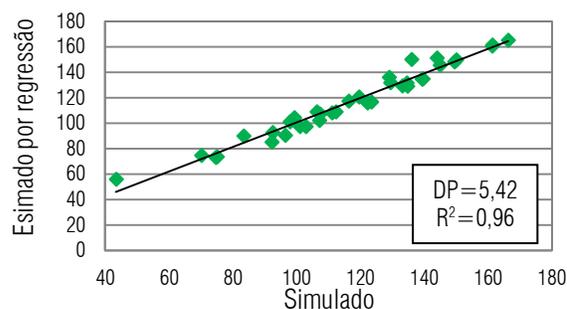


Figura 6.29: Análise por regressão do comprimento da chaminé – Santa Maria

- ZB3 – Florianópolis (Equação 6.4):

- $A_1 =$ Constante (valor= 20,56765)
- $A_2 =$ Constante (valor= -1,40573)
- $A_3 =$ Constante (valor= 9,9509)
- $B =$ Constante (valor= 21,67122)

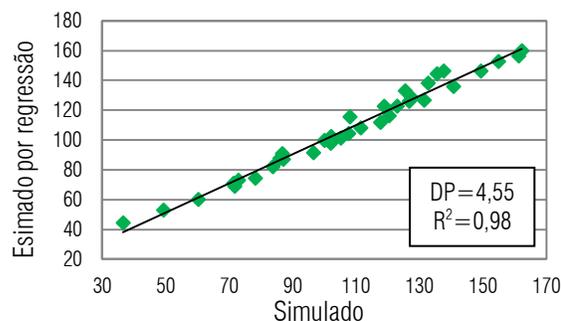


Figura 6.30: Análise por regressão do comprimento da chaminé – Florianópolis

- ZB4 – Brasília (Equação 6.4):

- $A_1 =$ Constante (valor= 22,25946)
- $A_2 =$ Constante (valor= -8,87266)
- $A_3 =$ Constante (valor= 19,04264)
- $B =$ Constante (valor= 162,01109)

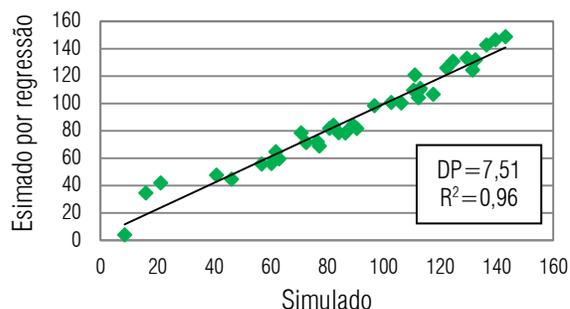


Figura 6.31: Análise por regressão do comprimento da chaminé – Brasília

- ZB5 – Santos (Equação 6.4):

- $A_1 =$ Constante (valor= 20,08317)
- $A_2 =$ Constante (valor= -3,3935)
- $A_3 =$ Constante (valor= 11,96649)
- $B =$ Constante (valor= 69,99788)

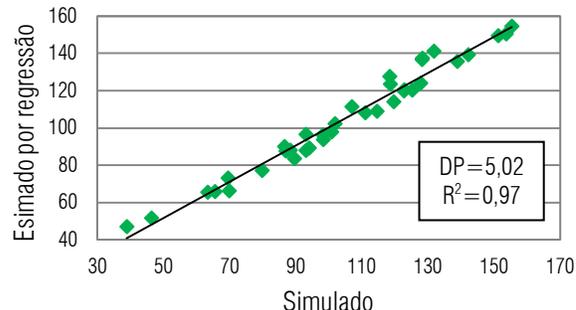


Figura 6.32: Análise por regressão do comprimento da chaminé – Santos

- ZB6 – Campo Grande (Equação 6.4):

- $A_1 =$ Constante (valor= 26,21907)
- $A_2 =$ Constante (valor= -6,50399)
- $A_3 =$ Constante (valor= 16,52432)
- $B =$ Constante (valor= 106,97844)

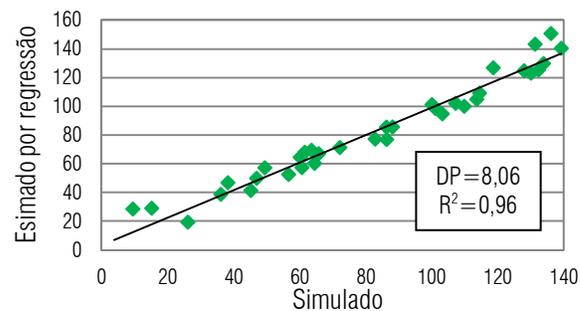


Figura 6.33: Análise por regressão do comprimento da chaminé – Campo Grande

- ZB7 – Petrolina (Equação 6.4):

- $A_1 =$ Constante (valor= 27,5021)
 $A_2 =$ Constante (valor= -5,32472)
 $A_3 =$ Constante (valor= 14,17886)
 $B =$ Constante (valor= 81,41254)

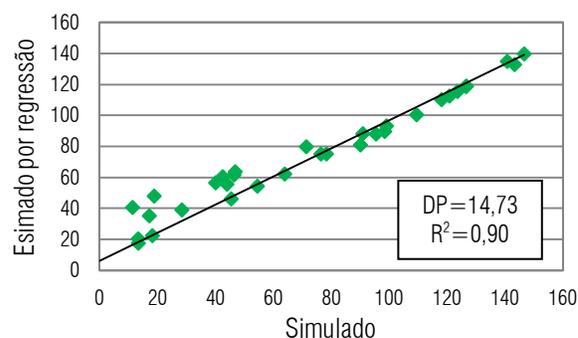


Figura 6.34: Análise por regressão do comprimento da chaminé – Petrolina

- ZB8 – Belém (Equação 6.4):

- $A_1 =$ Constante (valor= 25,19304)
 $A_2 =$ Constante (valor= -4,92243)
 $A_3 =$ Constante (valor= 14,38318)
 $B =$ Constante (valor= 69,4649)

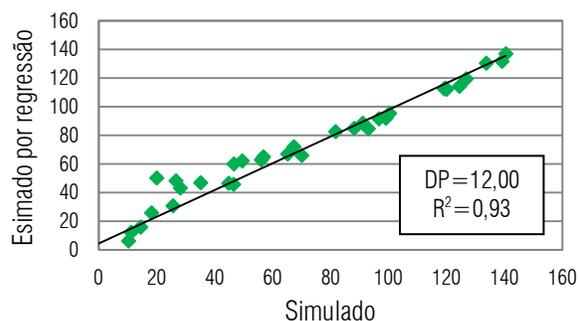


Figura 6.35: Análise por regressão do comprimento da chaminé – Belém

6.3.4 Resultados da variação no tipo de vidro utilizado no coletor

Analisam-se aqui os resultados comparativos do uso de dois tipos de vidro diferentes na cobertura do coletor solar da chaminé: vidro incolor comum e vidro de baixa emissividade (*low-e*). Sabe-se que uma emissividade mais baixa aumenta a reflexão de calor que, por sua vez, aumenta a capacidade de isolamento térmico do conjunto. Por consequência, o uso deste tipo de vidro na chaminé solar resultou em uma redução nas perdas de calor do sistema para o ambiente externo e uma redução na temperatura superficial do vidro, como pode ser observado na Figura 6.36.

O uso do vidro de baixa emissividade provocou um aumento nas trocas de calor por convecção e, conseqüentemente, um aumento na temperatura do ar no canal da chaminé (Figura 6.37). Este aumento foi variou entre 3% e 7%. Em vista disso, o fluxo de ar sofreu um incremento de 6% a 10% nas cidades localizadas nas zonas bioclimáticas 1 a 5, 35% na cidade da zona bioclimática 6, 34% na cidade da zona bioclimática 7 e 29% na cidade da zona bioclimática 8.

A troca do vidro comum por um vidro de baixa emissividade mostrou-se uma estratégia mais eficiente nas cidades de latitudes mais baixas, localizadas nas zonas bioclimáticas 4, 6, 7 e 8.

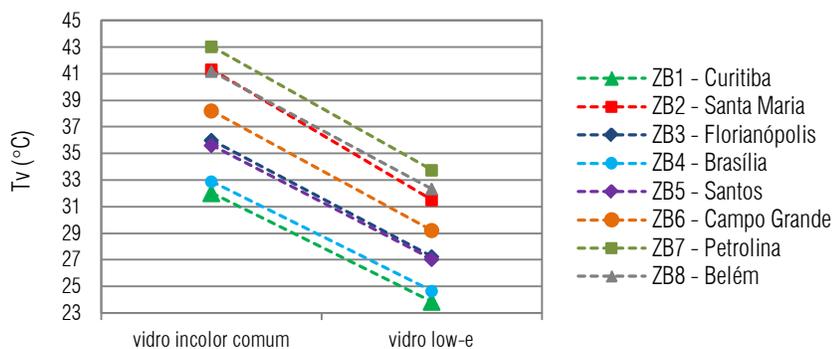


Figura 6.36: Alteração do tipo de vidro do coletor – Tv (°C)

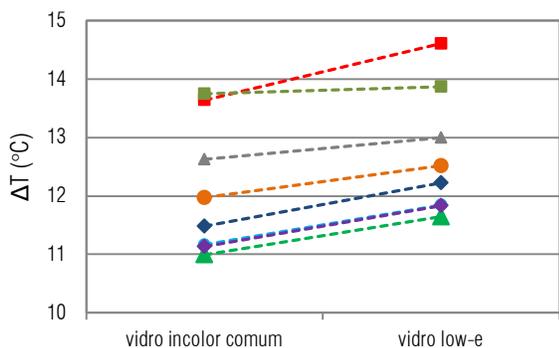


Figura 6.37: Alteração do tipo de vidro do coletor – ΔT (°C)

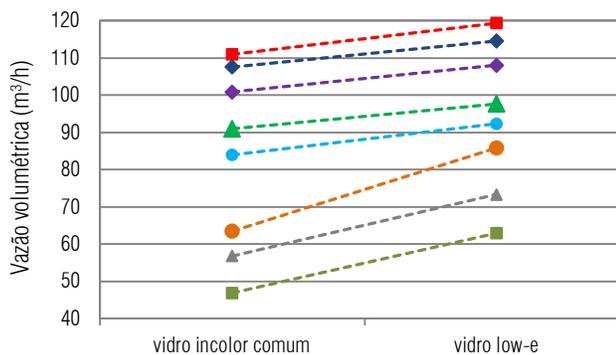


Figura 6.38: Alteração do tipo de vidro do coletor – Q (m³/h)

6.3.5 Resultados da comparação entre uma chaminé solar e uma chaminé convencional

Compara-se aqui, para as oito cidades selecionadas, a diferença de desempenho entre uma chaminé solar e uma chaminé convencional, ambas com as mesmas características geométricas e a mesma diferença de altura entre aberturas de entrada e saída do ar (vide Figura 6.8). Esta comparação teve por objetivo traçar uma estimativa do incremento no fluxo de ar proporcionado pelo uso de um coletor solar na chaminé. Os resultados são apresentados para o horário de maior irradiância do solstício de verão (Figuras 6.39 e 6.40).

Os resultados de diferença de temperatura entre o ar no canal e o ar externo (Figura 6.39) apontaram um aumento de 23% a 76% na temperatura do ar no canal da chaminé, dependendo da cidade, decorrente do aquecimento proporcionado pela chaminé solar. Já a vazão volumétrica (Figura 6.40) sofreu um incremento de 37% a 159%. As cidades que apresentaram diferenças de desempenho mais significativas foram as localizadas mais próximas à linha do Equador (acima do trópico de Capricórnio): Brasília, Campo Grande, Petrolina e Belém.

A partir desses resultados, avaliou-se o potencial teórico de ventilação da chaminé solar e da chaminé convencional, ambas acopladas a um ambiente com dimensões típicas de habitações, de 3m x 3m x 2,7m. Os resultados de vazão volumétrica e de taxa de renovação de ar horária correspondente são apresentados na Tabela 6.13.

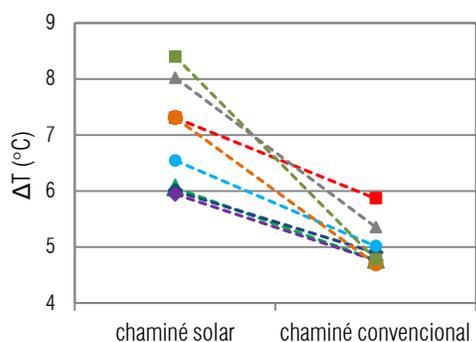


Figura 6.39: Chaminé solar x chaminé convencional – ΔT ($^{\circ}\text{C}$)

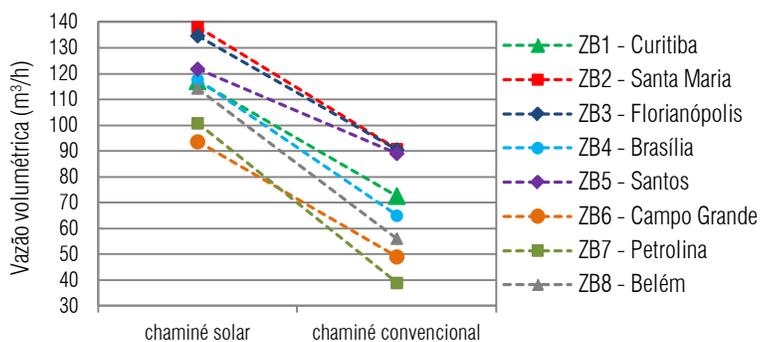


Figura 6.40: Chaminé solar x chaminé convencional – Q (m^3/h)

Tabela 6.13: Análise de desempenho para o horário de maior irradiância (12h)

Cidade	Chaminé convencional		Chaminé solar	
	Vazão volumétrica (m^3/h)	Taxa de renovação horária	Vazão volumétrica (m^3/h)	Taxa de renovação horária
ZB1 - Curitiba, PR	72,6	3,0	117,1	4,8
ZB2 - Santa Maria, RS	90,8	3,7	138,0	5,7
ZB3 - Florianópolis, SC	90,6	3,7	134,7	5,5
ZB4 - Brasília, DF	65,0	2,7	117,8	4,8
ZB5 - Santos, SP	89,1	3,7	121,9	5,0
ZB6 - Campo Grande, MS	49,1	2,0	93,7	3,9
ZB7 - Petrolina, PE	38,9	1,6	100,9	4,2
ZB8 - Belém, PA	56,1	2,3	114,3	4,7

Esta situação hipotética mostra a diferença significativa de desempenho da chaminé solar em relação à convencional, encorajando seu uso como mecanismo de ventilação natural em edificações de baixa altura. Tendo em vista que a chaminé solar aqui analisada possui apenas 1m^2 de área de coletor, o uso de configurações com maiores dimensões poderia ampliar o potencial de ventilação da chaminé solar, para outras situações.

6.4 Considerações finais

Foi desenvolvida, neste capítulo, uma análise paramétrica de características geométricas e construtivas de chaminés solares, localizadas em cidades representativas do zoneamento bioclimático brasileiro. O estudo da configuração geométrica da chaminé revelou uma grande influência da espessura do canal de ar sobre seu desempenho, cuja variação ocasionou alterações impactantes no fluxo de ar. Ao definir essa variável em um projeto de chaminé solar, deve-se observar a temperatura do ar interno na chaminé, para que não ocorra inversão do sentido do fluxo de ar. Foi definida uma espessura ótima do canal, para cada cidade analisada, sendo observada uma estabilização do fluxo de ar no interior da chaminé, quando a espessura ótima fosse excedida.

Alterações no comprimento da chaminé mostraram-se menos impactantes do que alterações na espessura

do canal de ar. A análise empreendida mostrou ser necessário estabelecer um comprimento ideal para a chaminé, de modo que otimize seu desempenho em função do ambiente a ser ventilado. Equações foram desenvolvidas com o intuito de auxiliar nessa definição.

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

O uso desse aparato de extensão foi analisado para uma cidade representativa de cada zona bioclimática brasileira. Os resultados apontaram, para todos os casos analisados, vazões superiores à chaminé com inclinação para máximo fluxo de ar. Além disso, as horas do dia em que a ventilação natural é mais necessária como estratégia de conforto térmico em edificações coincide com as maiores diferenças nas taxas de fluxo de ar, o que justifica o uso dessa configuração de chaminé para ventilação natural de edificações localizadas em regiões de baixa latitude.

Um fator importante que prejudica o desempenho de chaminés solares com inclinação próxima à horizontal é o aumento nas perdas de carga provocado pelas seções curvas. De acordo com Idel'cik (1999), a principal causa de perda de pressão em uma curva de uma tubulação é a formação de turbilhões na vizinhança da parede interior, o que tende a aumentar com a redução do ângulo de curvatura. Entretanto, a análise empreendida mostrou que o melhor aproveitamento da radiação solar pode compensar a perda de carga mais elevada, mas a questão deve ser cuidadosamente analisada durante o processo de projeto.

Os resultados apresentados na análise paramétrica e na comparação de desempenho efetuada entre uma chaminé solar e uma chaminé convencional indicam a aplicabilidade da chaminé solar para promover a ventilação natural nas cidades analisadas, selecionadas como representativas do zoneamento bioclimático brasileiro. Deve-se levar em consideração, ainda, que as análises aqui empreendidas não consideraram a ação dos ventos e que, se corretamente aproveitados, podem contribuir positivamente para a ventilação natural do ambiente interno de edificações de baixa altura. Este assunto será discutido com maiores detalhes no capítulo a seguir.

7. INTERFERÊNCIA DO VENTO NO DESEMPENHO DE UMA CHAMINÉ SOLAR

7.1 A chaminé solar e o vento: revisão bibliográfica

Na literatura especializada, poucas pesquisas consideram a influência do vento sobre o desempenho de chaminés solares. A maior parte dos estudos desenvolvidos concentra-se isoladamente no movimento do ar por efeito chaminé. No entanto, mesmo ventos a baixas velocidades podem interferir no funcionamento da chaminé, tanto positiva quanto negativamente. Arce et al (2009) evidenciam este fato, ao afirmarem que o fluxo de ar em uma chaminé solar é fortemente afetado pela diferença de pressão existente entre as aberturas de entrada e saída do ar, resultante tanto dos gradientes térmicos como também da velocidade do vento.

De acordo com Marques da Silva (2003), a componente eólica deve ser considerada em uma análise, mesmo que o projeto de ventilação considere a componente térmica como o “motor” do processo. Segundo o autor, em situações onde exista mais de uma abertura para ventilação natural, a cotas diferentes, e velocidade do vento de 1m/s, a contribuição da componente eólica corresponde ao mesmo fluxo de ar que se obtém com uma diferença de temperatura entre o ar interno e externo de 8K. Já para uma velocidade do vento de 5m/s, as estimativas de fluxo de ar por ação dos ventos consistem no dobro das obtidas por uma diferença de temperatura de 24K.

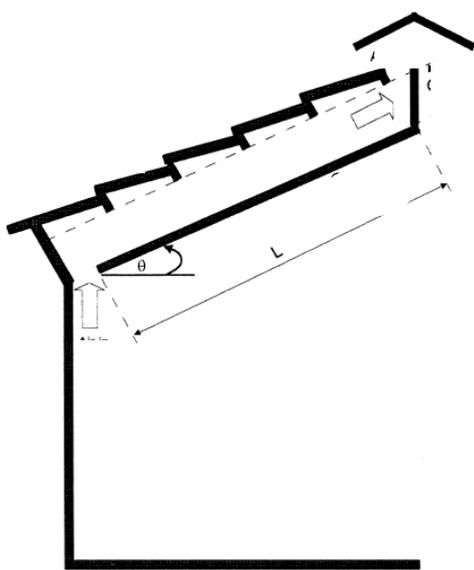


Figura 7.1: Representação esquemática do coletor solar integrado à estrutura do telhado (KHEDARI et al, 2000)



Figura 7.2: Vistas lateral e frontal da chaminé solar experimental (ARCE et al, 2009)

A maioria dos trabalhos em que há alguma consideração sobre a influência do vento no funcionamento de chaminés solares consiste em estudos experimentais, realizados com base em modelos de escala real, expostos a condições climáticas reais. Khedari et al (2000), por exemplo, realizaram um estudo experimental de uma chaminé solar em uma edificação escolar. Os autores propuseram o uso da estrutura do telhado para

funcionar como coletor solar, visando reduzir a transmissão de calor para o ambiente interno e induzir a circulação natural de ar. Duas unidades, inclinadas a 25° , foram integradas ao telhado de uma edificação escolar localizada em Bangkok, Tailândia (Figura 7.1).

Arce et al (2009) também realizaram uma investigação experimental para analisar o desempenho de uma chaminé solar com interferência do vento. O aparato experimental, construído no Sudeste da Espanha ($37^\circ 05'$ latitude Norte), consistia em uma chaminé vertical, com 4,5m de altura, 1m de largura, 0,30m de espessura do canal de ar e parede absorvedora de concreto. Para redução das perdas de pressão ao longo do canal da chaminé, o protótipo foi construído com áreas iguais nas aberturas de entrada e saída do ar. O aparato contou ainda com uma proteção contra a incidência direta de ventos na abertura de saída de ar da chaminé, de forma que a abertura pudesse ficar sempre posicionada no sentido contrário aos ventos incidentes (Figura 7.2).

Observou-se que o fluxo de ar na chaminé solar foi influenciado pela diferença de pressão existente entre as aberturas de entrada e saída do ar, causada pelos gradientes térmicos e, principalmente, pela velocidade do vento. Um fluxo de ar mínimo de $50\text{m}^3/\text{h}$ foi registrado no mesmo momento em que a velocidade do vento também era mínima. Os resultados indicaram que, para uma radiação solar de $604\text{W}/\text{m}^2$, houve um incremento de 7°C na temperatura do ar no canal da chaminé e uma vazão volumétrica de $374\text{m}^3/\text{h}$. O fluxo médio de ar foi de $177\text{m}^3/\text{h}$ ao longo do dia.

Bansal et al (1994) estudaram experimentalmente uma chaminé solar acoplada a uma torre de vento para induzir a ventilação natural em um edifício de vários pavimentos. O sistema proposto consistiu na instalação de chaminés solares nas aberturas de saída do ar dos ambientes, de forma a auxiliar na exaustão do ar. O ar incidente na torre seria captado e desviado para baixo, sendo então distribuído para os ambientes (Figura 7.3). Conforme esperado, foi observado que o efeito da torre de vento acoplada à chaminé solar era maior para velocidades de vento reduzidas. Para o vento a uma velocidade de $1,0\text{m}/\text{s}$ e radiação solar incidente de $700\text{W}/\text{m}^2$, por exemplo, a vazão mássica obtida pela torre de vento foi de apenas $0,75\text{kg}/\text{s}$, enquanto o sistema que adota a chaminé solar foi capaz de obter uma vazão de até $1,4\text{kg}/\text{s}$.

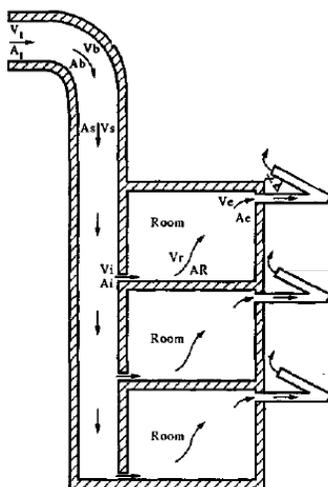


Figura 7.3: Representação esquemática da torre de vento associada à chaminé solar (BANSAL et al, 1994)

Grande parte dos modelos teóricos para predição do desempenho de chaminés solares disponíveis na

literatura especializada não consideraram a interferência do vento. Afonso e Oliveira (2000), após compararem resultados simulados com experimentais e notarem que o fluxo de ar devido ao efeito do vento não poderia ser desconsiderado, propuseram a modificação de um sistema de equações, de modo a levar em conta este fator.

O modelo teórico proposto pelos autores combinou equações para processos de transferência de calor com equações para ventilação natural. Um arquivo climático no formato *Test Reference Year* (TRY) foi utilizado, incluindo informações de velocidade e direção do vento. Os autores propuseram uma modificação na equação para cálculo de vazão, de modo a levar em consideração os efeitos do vento (Equação 7.1). Os coeficientes de pressão foram estimados através do programa CPCALC. Após o ajuste, pôde-se notar maior aproximação entre dados experimentais e calculados. Entretanto, como o vento é de natureza variável, os autores propuseram que o desenvolvimento de projetos de chaminés solares seja realizado sem considerar os efeitos do vento, o que subestimaria as taxas reais de ventilação. De fato, se corretamente projetada, uma chaminé solar submetida à força do vento pode ter um desempenho superior ao de uma chaminé solar que atue somente por diferença de temperatura.

$$Q = \frac{1}{\sqrt{\zeta_e \cdot \left(\frac{A_s}{A_e}\right)^2 \cdot \zeta_s + f_e \cdot \frac{I}{D_H}}} \cdot A_s \cdot \sqrt{2 \cdot \beta \cdot g \cdot \Delta T \cdot \Delta z + C_p \cdot V^2} \quad \text{Eq. 7.1}$$

Sendo:

Q	Vazão volumétrica (m ³ /s)
ζ_e	Coefficiente de perda de carga na saída da chaminé (adimensional)
A _s	Área da abertura de saída do ar (m ²)
A _e	Área da abertura de entrada do ar (m ²)
ζ_s	Coefficiente de perda de carga na entrada da chaminé (adimensional)
f _e	Fator de fricção do canal da chaminé (adimensional)
I	Irradiância solar no plano do vidro (W/m ²)
D _H	Diâmetro hidráulico do canal da chaminé (m)
β	Coefficiente de expansão volumétrica (1/K)
g	Aceleração da gravidade (m/s ²)
ΔT	Diferença de temperatura entre o ar interno e o ar externo (K)
Δz	Diferença de altura entre as aberturas de entrada e saída do ar (m)
C _p	Coefficiente de pressão (adimensional)
V	Velocidade do vento (m/s)

Zamora e Kaiser (2010) também registraram a lacuna existente no estudo de ventilação através de chaminés solares expostas ao vento. Os autores desenvolveram um estudo numérico do fluxo de ar induzido simultaneamente pelo vento e pela impulsão térmica, em uma chaminé solar vertical. Foram assumidas as hipóteses de fluxo uniforme de calor no interior do canal e temperatura superficial uniforme na placa absorvedora. O fluxo de ar variou entre laminar, transiente ou turbulento, dependendo da magnitude das forças de impulsão. As análises foram realizadas através de um programa de simulação de dinâmica de fluidos computacional (CFD) chamado Fluent.

Os autores realizaram uma análise dos resultados numéricos de coeficientes de pressão, coeficientes de transferência de calor por convecção (número de Nusselt) e grau de turbulência do fluxo de ar (número de Rayleigh) correlacionados com a vazão mássica. Os resultados indicaram uma mudança no comportamento do sistema quando há transição de regime laminar para turbulento. Para números de Rayleigh muito baixos, os efeitos da impulsão térmica são quase insignificantes contra as forças do vento, exceto para valores muito baixos de velocidade do vento. Para números de Rayleigh altos, os efeitos do vento tendem a ser importantes apenas a partir de um intervalo aproximado de velocidade entre 1 e 2m/s. Já entre 2 e 3m/s os efeitos do vento são dominantes.

7.2 Análise da interferência do vento na chaminé solar: materiais e métodos

Nas etapas de monitoramento experimental (capítulo 3) e ensaios em túnel de vento (capítulo 4), foi constatada uma transição constante no regime do fluxo de ar no interior da chaminé, variando entre laminar e turbulento. Como esta mudança de regime não apresenta comportamento linear, qualquer alteração na geometria da chaminé pode resultar em um comportamento diferente do fluxo de ar no interior do canal. Em vista disso, foi selecionado um único modelo de chaminé solar para realização de uma análise detalhada da interferência do vento sobre o seu desempenho. O modelo selecionado consistiu na mesma geometria da célula de teste experimental, submetida às condições climáticas da cidade de São Carlos, SP. As análises foram divididas em duas etapas:

- Análise quantitativa do fluxo de ar na chaminé solar, em função do efeito combinado das componentes térmica e eólica.
- Análise qualitativa e quantitativa do fluxo de ar nas aberturas de saída do ar da chaminé solar.

7.2.1 Análise quantitativa do fluxo de ar na chaminé solar

Para o desenvolvimento da análise quantitativa do fluxo de ar na chaminé solar, foram realizadas simulações computacionais, utilizando-se o modelo tridimensional e o arquivo climático montados na etapa de calibração (capítulo 5). O modelo tridimensional da chaminé possui 1m de comprimento, 1m de largura, 0,18m de espessura do canal de ar, coletor solar inclinado a 20° em relação ao plano horizontal, (inclinação ideal para máxima irradiância no mês de março, em São Carlos) e um extensor vertical para garantir uma altura útil total do conjunto de 1,80m¹.

Uma série de simulações foi realizada, compreendendo uma combinação de diferentes velocidades e direções do vento. Para isso, os dados de vento foram alterados no arquivo climático, de forma a possibilitar a realização da seguinte série de análises:

- Velocidade do vento (V): 0m/s (sem vento), 1m/s, 2m/s e 3m/s.
- Direção do vento: 0°, 45°, 90°, 120°, 150° e 180°, a contar do Norte verdadeiro, no sentido horário (Figura 7.4).

¹ Vide Figura 5.3, capítulo 5.

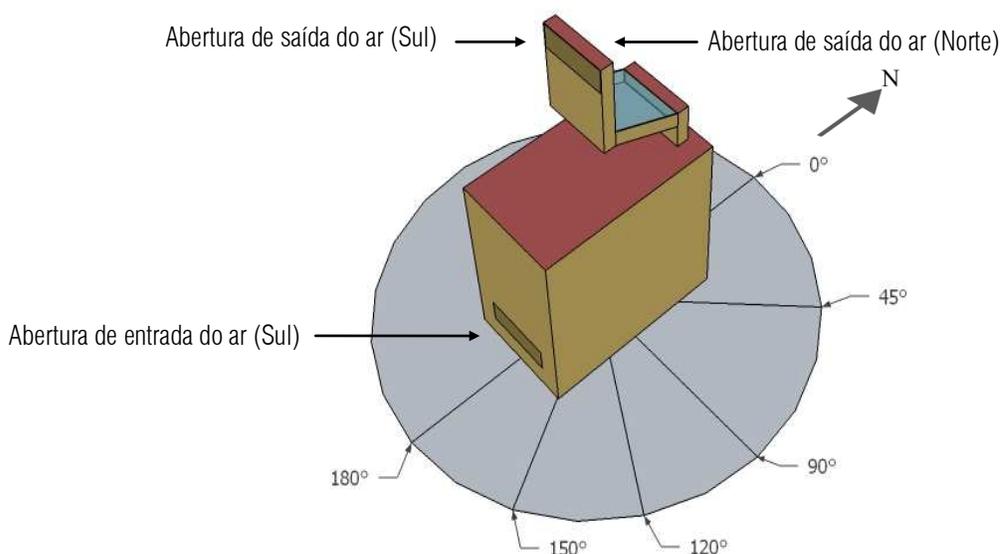


Figura 7.4: Direções do vento simuladas

Optou-se por realizar um número maior de simulações nas direções onde o vento incide diretamente sobre a abertura de entrada de ar do ambiente (entre 90° e 180°). Para a análise aqui empreendida, não foi levada em consideração a barreira ao vento provocada pela célula de teste construída em frente à chaminé solar. Em vista disso, foram utilizados como dados de entrada para as simulações os coeficientes de pressão medidos sem barreira, determinados através de ensaios em túnel de vento (Tabela 7.1). Também foram utilizados como dados de entrada os coeficientes de descarga específicos para cada direção do vento, obtidos através de ensaios em túnel de vento (Figura 7.5).

Tabela 7.1: Coeficientes de pressão (C_p) – sem barreira

Direção do vento	Sem barreira		
	Abertura de entrada do ar	Aberturas de saída do ar	
		C_p	C_p (Sul)
0°	-0,19	-0,67	0,93
45°	-0,11	-0,50	0,71
90°	-0,09	-0,02	-0,02
120°	0,60	0,61	-0,30
150°	0,31	1,12	-0,29
180°	0,71	0,77	-0,59

Os resultados obtidos na análise de interferência do vento são apresentados na forma de gráficos de vazão volumétrica no canal (Q), incluindo análises comparativas para situações com e sem vento e para diferentes direções do vento.

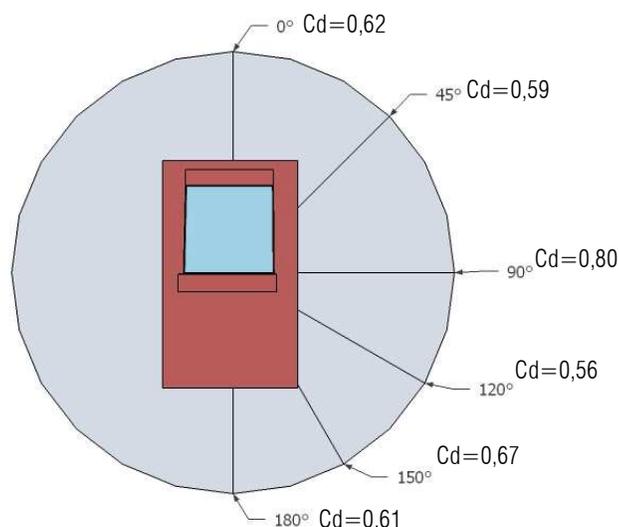


Figura 7.5: Coeficientes de descarga por direção do vento – efeito combinado das componentes térmica e eólica

7.2.2 Análise qualitativa e quantitativa do fluxo de ar nas aberturas de saída do ar da chaminé solar

Sabe-se que, quando o vento incide na chaminé solar, ocorre um fluxo de ar induzido por uma combinação de ação dos ventos com diferença de temperatura. Variações na velocidade e direção do vento fazem com que o comportamento do fluxo de ar na região das aberturas de saída do ar mude constantemente. Para estudar essa questão, realizou-se uma análise detalhada do fluxo de ar na região das aberturas de saída do ar da chaminé solar. A análise consistiu na verificação dos padrões de velocidade e direção do fluxo de ar nessa região, em função dos efeitos proporcionados pela impulsão térmica e pela ação dos ventos. O estudo foi realizado considerando-se as aberturas de saída do ar desobstruídas, ou seja, sem qualquer dispositivo especial de proteção contra a incidência direta do vento.

Foram realizados ensaios em túnel de vento para determinar as pressões total (P_t) e estática (P_e) em uma malha de pontos distribuídos nas aberturas de saída do ar da chaminé, para as direções do vento de 0° , 45° , 90° , 120° , 150° e 180° . Foram localizados três pontos de medição na abertura de saída do ar a barlavento, três pontos no centro do canal e três pontos na abertura de saída do ar a sotavento (Figura 7.6). Para realização dos ensaios, manteve-se o túnel a uma velocidade do vento constante, de aproximadamente 3m/s, e o interior da chaminé com uma velocidade do ar variável, em um intervalo aproximado de 2,5m/s a 5,5m/s.

A partir dos dados coletados, foram calculadas as pressões dinâmicas do escoamento (P_d) e, conseqüentemente, as velocidades locais², em cada um dos pontos de monitoramento. Houve dificuldade na leitura da pressão estática em alguns pontos localizados a barlavento, devido à ocorrência de fluxo de ar turbulento e à presença de vórtices na região. Isso impediu o cálculo da velocidade do ar nesses pontos. Para contornar o problema, os pontos que apresentaram falhas de leitura tiveram suas velocidades estimadas, com base em correlações encontradas com outros pontos da malha.

² Vide Equação 4.12, capítulo 4.

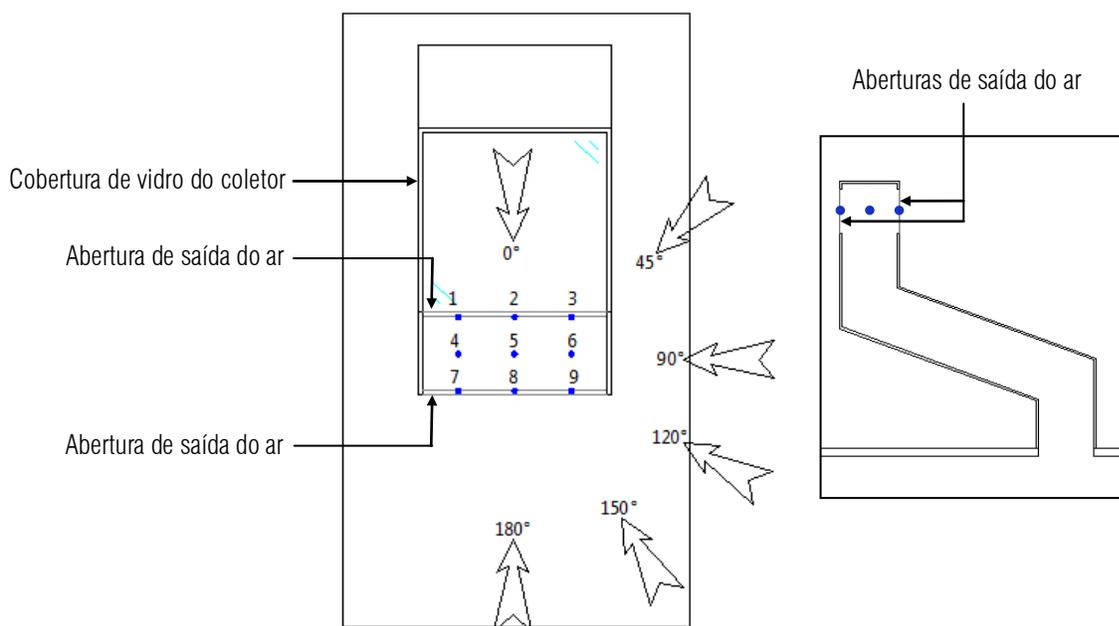


Figura 7.6: Vista superior e corte da chaminé solar, localizando as tomadas de pressão na saída da chaminé (em azul)

Os resultados obtidos foram utilizados para a construção de gráficos com isolinhas de velocidade, para cada direção do vento, de modo a visualizar o percurso do fluxo de ar e a seção útil da chaminé, para cada direção do vento. Os gráficos foram realizados com o auxílio do programa Surfer (versão 9.0).

7.3 Resultados obtidos na análise da interferência do vento na chaminé solar

7.3.1 Resultados da análise quantitativa do fluxo de ar na chaminé solar

O item 3.3.2 (capítulo 3) apresentou os resultados obtidos no monitoramento experimental, relativos à influência da velocidade e direção do vento na tiragem de ar da chaminé solar da célula de teste. Esses resultados mostraram fortes indícios da importância de uma análise detalhada da interferência do vento sobre o desempenho da chaminé solar, já que o fluxo de ar na chaminé mostrou-se bastante correlacionado com os dados climáticos de vento. Apresenta-se aqui um estudo mais aprofundado sobre o assunto, realizado através de simulações computacionais, que permitiu quantificar essa interferência em diferentes situações. Para o desenvolvimento das análises, foi utilizado um modelo tridimensional da chaminé, similar à célula de teste experimental.

Para uma direção do vento de 0° , oposta à abertura de entrada do ar, o vento com velocidade de 1m/s ocasionou uma redução de 47% na vazão volumétrica da chaminé, em relação a uma situação sem vento, para uma irradiância solar no plano do vidro de 250W/m^2 (Figura 7.7). Para uma irradiância solar de 850W/m^2 , a redução foi de 38%. O aumento da velocidade do vento para 2m/s resultou em uma redução adicional de 30%, no caso da irradiância de 250W/m^2 , e de 2%, no caso da irradiância de 850W/m^2 . Para o vento a 3m/s , a redução adicional foi de 16% para a irradiância de 250W/m^2 e de 20% para a irradiância de 850W/m^2 . Nesses casos, a diferença de temperatura entre o ar no interior do canal da chaminé e o ar externo

variou entre 3°C (para 250W/m²) e 15°C (para 850W/m²).

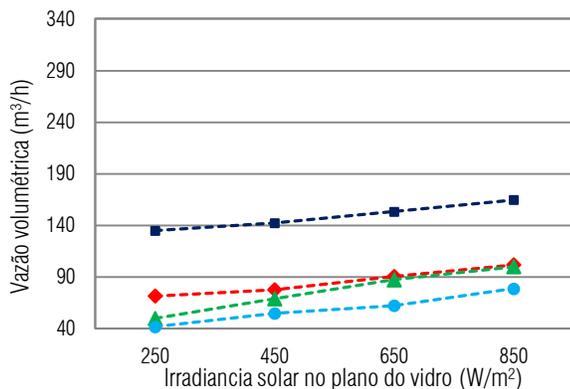


Figura 7.7: Vazão volumétrica da chaminé para diferentes irradiâncias e velocidades do vento – direção do vento 0°

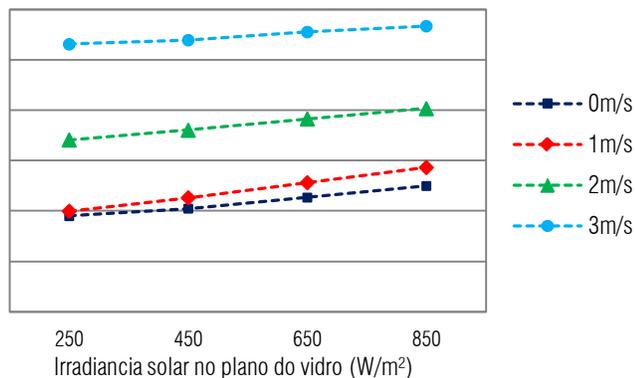


Figura 7.8: Vazão volumétrica da chaminé para diferentes irradiâncias e velocidades do vento – direção do vento 180°

Para o vento incidindo diretamente sobre a abertura de entrada do ar do ambiente – direção de 180° – a uma velocidade de 1m/s, houve um aumento de 11% na vazão volumétrica da chaminé, em comparação a uma situação sem vento, para uma irradiância solar no plano do vidro de 850W/m² (Figura 7.8). O vento com velocidade de 2m/s provocou um incremento adicional de 32% e o vento com velocidade de 3m/s resultou em um incremento adicional de 34%. Nesses casos, devido à maior circulação de ar no canal da chaminé, a diferença de temperatura entre o ar no interior do canal e o ar externo caiu para 2,5°C, para 250W/m², e 8°C, para 850W/m².

Os resultados mostram o peso que a velocidade e direção do vento exercem sobre o fluxo de ar proporcionado pela chaminé solar. Pôde-se observar que a presença do vento a uma velocidade baixa, em direção oposta à abertura de entrada de ar do ambiente, resultou em uma interferência negativa bastante significativa no desempenho da chaminé solar. Vale ressaltar que a incidência de vento a uma velocidade de 1m/s pode ser bastante frequente em edificações localizadas em regiões onde existam obstáculos locais ao vento, como no interior da malha urbana, por exemplo.

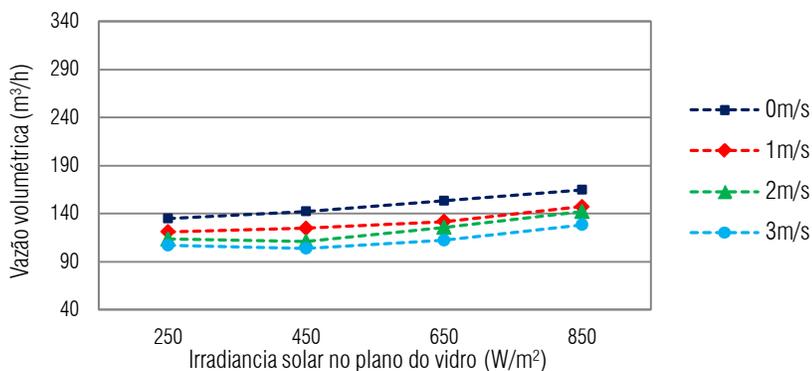


Figura 7.9: Vazão volumétrica da chaminé para diferentes irradiâncias e velocidades do vento – direção do vento 90°

No caso do vento incidir paralelamente às aberturas de saída de ar da chaminé solar – direção de 90° –

pôde-se observar uma pequena redução na vazão volumétrica da chaminé, em comparação a uma situação sem vento (Figura 7.9). Para o vento a uma velocidade de 1m/s e irradiância solar de 850W/m², a redução foi de 10%. Para uma velocidade de 2m/s houve uma redução adicional de 6% e para uma velocidade de 3m/s houve uma redução adicional de 5%. A redução no fluxo de ar se deu, em grande parte, devido à perda de carga resultante da ação dos ventos na região próxima às aberturas de saída do ar. Essa perda de carga havia sido detectada e quantificada nos ensaios realizados em túnel de vento, em que foi possível calcular os coeficientes de perda de carga por ação dos ventos isoladamente³.

Uma análise comparativa entre as vazões volumétricas proporcionadas pela chaminé solar, resultantes de diferentes direções de vento, foi elaborada para o horário do dia de maior irradiância (930W/m² ao meio dia) (Figura 7.10). Pelos resultados, pôde-se observar claramente as direções contrárias (entre 0° e 90°) e favoráveis (entre 90° e 180°) à ventilação por ação dos ventos, no modelo estudado. No horário de maior irradiância, como a ventilação por efeito chaminé é mais intensa, os efeitos provocados pelo vento a baixas velocidades foram menos impactantes no funcionamento do sistema, especialmente quando a direção do vento era favorável à ventilação.

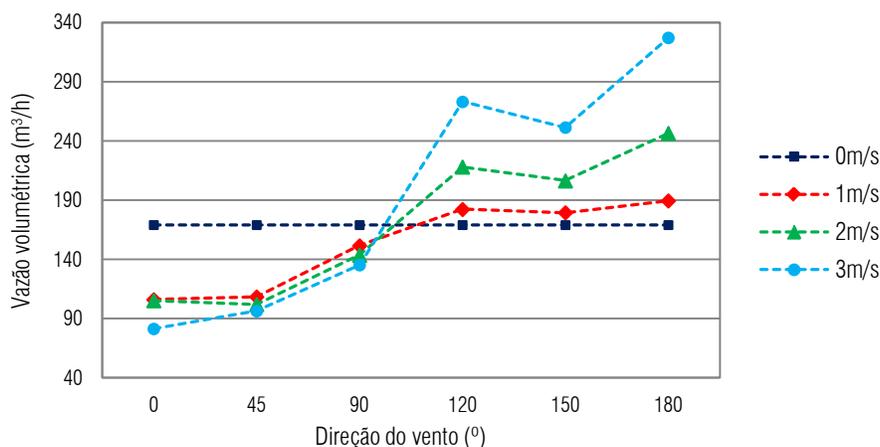


Figura 7.10: Vazão volumétrica da chaminé para diferentes velocidades e direções do vento

Notou-se a predominância de um fluxo de ar turbulento no interior da chaminé, pois o número de Reynolds, calculado através dos resultados obtidos nas simulações, variou entre 5200 e 7000. Conforme afirmam Zamora e Kaiser (2010), quando o fluxo de ar no interior da chaminé é turbulento, os efeitos do vento tendem a ser importantes a partir de um intervalo aproximado de velocidade entre 1 e 2m/s. De fato, isso pôde ser observado nos resultados obtidos pela Figura 7.10. Para o vento a uma velocidade de 1m/s e direções de vento favoráveis à abertura de entrada do ar, notou-se um menor impacto no fluxo de ar da chaminé. Já para o vento com velocidades de 2 e 3m/s, observou-se um maior impacto no desempenho da chaminé, em função da direção de incidência do vento.

³ Vide Figura 4.28, capítulo 4.

7.3.2 Resultados da análise qualitativa e quantitativa do fluxo de ar nas aberturas de saída do ar da chaminé solar

Para analisar o comportamento do fluxo de ar nas aberturas de saída do ar da chaminé solar, foram monitoradas as pressões em uma malha de nove pontos, distribuídos simetricamente pela região das aberturas (vide Figura 7.6). Os valores de velocidade do ar foram calculados a partir dos resultados de pressão, para cada direção de vento analisada, e apresentam-se na Tabela 7.2. Para a incidência de vento paralela às aberturas de saída do ar – direção de 90° – foram realizados ensaios apenas no ponto central da região das aberturas, que é o ponto de número 5.

Tabela 7.2: Resultados do monitoramento do fluxo de ar na saída da chaminé

Direção do vento	V_{vento} (m/s)	$V_{\text{chaminé}}$ (m/s)	Posição	V (m/s)	Posição	V (m/s)	Posição	V (m/s)
0°	3,09	2,74	1	1,92	4	1,86	7	3,41
			2	2,05	5	1,94	8	3,45
			3	1,92	6	1,86	9	3,41
	3,21	3,21	1	1,95	4	2,05	7	3,57
			2	2,12	5	2,18	8	3,60
			3	1,95	6	2,05	9	3,57
	3,17	3,93	1	1,32	4	2,44	7	3,85
			2	1,50	5	2,58	8	3,87
			3	1,32	6	2,44	9	3,85
	3,13	4,64	1	1,24	4	2,86	7	4,23
			2	1,23	5	2,99	8	4,20
			3	1,24	6	2,86	9	4,23
3,15	5,30	1	0,71	4	3,20	7	4,52	
		2	0,95	5	3,30	8	4,45	
		3	0,71	6	3,20	9	4,52	
45°	3,29	2,54	1	1,19	4	2,39	7	2,70
			2	1,17	5	2,39	8	2,76
			3	1,15	6	1,88	9	1,33
	3,35	3,00	1	0,62	4	2,52	7	2,86
			2	0,94	5	2,67	8	2,82
			3	1,43	6	2,30	9	1,24
	3,4	3,65	1	0,30	4	2,80	7	3,05
			2	0,45	5	3,06	8	3,11
			3	1,70	6	2,74	9	1,48
	3,37	4,32	1	0,25	4	3,14	7	3,20
			2	0,38	5	3,48	8	3,22
			3	2,00	6	3,23	9	1,31
3,34	4,96	1	2,24	4	3,38	7	3,36	
		2	0,32	5	3,85	8	3,50	
		3	0,21	6	3,61	9	1,60	
90°	3,32	2,78	-	-	5	1,80	-	-
	3,15	3,34	-	-	5	2,27	-	-
	3,23	4,08	-	-	5	2,83	-	-
	3,23	4,73	-	-	5	3,37	-	-
	3,09	5,36	-	-	5	3,83	-	-

Tabela 7.2 (continuação): Resultados do monitoramento do fluxo de ar na saída da chaminé

Direção do vento	V _{vento} (m/s)	V _{chaminé} (m/s)	Posição	V (m/s)	Posição	V (m/s)	Posição	V (m/s)
120°	3,29	2,60	1	2,53	4	2,13	7	1,73
			2	2,24	5	2,08	8	1,91
			3	2,17	6	1,75	9	1,33
	3,29	3,08	1	2,68	4	2,06	7	0,62
			2	2,51	5	2,12	8	0,39
			3	2,42	6	1,81	9	0,61
	3,28	3,68	1	2,88	4	2,24	7	0,64
			2	2,9	5	2,49	8	0,41
			3	2,99	6	2,25	9	0,74
	3,23	4,37	1	3,13	4	2,12	7	1,01
			2	3,36	5	2,73	8	0,63
			3	3,42	6	2,52	9	0,90
	3,16	4,95	1	3,38	4	2,27	7	1,11
			2	3,71	5	3,11	8	0,60
			3	3,94	6	2,98	9	0,96
150°	3,17	2,82	1	3,22	4	2,21	7	1,98
			2	3,11	5	2,17	8	1,81
			3	3,13	6	1,99	9	0,82
	3,21	3,32	1	3,41	4	2,36	7	1,72
			2	3,33	5	2,36	8	1,46
			3	3,4	6	2,25	9	1,15
	3,25	4,09	1	3,82	4	2,71	7	1,11
			2	3,8	5	2,75	8	1,05
			3	3,99	6	2,77	9	1,22
	3,27	4,84	1	4,2	4	2,93	7	1,27
			2	4,27	5	3,1	8	1,17
			3	4,53	6	3,24	9	1,29
	3,23	5,58	1	4,46	4	3,33	7	1,13
			2	4,66	5	3,48	8	1,18
			3	4,96	6	3,62	9	1,34
180°	3,07	2,62	1	3,52	4	2,78	7	1,93
			2	3,50	5	2,82	8	2,13
			3	3,52	6	2,78	9	1,93
	3,16	3,09	1	3,87	4	3,05	7	1,72
			2	3,85	5	3,09	8	1,67
			3	3,87	6	3,05	9	1,72
	3,15	3,76	1	4,19	4	3,31	7	1,85
			2	4,20	5	3,37	8	1,23
			3	4,19	6	3,31	9	1,85
	3,13	4,41	1	4,64	4	3,78	7	1,03
			2	4,63	5	3,81	8	1,39
			3	4,64	6	3,78	9	1,03
	3,17	5,03	1	5,12	4	4,18	7	1,82
			2	5,13	5	4,22	8	0,91
			3	5,12	6	4,18	9	1,82

Para todos os ensaios, manteve-se uma velocidade média do vento de 3m/s e variou-se a velocidade do ar no interior da chaminé, em um intervalo aproximado de 2,5m/s a 5,5m/s. Para facilitar a visualização tanto do padrão do fluxo de ar como da velocidade do ar nos diferentes pontos analisados, foram elaborados gráficos com isolinhas de velocidade, para cada direção do vento (Figuras 7.11 a 7.17). Lembrando que as direções do vento de 0° e 45° provocam fluxos contrários aos do efeito térmico e as direções de 120°, 150° e 180° provocam fluxos que se somam aos do efeito térmico. Os gráficos correspondem a uma seção horizontal da saída da chaminé, sendo o eixo das abscissas correspondente à largura e o eixo das ordenadas correspondente à espessura do canal da chaminé. Cada linha indica uma velocidade do fluxo de ar.

Para uma direção de vento de 0° e velocidade do ar no interior da chaminé inferior à velocidade do vento (Figura 7.11), observou-se um fluxo de ar simétrico no interior da chaminé. Pelos resultados, pôde-se notar um incremento no fluxo de ar, resultante da junção do fluxo de ar proveniente do vento incidente diretamente na abertura com o fluxo de ar proveniente da chaminé. A junção dos fluxos pode ser claramente observada, a partir da linha 4 do eixo y, onde houve um aumento significativo da velocidade do ar e uma mudança no padrão de distribuição do ar.

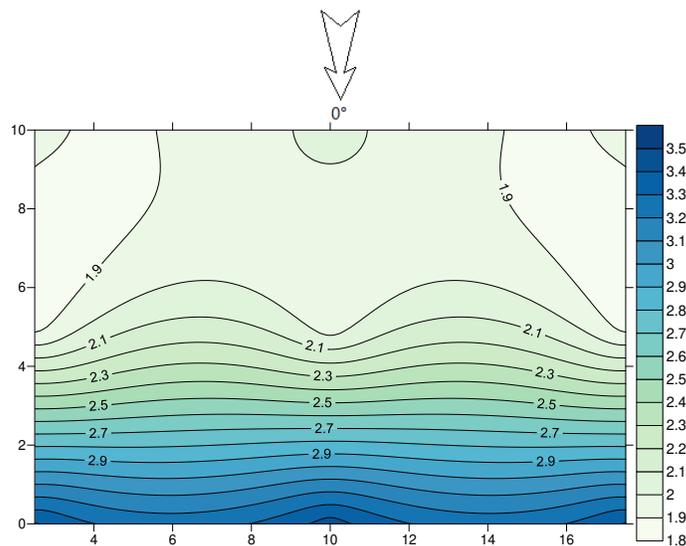


Figura 7.11: Incidência de vento a 0°, velocidade do ar no canal da chaminé de 2,74m/s

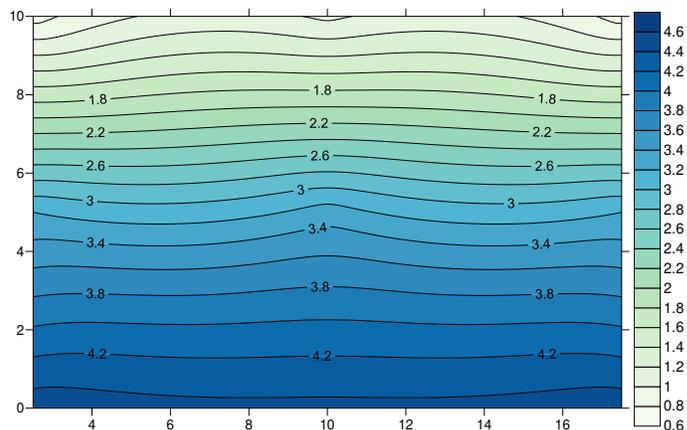


Figura 7.12: Incidência de vento a 0°, velocidade do ar no canal da chaminé de 5,30m/s

Quando a velocidade no interior da chaminé superou a velocidade do vento (Figura 7.12), notou-se uma menor influência do vento no padrão do fluxo de ar no interior da chaminé. O aumento da velocidade do ar no interior do canal resultou em um padrão mais constante de distribuição. A diferença de velocidade do ar entre as extremidades e o centro do canal só pôde ser notada na região mais próxima à abertura localizada a barlavento, o que indica menor penetração do vento no interior da chaminé.

Para uma direção de vento de 45° e velocidade do ar no interior da chaminé inferior à velocidade do vento (Figura 7.13), observou-se uma zona de sombra de vento na face lateral direita da chaminé, onde houve uma redução na velocidade do ar e um princípio de formação de vórtices, ou seja, uma recirculação do ar em um mesmo ponto. Em vista disso, essa direção de incidência do vento ocasionou uma redução na seção útil para passagem do ar na chaminé, interferindo negativamente na tiragem do ar.

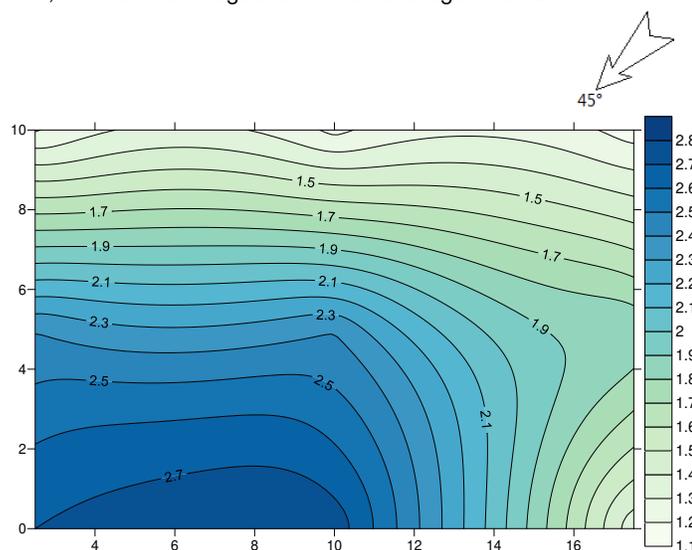


Figura 7.13: Incidência de vento a 45° , velocidade do ar no canal da chaminé de $2,54\text{ m/s}$

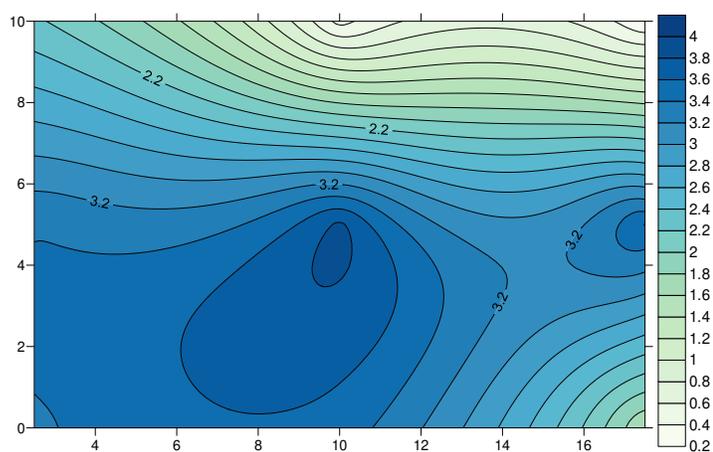


Figura 7.14: Incidência de vento a 45° , velocidade do ar no canal da chaminé de $4,96\text{ m/s}$

No caso da velocidade do ar no interior da chaminé superar a velocidade do vento (Figura 7.14), evidenciou-se a formação de vórtices no interior do canal, o que indica um grau de turbulência elevado do fluxo de ar. Isso pode ter sido ocasionado pelo fato do vento incidente ser contrário à abertura de entrada de ar do

ambiente, o que indica que a ação dos ventos contribuiu negativamente para a ascensão do ar no interior do canal da chaminé.

Tal hipótese pode ser reafirmada ao observar-se o fluxo de ar na região das aberturas de saída do ar resultante das incidências do vento a 120° e a 150°, ou seja, favoráveis à abertura de entrada de ar do ambiente (Figuras 7.15 e 7.16). Formou-se uma zona de sombra de vento na face lateral direita da chaminé, resultante da incidência oblíqua do vento, mas não houve formação de vórtices no interior do canal.

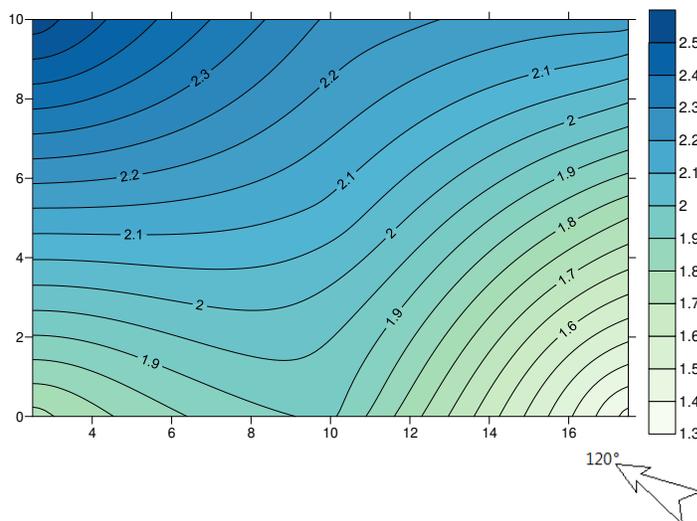


Figura 7.15: Incidência de vento a 120°, velocidade do ar no canal da chaminé de 2,60m/s

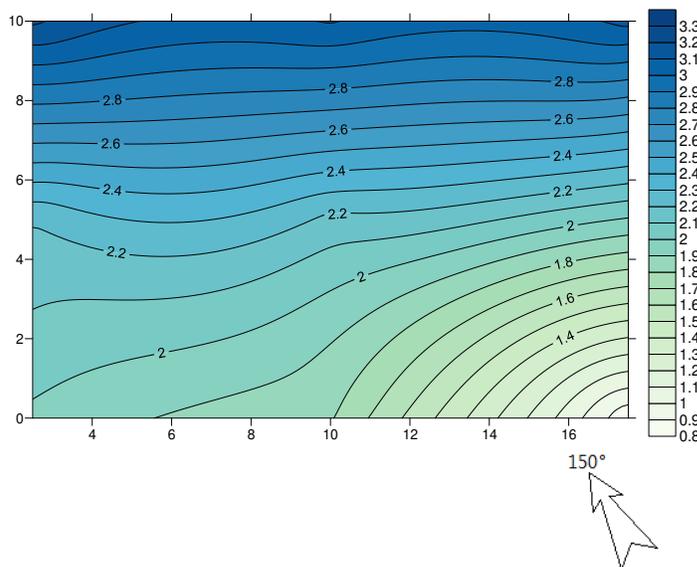


Figura 7.16: Incidência de vento a 150°, velocidade do ar no canal da chaminé de 2,82m/s

Ao contabilizar o efeito combinado das componentes térmica e eólica no fluxo de ar, pôde-se notar uma maior profundidade de penetração do vento no interior do canal da chaminé no caso da incidência de vento a 150°, em comparação à incidência de 120°. Isso pode ser constatado pelo fato de que, para uma mesma velocidade do vento e velocidades do ar próximas no interior do canal da chaminé, houve um acréscimo de 32% na velocidade do ar na região das aberturas de saída do ar, no caso do vento incidente a 150°.

Assim como a 0° , a incidência de vento a 180° (Figura 7.17) resultou em um fluxo de ar simétrico no interior da chaminé. No entanto, neste caso houve uma menor profundidade de penetração do vento no interior da chaminé. Isso resulta do fato do vento estar incidindo diretamente sobre a abertura de entrada de ar do ambiente, ou seja, estar em uma direção favorável à ascensão e tiragem do ar por efeito chaminé. Em vista disso, é pequena a probabilidade de ocorrência de fluxo reverso na chaminé, e é pequena a entrada de vento na chaminé pela abertura de saída do ar.

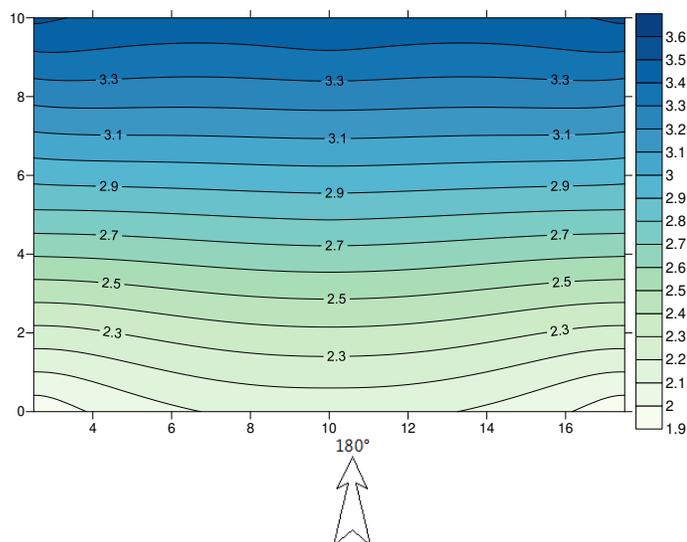


Figura 7.17: Incidência de vento a 180° , velocidade do ar no canal da chaminé de 2,62m/s

7.4 Considerações finais

As análises aqui empreendidas evidenciaram a importância do estudo do efeito conjugado das componentes térmica e eólica sobre o desempenho de uma chaminé solar, mesmo em casos onde a velocidade do vento seja baixa. Observou-se uma redução de até 47% na vazão volumétrica da chaminé, resultante de uma incidência do vento contrária à abertura de entrada de ar do ambiente, a uma velocidade de 1m/s.

As análises do fluxo de ar nas aberturas de saída do ar da chaminé solar indicaram grande sensibilidade à direção do vento, tanto nos padrões de velocidade e direção do fluxo de ar como nas perdas de carga resultantes da ação dos ventos. Esse estudo foi realizado considerando-se as aberturas de saída do ar sem qualquer dispositivo especial de proteção contra a incidência direta do vento. Isso demonstra a importância de um projeto adequado das aberturas de saída do ar em uma chaminé solar.

Recomenda-se o uso de algum dispositivo de proteção contra a incidência direta de ventos na abertura de saída de ar da chaminé, de forma que ela possa ficar sempre protegida do vento incidente. O dispositivo pode ser, por exemplo, um exaustor eólico (também chamado de ventilador estático) (Figura 7.18). Este exaustor é um aparelho que, por ação dos ventos, gera uma depressão no interior do canal de extração, opondo-se à inversão do escoamento e proporcionando um aumento da diferença de pressão entre as aberturas de entrada e saída do ar. Existem diversos modelos de exaustor disponíveis no mercado, que diferem entre si pelo fator de depressão, ou seja, pela razão entre a depressão criada pelo vento no interior do ventilador e a pressão dinâmica do vento incidente. Loureiro (2008) apresentou um trabalho de caracterização do comportamento

de alguns ventiladores estáticos, visando facilitar sua escolha pelo projetista.



Figura 7.18: Exemplo de exaustor eólico

Outra maneira simples, porém não tão eficaz, de amenizar o problema é o uso de uma abertura de saída do ar na chaminé que seja aberta para todas as direções do vento, o que impediria a formação de barreiras e turbilhões no interior do canal.

8. CONCLUSÕES

A presente pesquisa teve como intuito investigar o desempenho de chaminés solares para promover a ventilação natural em edificações de baixa altura, localizadas em climas típicos do território brasileiro. O uso desta estratégia justifica-se quando a ocorrência de ventos é muito baixa ou nula pois, nessas situações, torna-se inviável o uso de estratégias de ventilação por ação dos ventos.

Pelos estudos realizados, chegou-se à conclusão de que as chaminés solares apresentam significativo potencial para incrementar a ventilação natural em edificações. No entanto, para que o sistema funcione adequadamente, devem ser observadas diversas características construtivas – incluindo aspectos geométricos, materiais utilizados, rugosidade de superfícies, perdas por atrito e interferência do vento – que podem variar de acordo com o local de implantação. Essas características foram abordadas nesta pesquisa, utilizando-se, como métodos, monitoramento em uma célula de teste de escala real, ensaios em túnel de vento em modelos de escala reduzida, modelos matemáticos adaptados e programas de simulação computacional.

Com relação aos aspectos geométricos, observou-se que, em grande parte do Brasil, torna-se vantajoso utilizar coletores solares inclinados, na medida em que há uma redução do ângulo de incidência da radiação e uma conseqüente elevação da irradiância sobre a cobertura de vidro. Entretanto, para evitar a redução na diferença de altura entre as aberturas de entrada e saída do ar, propôs-se a utilização de um extensor vertical acoplado à chaminé, de modo a garantir a manutenção de uma mesma altura útil ao conjunto, independentemente da inclinação do coletor. As horas do dia em que a ventilação natural é mais necessária como estratégia de conforto térmico em edificações coincide com as maiores taxas de fluxo de ar, o que justifica o uso dessa configuração de chaminé para ventilação natural de edificações localizadas em regiões de baixa latitude.

Os resultados apontaram vantagens no uso dessa configuração, para todas as cidades analisadas. No estudo experimental conduzido em São Carlos, SP, a vazão volumétrica máxima da chaminé solar com extensor foi de 86,9m³/h, com o coletor solar inclinado para máxima irradiância no mês de março (20° em relação ao plano horizontal). Por simulações computacionais, obtiveram-se resultados de vazão volumétrica máxima de 203,9m³/h em Belém, 122,8m³/h em Brasília e 123m³/h em Curitiba, para o solstício de verão. A título de comparação, podem ser citados estudos realizados por Mathur, Mathur e Anupma (2006) para uma chaminé solar localizada em Jaipur, Índia, de mesmo comprimento e largura, 45° de inclinação do coletor e canal de ar com o dobro da espessura. Os resultados obtidos pelos autores indicaram uma vazão máxima de 277,2m³/h¹.

Observou-se uma grande influência da espessura do canal de ar sobre o desempenho da chaminé solar. Ao dobrar a espessura de 0,1m para 0,2m, por exemplo, houve um incremento de aproximadamente 100% na vazão volumétrica da chaminé, para as cidades de Curitiba, Florianópolis, Santos, Brasília e Campo Grande. No entanto, deve-se observar o limite no aumento da espessura, para que não ocorra inversão do fluxo de ar no canal da chaminé. As características climáticas do local levam à definição de uma espessura ótima, a partir da qual se observa uma estabilização do fluxo de ar no interior da chaminé. Tais espessuras foram

¹ Vide Tabela 2.4, capítulo 2.

definidas para uma cidade representativa de cada zona bioclimática brasileira. Em Santa Maria, por exemplo, uma chaminé solar de 1m de comprimento, 1m de largura, 0,3m de espessura do canal e 10° de inclinação com a horizontal obteve uma vazão volumétrica máxima de 111m³/h, por resultados obtidos através de simulação computacional. Para a mesma espessura do canal, Adam, Yamanaka e Kotani (2002) obtiveram uma vazão volumétrica máxima de 273,6m³/h em uma chaminé solar de 1m de largura, 45° de inclinação e o dobro do comprimento¹.

Estudos realizados sobre o aumento no comprimento da chaminé solar mostraram menor impacto desta característica geométrica no desempenho do sistema, se comparado ao aumento na espessura do canal de ar. O incremento na vazão volumétrica da chaminé não é proporcional ao aumento no comprimento, ou seja, há uma queda progressiva no incremento de vazão, conforme aumenta o comprimento da chaminé. A análise empreendida mostrou ser necessário estabelecer um comprimento ideal para a chaminé, de modo a otimizar seu desempenho em função do ambiente a ser ventilado. Equações foram desenvolvidas com o intuito de auxiliar nessa definição. Uma chaminé solar localizada em Brasília, por exemplo, com 1m de largura, 0,3m de espessura do canal de ar, 10° de inclinação do coletor solar e 1,5m de comprimento apresentou vazão volumétrica máxima de 112,5m³/h, para o solstício de verão, em resultados obtidos através de simulação computacional. Para uma chaminé solar de mesmo comprimento, estudos desenvolvidos por Khedari et al (2000) apresentaram uma vazão volumétrica máxima de 90m³/h, para uma chaminé solar localizada em Bangkok, Tailândia, de 1m de largura, 0,14m de espessura do canal de ar e 25° de inclinação¹.

Os modelos computacionais utilizados no desenvolvimento dessas análises passaram por um processo prévio de calibração, baseado nos resultados obtidos no monitoramento experimental. O mesmo processo também foi utilizado para calibrar um modelo matemático adaptado da literatura especializada. Os dois modelos teóricos mostraram ser ferramentas apropriadas para avaliação de desempenho de uma chaminé solar, porém a simulação computacional mostrou melhor concordância com os dados experimentais. Um fator que apresentou importância determinante na confiabilidade dos resultados obtidos pelos modelos teóricos foi a correta previsão das perdas de carga da chaminé, representadas pelo coeficiente de descarga. Mudanças no valor dessa variável afetam linearmente os resultados de fluxo de ar obtidos, sendo alta, portanto, a sensibilidade dos modelos a esse parâmetro.

O valor do coeficiente de descarga de uma chaminé solar depende da geometria das aberturas e do canal de passagem do ar, da rugosidade das superfícies e da contração do fluxo de ar nas aberturas. Um fator importante que prejudica o desempenho de chaminés solares com inclinação próxima à horizontal é o aumento das perdas de carga provocado pelas curvas mais acentuadas da instalação. Análises empreendidas por simulação computacional mostraram que o melhor aproveitamento da radiação solar pode compensar a perda de carga mais elevada. Contudo, a questão deve ser cuidadosamente analisada durante o processo de projeto. Na célula de teste experimental, por exemplo, as resistências das seções curvas, das aletas do coletor e das aberturas de entrada e saída do ar foram tal que resultaram em uma perda de carga bastante elevada. Isso afetou diretamente o desempenho da chaminé, resultando em taxas de fluxo de ar abaixo do esperado.

Pelos ensaios realizados em túnel de vento, pôde-se observar que grande parte das perdas de carga da instalação ocorrem por ação dos ventos e próximo à abertura de saída do ar, sendo as perdas de carga no trecho do canal da chaminé menos significativas. Essas perdas são decorrentes de resistências por ação do atrito e da turbulência, e apresentam variações conforme a direção do vento incidente.

Verificou-se um regime de escoamento variável entre laminar e turbulento no interior do canal da chaminé. Tal variação é resultante de mudanças na taxa de fluxo de ar da chaminé, que depende diretamente das características climáticas do local, como velocidade do vento, temperatura do ar externo e irradiância solar. Como a variação no número de Reynolds resulta em uma variação das características do escoamento e das pressões estáticas dentro da chaminé, alterações na sua geometria resultam em diferentes comportamentos frente ao vento. Esta sinuosidade nos resultados impediu o desenvolvimento de conclusões generalizadas sobre a interferência do vento no funcionamento da chaminé. Em vista disso, os efeitos conjugados das componentes térmica e eólica sobre o desempenho de uma chaminé solar foram analisados para apenas uma configuração geométrica.

Tanto pelos resultados experimentais como pelos obtidos por simulação, observou-se uma forte relação da velocidade e da direção do vento com a taxa de fluxo de ar da chaminé, inclusive para ventos a baixas velocidades. Na célula de teste experimental, por exemplo, a oscilação da velocidade do ar no interior da chaminé deveu-se, em grande parte, à interferência causada pela mudança constante na velocidade e direção do vento. Nos estudos por simulação computacional, a avaliação da interferência do vento a uma velocidade de 1m/s e incidência contrária à abertura de entrada de ar do ambiente, por exemplo, indicou uma redução de até 47% na vazão volumétrica da chaminé. Esses resultados indicam a importância de um projeto adequado das aberturas de saída do ar na chaminé, que preveja uma proteção contra a incidência direta de ventos, para que o sistema atue somente por efeito da diferença de temperatura. O projeto arquitetônico da abertura de saída de ar da chaminé poderá variar caso a caso, podendo ser um elemento fixo ou variar a orientação, dependendo do projeto.

Ao comparar-se uma chaminé solar com uma chaminé convencional de mesma configuração geométrica, os resultados obtidos por simulação computacional para cidades selecionadas do zoneamento bioclimático brasileiro indicam uma grande aplicabilidade da chaminé solar para promover a ventilação natural. A vazão volumétrica obtida com a chaminé solar apresentou um incremento de 37% a 159% em relação à chaminé convencional, sendo os melhores desempenhos obtidos nas cidades localizadas mais próximas à linha do Equador. Os resultados numéricos indicam vazões volumétricas entre 90 e 140m³/h, que correspondem a uma taxa de renovação de ar horária entre quatro e seis renovações, para um ambiente de dimensões 3m x 3m x 2,7m.

Através dos resultados apresentados, tornou-se evidente a importância do desenvolvimento de estudos sobre a chaminé solar como meio para promover a ventilação natural em edificações localizadas no território brasileiro. Em função disso, recomenda-se dar continuidade ao trabalho já desenvolvido, através das seguintes sugestões:

- Detalhamento do projeto do coletor solar, incluindo materiais utilizados na sua construção e formato geométrico da superfície absorvedora. O uso de aletas longitudinais, conforme apresentado na célula de teste experimental, demonstrou problemas na condução de calor e, conseqüentemente, pouco aproveitamento da radiação solar no canal entre aletas. Outras propostas podem ser elaboradas e testadas.
- Detalhamento do projeto das aberturas de entrada e saída de ar da chaminé solar, de modo a garantir melhor aproveitamento das componentes térmica e eólica para o funcionamento do sistema.

- Aprofundamento do estudo dos padrões de fluxo de ar no interior da chaminé solar, através de uma análise ponto a ponto do escoamento dentro do canal. Esses estudos podem ser realizados com o auxílio de simulações de dinâmica de fluidos computacional (CFD).
- Estudo do desempenho da chaminé solar associada a outras técnicas de condicionamento térmico passivo, como parede Trombe para ventilação natural, sistemas de resfriamento evaporativo, fachadas de dupla pele ventiladas, entre outros.
- Estudo de melhores formas de incorporação da chaminé solar às soluções construtivas comumente utilizadas em edificações.
- Análise de desempenho de chaminés solares instaladas em edifícios altos.
- Estudo da integração da chaminé solar a sistemas artificiais de condicionamento térmico. Pode-se avaliar o uso da chaminé como mecanismo propulsor do sistema de exaustão de ar de expurgo de ambientes com ar condicionado, por exemplo.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHÃO, C. C. L. **Análise da estrutura de consumo de energia pelo setor residencial brasileiro**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ: 2003.

ADAM, Z. **On the performance of solar chimneys**: with particular reference on the prediction of flow rate. Tese (doutorado em Engenharia), Departamento de Arquitetura da Faculdade de Engenharia, Universidade de Osaka, 2003.

ADAM, Z.; YAMANAKA, T.; KOTANI, H. Mathematical model and experimental study of airflow in solar chimneys. In: International Conference on Air Distribution in Rooms, 8, 2002, Copenhagen, Dinamarca. **Proceedings...** Copenhagen: ROOMVENT, 2002. Disponível em: <<http://www.arch.eng.osaka-u.ac.jp/~kotani/rv2002-3.pdf>>. Acesso em: 23 julho 2010.

AFONSO, C.; OLIVEIRA, A. Solar chimneys: simulation and experiment. **Energy and Buildings**, v. 32, n. 1, p. 71-79, Jun. 2000.

AHMAD, H. B.; SALEH, R. B.; HONG, L. F. **Towards development of tropical solar architecture**: the use of solar chimney as stack induced ventilation strategy. Project Report. Faculty of Built Environment, Universiti Teknologi Malaysia, Skudai, Johor, Malaysia, 2006. Disponível em: <<http://eprints.utm.my/2805/>>. Acesso em: 02 junho 2008.

ALLARD, F.; GHIAUS, C.; MANSOURI, Y. Natural ventilation for health, comfort and energy efficiency. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 7, 2003, Curitiba-PR. **Anais...** Curitiba-PR: ENCAC, 2003. 21p. CD-ROM.

ALTEMANI, C. **Estudo de aquecedores solares de convecção natural para secagem**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP: 1976.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE 55-2004** - Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, 2004

_____. **ASHRAE handbook**: fundamentals. Atlanta: ASHRAE, 2005.

ANDERSEN, K. T. Theoretical considerations on natural ventilation by thermal buoyancy. **ASHRAE Transactions**, v. 101, n. 2, p. 1103-1117, 1995.

ARCE, J. et al. Experimental study for natural ventilation on a solar chimney. **Renewable Energy**, v. 34, n. 12, p. 2928-2934, Dec. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15220** - Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, Set. 2005.

_____. **NBR 6123** - Forças devidas ao vento em edificações. São Paulo: ABNT, 1988.

AZEVEDO, L. F. A.; SPARROW, E. M. Natural convection in open-ended inclined channels. **Heat Transfer**, v. 107, n. 893, 1985.

BAHARVAND, E. **How to model a wall solar chimney?** Complexity and predictability. Dissertação (Mestrado em Arquitetura), Universidade Técnica de Eindhoven, 2010.

BANSAL, N. K.; MATHUR, R.; BHANDARI M. S. Solar chimney for enhanced stack ventilation. **Building and Environment**, v. 28, n. 3, p. 373-377, Jul. 1993.

_____. A study of solar chimney assisted wind tower system for natural ventilation in buildings. **Building and Environment**, v. 29, n. 4, p. 495-500, Oct. 1994.

BANSAL, N. K. et al. Modeling of window-sized solar chimneys for ventilation. **Building and Environment**, v. 40, n. 10, p. 1302-1308, Oct. 2005.

BASSIOUNY, R.; KORAH, N. Effect of solar chimney inclination angle on space flow pattern and ventilation rate. **Energy and Buildings**, v. 39, n.2, p. 190-196, Fev. 2009.

BASSIOUNY, R.; KOURA, N. An analytical and numerical study of solar chimney use for room natural ventilation. **Energy and Buildings**, v. 40, n.5, p. 865-873, Mai. 2008.

BERDAHL, P.; MARTIN, M. Emissivity of clear skies. **Solar Energy**, v. 32, n. 5, p. 663-664, 1984.

BOUCHAIR, A. Solar chimney for promoting cooling ventilation in southern Algeria. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 15, n. 1, p. 81-93, 1994.

BRASIL. **Balanco energético nacional 2011: ano base 2010**. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2011. 266p.

BRASIL, C. S. et al. Avaliação da secagem de tomates em uma chaminé solar. In: Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia de Alimentos: Estratégia para o Desenvolvimento, 19., Recife, 2004. **Anais...** Campinas/São Paulo: CBCTA, 2004.

BUREK, S.; HABEB, A. Air flow and thermal efficiency characteristics in solar chimneys and Trombe walls. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 2, p. 128-135, Feb. 2007.

CAVALCANTI, F. **Chaminé solar como alternativa para incrementar a ventilação natural em espaços internos**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP: 2010.

CHEN, Z. D. et al. 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.

CHUNGLOO, S. The field investigation of dimensionless convection heat transfer coefficient in the inclined roof solar chimney. **Journal of Architectural/Planning Research and Studies**, v. 6, n. 1, 2009.

- CHUNGLUO, S.; LIMMEECHOKCHAI, B. A numerical study of natural ventilation in buildings: utilized solar chimney and cool ceiling. In: Joint International Conference on "Sustainable Energy and Environment", 2, 2006, Bangkok, Tailândia. **Proceedings...** Bangkok: SEE, 2006.
- CORTEZ, M. et al. A utilização da chaminé solar na desidratação da maçã. In: Simpósio Latino Americano de Ciência de Alimentos, 5., Campinas, 2003. **Anais...** Campinas: 2003. CD-ROM.
- CÓSTOLA, D. **Ventilação por ação do vento no edifício**: procedimentos para quantificação. Dissertação (Mestrado em Arquitetura), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2006.
- DAVENPORT, A.G.; HUI, H.Y.L. **External and internal wind pressures on cladding of buildings**. Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory, University of Western Ontario, London, Ontario, Canada. BLWT- 820133, 1982.
- DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas**: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP: 2008.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering or thermal processes**. 2ª edição. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991.
- ENERGYPLUS. **EnergyPlus engineering reference**: the reference to EnergyPlus calculations. US Department of Energy, 2010a.
- ENERGYPLUS. **Input output reference**: the encyclopedic reference to EnergyPlus input and output. US Department of Energy, 2010b.
- EVANS, B. H. **Research Report 59**, Texas, Texas Engineering Station, College Station, 1957.
- FERREIRA, A. et al. Technical feasibility assessment of a solar chimney for food drying. **Solar Energy**, v. 82, n. 3, p. 198-205, Mar. 2008.
- FEUSTEL, H. E.; SHERMAN, M. H. A simplified model for predicting air flow in multizone structures. **Energy and Buildings**, v. 13, n. 3, p. 217-230, Jun. 1989.
- FRANK, B. **Convecção induzida pelo sol**: chaminé solar. Dissertação (Mestrado). Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS: 1981.
- FREIXANET, V. A. F.; VIQUEIRA, M. R. **Ventilación natural**: cálculos básicos para arquitectura. México: UAM, 2004.
- FROTA, A. B. **Geometria da insolação**. São Paulo: Geros, 2004. 289p.
- FROTA, A.; SCHIFFER, S. **Manual de conforto térmico**. 5 ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.
- 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.

GARG, H. P. Solar food drying. **Advances in Solar Energy Technology Collection and Storage Systems**. D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, v. 1, p. 1-123, 1987.

GARG, H. P. et al. Theoretical analysis of a new finned type solar air heater. **Energy**, v. 16, n. 10, p. 1231-1238, Jul, 1991.

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

_____. **Passive and low energy cooling of buildings**. USA: John Wiley & Sons, 1994.

GONÇALVES, H.; GRAÇA, J. M. **Conceitos bioclimáticos para os edifícios em Portugal**. Lisboa: Tipografia Peres, nov. 2004. Disponível em: < <http://www.adene.pt/NR/rdonlyres/00000090/krpwqvoncsjpenbxgwlyzdvgcsskwwqh/ConceitosBioclim%C3%A1ticos.pdf> >. Acesso em: 08 julho 2010.

HARRIS, D. J.; HELWIG, N. Solar chimney and building ventilation. **Applied Energy**, v. 84, n. 2, p. 135-146, Fev. 2007.

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.

HOLMAN, J. P. **Heat transfer**. 9ª edição. Boston: McGraw Hill, 2002.

IDEL'CIK, I.E. **Memento des pertes de charge**: coefficients de pertes de charge singulières et de pertes de charge par frottement, Editions Eyrolles, France. Traduzido do russo por madame M. Meury, 1999.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. (Trad. Horácio Macedo) 3. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1992.

KHANAL, R.; LEI, C. Solar chimney: a passive strategy for natural ventilation. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 8, p. 1811-1819, Ago. 2011.

KHEDARI, J. et al. Natural Ventilation of Houses by Trombe Wall. In: Asean Renewable Energy Conference, 2, 1997, Phuket, Tailândia. **Proceedings...** Phuket: AREC, p.266-269, 1997. Disponível em: < <http://www.thaiscience.info/>>. Acesso em: 23 julho 2010.

KHEDARI, J. et al. Field measurements of performance of roof solar collector. **Energy and Buildings**, v. 31, n. 3, p. 171-178, Apr. 2000.

KOCH-NIELSEN, H. **Stay cool**. Londres: James & James, 2002.

LEE, K. H; STRAND, R. K. Enhancement of natural ventilation in buildings using a thermal chimney. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 6, p. 615-621, Jun. 2009.

LI, A. et al. Heat transfer and natural ventilation airflow rates from single-sided heated solar chimney for buildings. **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**, v. 3, n. 2, p. 233-238, Nov. 2004. Disponível em: < http://www.jstage.jst.go.jp/article/jaabe/3/2/233/_pdf >. Acesso em: 26 junho 2008.

LOUREIRO, J. **Caracterização do comportamento de ventiladores estáticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, 2008.

MAIA, C. et al. Analysis of the airflow in a prototype of a solar chimney dryer. **Heat Transfer Engineering**, v. 30, n. 5, p. 393-399, Jan. 2009a.

MAIA, C. et al. Theoretical evaluation of the influence of geometric parameters and materials on the behavior of the airflow in a solar chimney. **Computers & Fluids**, v. 38, n. 3, p. 625-636, Mar. 2009b.

MARQUES DA SILVA, F. V. **Ventilação natural de edifícios: turbulência atmosférica**. Tese (doutorado), Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, 2003.

MARTINS, F. et al. Mapas de irradiação solar para o Brasil: resultado do projeto SWERA. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XII. **Anais...** p. 3137-3145. Goiânia-GO: INPE, Abr. 2005. Disponível em: <http://www.lepten.ufsc.br/publicacoes/solar/eventos/2005/GOIANIA/martins_pereira.pdf>. Acesso em: 19 agosto 2010.

MARTINS, R. R. et al. Secador de grãos com uso de energia solar. **Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável**, Porto Alegre, RS, v. 3, n. 1, Jan.- Mar. 2002.

MATHUR, J.; ANUPMA; MATHUR, S. Experimental investigation on four different types of solar chimney. In: National Conference on Advances in Energy Research, 4 & 5., 2006, Mumbai, India. **Proceedings...** Mumbai: AER, Dec. 2006. 6 p. Disponível em: <www.ese.iitb.ac.in/aer2006_files/papers/127.pdf>. Acesso em: 26 maio 2008.

MATHUR, J.; MATHUR, S.; ANUPMA. Summer performance of inclined roof solar chimney for natural ventilation. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 10, p. 1156-1163, Out. 2006.

MATHUR, J. et al. Experimental investigations on solar chimney for room ventilation. **Solar Energy**, v. 80, n. 8, p. 927-935, Ago. 2006.

MUNEER, T. **Solar radiation and daylight models**. Elsevier Ltd., Jordan Hill, Oxford. 2. Ed., 2004.

ONG, K. S. A mathematical model of a solar chimney. **Renewable Energy**, v. 28, n. 7, p. 1047-1060, Jun. 2003.

ONG, K. S.; CHOW, C. C. Performance of a solar chimney. **Solar Energy**, v. 74, n. 1, p. 1-17, Jan. 2003.

PRATINHONG, N. et al. Feasibility study of inducing natural ventilation and reducing heat transmitted into housing by using a modified Trombe wall. In: Asean Renewable Energy Conference, 2, 1997, Phuket, Tailândia. **Proceedings...** Phuket: AREC, 1997. Disponível em: <<http://www.thaiscience.info/>>. Acesso em: 23 julho 2010.

RORIZ, M. **Desempenho de chaminés solares para indução da ventilação natural em edificações submetidas a climas típicos do Brasil**. Relatório científico final, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, 2010.

RORIZ, V.; DORNELLES, K.; RORIZ, M. Fatores determinantes da absorptância solar de superfícies opacas. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 9, 2007, Ouro Preto-MG. **Anais...** Ouro Preto: ENCAC, 2007. CD-ROM.

SAKONIDOU, E. P., KARAPANTSIOS, T., BALOUKTSIS, A., CHASSAPIS, D. Modeling of the optimum tilt of a solar chimney for maximum air flow. **Solar Energy**, v. 82, n. 1, p. 80-94, Jan, 2008.

SANDBERG, M.; MOSHFEGH, B. Ventilated-solar roof air flow and heat transfer investigation. **Renewable Energy**, v. 15, p.287-292, 1998.

SILVA, F. M. et al. Assessing natural urban ventilation through an integrated model. In: ANNUAL AIVC CONFERENCE, 19., 1998, Oslo. **Proceedings...** Oslo, Noruega: AIVC, 1998.

SINGH, S. N. Performance studies on continuous longitudinal fins solar air heater. In: National Conference on Advances in Energy Research, 4 e 5, 2006, Bombay, India. **Proceedings...** Bombay: AER, 2006. p. 205 - 210. Disponível em: <http://www.ese.iitb.ac.in/aer2006_files/papers/011.pdf>. Acesso em: 24 junho 2008.

SOLAR innovation ideas: Victorian solar innovation initiative. Disponível em: <http://www.sustainability.vic.gov.au/resources/documents/VSII_Sheets_-_solar_chimney.pdf>. Acesso em: 10 set. 2008.

SWINBANK, W.C. Long-wave radiation from clear skies. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 89, n. 381, p. 339-348, 1963.

TANG, R.; ETZION, Y.; MEIR, I. A. Estimates of clear night sky emissivity in the Negev Highlands, Israel. **Energy Conversion and Management**, v. 45, n. 11-12, p. 1831-1843, Jul. 2004.

WALTON, G. N. Thermal Analysis Research Program Reference Manual. **NBSSIR 83-2655**. National Bureau of Standards, p. 21, 1983.

WATMUFF, J. H.; CHARTERS, W. W. S.; PROCTOR, D. Solar and wind induced external coefficients for solar collectors. **COMPLES**, v. 2, n. 56, 1977.

WONG, N.; HERYANTO, S. The study of active stack effect to enhance natural ventilation using wind tunnel and computational fluid dynamics (CFD) simulations. **Energy and Buildings**, v. 36, n. 7, p. 668-678, Jul. 2004.

ZAMORA, B.; KAISER, A. Numerical study on mixed buoyancy-wind driving induced flow in a solar chimney for building ventilation. **Renewable Energy**, v. 35, n. 9, p. 2080-2088, Sep. 2010.

ANEXO I

Resultados obtidos no monitoramento da célula de teste.

Tabela 1: Dados adquiridos em março de 2010

Dia e hora	Dados Estação INMET					Temperaturas do ar no coletor (°C)			Velocidades do ar no coletor (m/s)			Temperaturas superficiais no coletor (°C)						Cálculo				
	TBS	UR	VeV	DirV	Pluv	Thrz	CanV1	CanA1	CanV2	CanA2	CanV1	CanA1	CanV2	CanA2	Vid1	Abs1	Vid2	Abs2	Ale2	Q	Ivid	
11.05	188	80	0	30	0	0	216	197	223	188	0,214	0,05	0,23	0,063	175	208	214	168	197	205	54,52	0
11.15	185	81	0	38	0	0	209	19	215	183	0,224	0,053	0,239	0,07	169	20	205	161	19	197	58,25	0
11.25	178	84	0,5	68	0	0	204	185	21	179	0,209	0,052	0,214	0,038	165	195	20	158	185	192	47,14	0
11.35	178	83	0,2	69	0	0	198	179	20,5	177	0,197	0,049	0,211	0,057	16	189	194	152	179	186	50,67	0
11.45	175	84	0,4	104	0	0	194	175	20	173	0,195	0,051	0,2	0,045	15,6	184	189	149	175	182	47,26	0
11.55	173	86	0	279	0	0	194	192	20,6	179	0,168	0,068	0,186	0,055	16,7	199	194	164	198	19	52,35	0
11.65	203	77	0,5	108	0	0,76	21	207	20,9	208	0,178	0,143	0,186	0,12	17,6	21	199	175	214	197	90,68	62
11.75	234	62	2,3	318	0	2,86	27,4	238	32,3	266	0,098	0,091	0,185	0,064	26,9	33,1	262	285	37,3	28	57,32	275
11.85	255	56	2,4	326	0	5,34	33,7	27	42,5	32,6	0,114	0,101	0,169	0,069	34	44,5	32	36,4	50,9	35,4	61,61	535
11.95	269	53	2,5	324	0	7,29	37,1	29,3	50,3	36,2	0,15	0,119	0,199	0,066	39,6	52,1	35,8	45,4	66,2	40,5	69,43	744
11.105	279	50	2,8	328	0	9,00	41,9	32,1	56,9	40,8	0,14	0,113	0,157	0,065	42,9	59	39,4	50,2	76,3	45	64,92	928
11.115	294	47	2,8	318	0	9,66	42,7	33,5	57	41,4	0,178	0,132	0,184	0,083	43,7	60,8	40,6	50,3	76,8	45,9	78,52	999
11.125	293	42	3,3	292	0	8,86	44,5	35	57,9	42,5	0,19	0,119	0,23	0,073	43,8	61,3	41,2	49,3	74,8	46	75,21	915
11.135	294	37	3,5	287	0	8,99	47,6	36,6	61,8	45,2	0,211	0,106	0,312	0,063	44,5	64	43,2	50	77,4	48,3	74,30	928
11.145	297	41	2,7	321	0	5,28	41,6	34,8	49,4	39,8	0,244	0,109	0,266	0,074	38,5	50,2	38,7	41,3	57,4	41,9	77,30	530
11.155	294	41	3,1	289	0	5,27	41,6	35	47,3	39,1	0,34	0,124	0,331	0,099	37,9	48,7	38,3	39,2	52,5	40,8	96,77	532
11.165	294	41	2,4	287	0	3,46	38,7	34,2	41,1	36,6	0,284	0,109	0,231	0,09	34,3	41,6	35,8	35,1	44,2	37,3	81,75	340
11.175	267	47	1,7	285	0	1,02	33	32,3	33,1	32,7	0,215	0,115	0,218	0,097	29	32,8	32,1	28,9	33,3	32,4	80,65	97
11.185	245	57	1,6	278	0	0	30,4	28,3	30,9	27,7	0,19	0,041	0,168	0,035	25,8	29,6	29,9	24,9	28,4	29,3	39,86	0
11.195	231	58	1,6	283	0	0	28,8	26,6	29,7	25,1	0,252	0,049	0,273	0,041	24,2	28,1	28,6	23,2	26,7	27,7	52,62	0
11.205	222	60	1,1	322	0	0	27,2	25,2	28,2	23,4	0,255	0,053	0,282	0,055	22,6	26,7	27,2	21,7	25,2	26,2	58,16	0
11.215	211	68	0,8	337	0	0	25,1	23,1	25,7	20,9	0,31	0,061	0,322	0,071	20,4	24,4	25,1	19,5	23,1	24,2	69,78	0
11.225	197	77	0,5	322	0	0	24,1	22,1	24,8	20,2	0,278	0,057	0,299	0,073	19,6	23,4	24	18,7	22,1	23	66,29	0
11.235	206	70	0,8	343	0	0	23,2	21,2	23,7	19,4	0,264	0,058	0,289	0,086	18,8	22,4	23	18	21,2	22,1	68,80	0
12.05	194	75	0	32	0	0	22,4	20,5	23	19,3	0,249	0,058	0,263	0,062	18,2	21,6	22,1	17,4	20,4	21,2	60,07	0
12.15	189	79	0	83	0	0	21,8	20	22,4	19,1	0,225	0,055	0,236	0,059	17,9	21	21,5	17,1	20	20,7	55,70	0
12.25	197	76	0	5	0	0	21,3	19,7	22	19,1	0,203	0,055	0,224	0,064	17,8	20,6	21,1	17,1	19,6	20,3	55,22	0
12.35	188	80	0	111	0	0	21	19,4	21,6	19	0,185	0,052	0,202	0,059	17,5	20,2	20,7	16,8	19,3	19,9	50,90	0
12.45	188	80	0	339	0	0	20,6	18,9	21,2	18,8	0,161	0,044	0,18	0,053	17	19,8	20,3	16,3	18,8	19,5	44,63	0
12.55	18	84	1	82	0	0	20	18,3	20,8	18	0,179	0,051	0,201	0,051	16,6	19,3	19,8	15,9	18,4	19	48,08	0
12.65	217	76	0,5	76	0	0,72	21,9	21,6	21,9	21,7	0,178	0,14	0,19	0,118	18,6	21,9	20,8	18,5	22,3	20,6	89,55	60
12.75	251	59	2,1	331	0	2,84	27,8	24,5	32,8	27,1	0,105	0,054	0,2	0,069	28	33,7	26,9	29,5	37,9	28,7	60,66	273
12.85	262	59	3	320	0	4,76	32,9	27,6	40,7	32	0,151	0,121	0,215	0,085	33,5	42,2	31,7	36,3	49,2	34,8	75,80	477
12.95	268	55	2,4	315	0	7,31	37,9	30,2	49,1	36,2	0,139	0,139	0,254	0,095	38,3	51,3	35,9	43,6	64,1	40,1	87,30	747
12.105	274	55	2,6	328	0	6,28	38,1	31,3	47,5	36,8	0,183	0,128	0,217	0,089	37,6	48,7	36,2	41,8	59	40	80,76	635

Tabela 1 (continuação): Dados adquiridos em março de 2010

Dia e hora	Dados Estação INMET				Temperaturas do ar no coletor (°C)				Velocidades do ar no coletor (m/s)				Temperaturas superficiais no coletor (°C)				Cálculo Q				
	TBS	UR	VelV	DirV	Pluv	Ihrz	CanV1	CanA1	CanV2	CanA2	CanV1	CanA1	CanV2	CanA2	Vid1	Abs1		Ale1	Vid2	Abs2	Ale2
12 115	293	45	28	320	0	594	43.2	33.4	58.2	41.4	0.172	0.131	0.166	0.076	43.6	62.4	40.4	50.8	79.5	45.6	75.14
12 125	299	40	35	304	0	977	44.4	34.9	59	42.5	0.211	0.141	0.252	0.085	44.1	63.6	41.7	50.6	79.2	46.9	86.91
12 135	294	43	34	317	0	744	43.7	35.5	55.3	41.8	0.238	0.126	0.308	0.079	42.6	57.5	41.1	47.5	69.5	45.4	85.34
12 145	308	43	25	293	0	582	41.9	35	50.1	39.7	0.263	0.117	0.3	0.076	40	51.3	39	43	58.9	42.3	82.87
12 155	30	48	17	326	0	444	40.2	34.7	46.2	38.6	0.291	0.117	0.287	0.082	38.7	46.7	38.1	40.5	51.3	41	85.24
12 165	303	45	24	278	0	360	39.2	34.8	42	37.2	0.346	0.123	0.292	0.103	35.7	42.5	36.5	36.8	45.5	38.1	95.70
12 175	277	51	1.8	287	0	95	34.1	33.4	34.5	34	0.164	0.094	0.164	0.079	30.4	34	33.2	30.4	34.7	33.8	64.45
12 185	256	60	1.6	273	0	31.2	29.4	31.7	28.7	28.7	0.192	0.044	0.18	0.048	27.6	30.9	31.2	27	30.1	30.8	44.95
12 195	242	64	1.1	360	0	29.6	27.6	30.5	26.1	26.1	0.257	0.049	0.292	0.054	25.6	29.2	29.6	24.7	27.9	28.8	57.45
12 205	238	68	1.3	8	0	27.1	24.8	27.6	22.2	22.2	0.348	0.059	0.381	0.103	23	26.7	27.2	22.1	25.5	26.4	85.18
12 215	219	77	0.1	43	0	26.3	24	27	22.4	22.4	0.256	0.049	0.288	0.059	21.9	25.6	25.9	21	24.3	25	58.54
12 225	206	81	0.6	121	0	25.2	23.1	25.8	21.6	21.6	0.283	0.058	0.299	0.065	21	24.6	25	20.2	23.4	24.2	64.65
12 235	197	86	0.9	89	0	24.4	22.2	25	21	21	0.247	0.052	0.261	0.082	20	23.6	24.1	19.1	22.3	23.2	58.23
13 05	192	90	1.5	64	0	23.4	21.2	23.9	20	20	0.239	0.05	0.263	0.081	18.8	22.5	23	18	21.3	22.1	62.53
13 15	19	89	0.9	85	0	22.4	20.2	23	19.2	19.2	0.234	0.05	0.247	0.06	18	21.6	22	17.2	20.4	21.2	55.69
13 25	193	88	0.3	357	0	21.8	19.5	22.3	19	19	0.207	0.047	0.215	0.049	17.4	20.8	21.4	16.6	19.7	20.5	48.72
13 35	195	87	0.4	354	0	21.3	19.2	21.8	18.9	18.9	0.182	0.043	0.193	0.059	17	20.3	21	16.2	19.2	20	47.82
13 45	199	86	1.1	337	0	20.7	18.7	21.3	18.4	18.4	0.194	0.049	0.207	0.056	16.7	19.7	20.3	16	18.7	19.4	50.03
13 55	201	86	1.5	333	0	20.4	18.8	21.2	19.1	19.1	0.149	0.041	0.167	0.04	17	19.6	20.1	16.3	18.7	19.3	38.95
13 65	213	83	0.9	359	0	22.7	22.4	22.2	22.4	22.2	0.124	0.104	0.126	0.084	19.3	22.5	21.7	19	22.6	21.4	64.26
13 75	232	77	2.7	347	0	28.6	27.4	24.5	31.2	26.5	0.113	0.107	0.208	0.079	27	33.1	26.7	28.1	36.4	28	67.74
13 85	253	71	3	338	0	531	32.3	26.7	40.8	31	0.149	0.132	0.22	0.088	33.9	43.4	31.4	36.8	50.8	34.7	79.82
13 95	264	65	3.3	331	0	738	37.1	29.5	48.9	35.5	0.172	0.141	0.23	0.096	38.2	51.7	35.4	44.1	65.9	39.8	86.45
13 105	274	63	2.4	330	0	886	41.1	31.9	55.2	39.6	0.151	0.126	0.166	0.073	42.2	58.1	38.8	49.4	75.4	44	71.73
13 115	29	53	2.7	299	0	758	41.8	33.3	54.7	40.7	0.153	0.116	0.168	0.066	42.9	57.2	39.7	48.7	71.3	44.7	67.19
13 125	302	46	3.3	321	0	957	43.7	34.6	58.6	42.2	0.196	0.129	0.237	0.067	45.1	61.6	41.3	51.3	76.7	46.8	77.06
13 135	308	44	3.2	311	0	855	45.4	35.8	59.9	43.3	0.253	0.127	0.318	0.066	45.4	62.4	42.4	51.3	76.7	47.7	83.51
13 145	29	52	1.7	318	0	517	41.9	35.4	51.7	40.7	0.258	0.121	0.306	0.071	41.1	51.7	40.1	45	61.4	44.2	82.67
13 155	292	48	2.6	326	0	466	40.7	34.9	46.5	38.5	0.301	0.123	0.3	0.087	38.4	47.2	38	40.1	51.8	40.6	89.47
13 165	293	48	2.4	329	0	266	36.7	33.9	39	35.5	0.269	0.118	0.235	0.092	33.8	38.8	35.2	34.7	41.4	36.7	84.09
13 175	274	57	0.9	19	0	87	33.6	33.1	33.7	33.6	0.233	0.128	0.224	0.112	29.8	33.3	33.1	29.8	33.9	33.7	89.50
13 185	265	60	0.7	27	0	30.5	29	31.3	27.3	27.3	0.249	0.058	0.261	0.041	26.5	30	30.5	25.7	28.9	30	54.25
13 195	244	71	0.1	355	0	29	27.3	29.8	25.2	25.2	0.311	0.063	0.33	0.072	24.9	28.3	28.8	24.2	27.2	28.1	71.08
13 205	236	73	0.1	359	0	27.4	25.4	27.9	23.4	23.4	0.32	0.061	0.333	0.061	23.2	26.6	27	22.4	25.5	26.3	68.19
13 215	238	72	0.2	354	0	26.4	24.4	26.9	22.4	22.4	0.305	0.061	0.321	0.064	22.3	25.6	26	21.6	24.5	25.2	73.00
13 225	218	83	0	92	0	25.7	24	26.4	22.6	22.6	0.257	0.058	0.266	0.051	21.9	25.1	25.5	21.1	23.9	24.6	57.67
13 235	234	75	1	353	0	25.2	23.5	25.8	22.5	22.5	0.219	0.052	0.222	0.045	21.5	24.5	24.9	20.7	23.4	24.1	50.01

Tabela 2: Dados adquiridos em abril de 2010

Dia e hora	Dados Estação INMET				Temperaturas do ar no coletor (°C)			Velocidades do ar no coletor (m/s)			Temperaturas superficiais no coletor (°C)						Cálculo				
	T85	UR	VelV	DirV	Pluv	Ihrz	CanV1	CanV2	CanA1	CanA2	CanV1	CanV2	CanA1	CanA2	Vid1	Abs1	Ale1	Vid2	Abs2	Ale2	Q
23 6.5	23.7	66	2.1	19	0	39	23.4	23.3	0.085	0.024	0.063	20.9	23	22.3	20.6	23.3	22.2	43.42	57		
23 7.5	23.6	62	2.7	22	0	132	28	24.7	30.3	0.047	0.086	0.104	0.073	25.4	29	25.6	26.3	27.3	51.27	130	
23 8.5	24.6	61	3.3	335	0	356	32.9	25.9	37.2	0.072	0.106	0.157	0.086	29.3	36.4	28.5	31.1	43.3	31.4	64.66	387
23 9.5	25.7	57	3.3	333	0	361	35.9	27.5	40.7	0.098	0.139	0.193	0.119	32.6	39.7	31	35	47.6	35	86.12	386
23 10.5	26.5	57	3.2	326	0	455	36.6	28.4	40.5	0.109	0.161	0.2	0.147	32.6	40.1	31.5	34.5	47.1	35.2	100.72	461
23 11.5	26.3	60	3.2	306	0	419	40.9	30.3	46.3	0.117	0.149	0.14	0.135	35.9	46.2	34.3	38.2	55.6	38.9	91.65	411
23 12.5	26.5	59	1.6	327	0	247	34.5	29.6	36.7	0.074	0.107	0.14	0.094	30.7	36.2	31.2	31.6	39.6	33.5	66.14	233
23 13.5	28.5	55	2.9	329	0	548	40.8	30.9	45.6	0.127	0.134	0.19	0.113	36.3	45.5	34.2	38.6	53.6	38.2	84.62	582
23 14.5	28.8	53	2.5	337	0	504	45	32.4	51.2	0.189	0.154	0.201	0.132	38.9	50.5	37.1	42.1	61.2	42.2	99.49	550
23 15.5	28.8	52	2.8	344	0	419	43.3	32.3	47.9	0.204	0.175	0.217	0.152	37.8	46.7	36.2	40.6	55.9	40.4	112.24	474
23 16.5	27	60	0.8	4	0	132	37	31.8	39.1	0.107	0.146	0.151	0.134	32.7	37.4	33.6	33.8	41.5	35.9	90.04	131
23 17.5	20.5	88	4.7	183	0.2	4	28.9	30.1	29	0.046	0.185	0.091	0.168	26.1	28.9	29.5	25.7	28.8	29.5	102.55	4
24 6.5	18.5	94	3.5	143	0	21	20.1	20.4	19.8	0.049	0.216	0.093	0.189	18.1	19.2	19.1	17.7	19.1	18.9	116.96	22
24 7.5	18.9	94	2.1	148	0	75	21.4	20.6	21.5	0.057	0.224	0.12	0.207	19.2	21.1	19.7	18.6	21.9	20.1	126.05	70
24 8.5	20.4	87	3.5	147	0	318	26.9	21.5	28.6	0.072	0.223	0.214	0.22	23.5	29.1	22.2	23.9	34.1	24.2	135.92	334
24 9.5	22.5	82	2.9	153	0	545	36.7	23.9	42.2	0.116	0.202	0.276	0.194	32.3	42.5	28.1	35	55.5	33.1	129.84	605
24 10.5	23.8	77	2.8	140	0	590	38.4	24.9	43.5	0.145	0.233	0.358	0.231	34.3	44.2	29.5	37	57.3	34.6	154.53	639
24 11.5	25.6	69	1.8	98	0	737	42.3	26.7	49.9	0.145	0.205	0.271	0.185	37.8	51.9	32.4	41.3	67.9	38.4	129.91	820
24 12.5	27.1	63	2.4	39	0	778	46.6	29.2	58	0.18	0.143	0.201	0.115	42	59.3	36.4	47.1	77.1	44.1	91.79	872
24 13.5	27.5	60	2.3	20	0	699	47.4	30.7	58.5	0.198	0.116	0.155	0.091	41.7	58.3	37.6	47.1	74.2	45.9	76.13	782
24 14.5	26.9	61	2	74	0	493	44.6	30.9	52.6	0.203	0.112	0.122	0.092	39	51.1	36.5	43.1	62.9	43.3	73.59	536
24 15.5	27.7	62	0.5	50	0	307	39.7	30.4	43.7	0.147	0.116	0.183	0.103	34.7	42.2	33.9	36.7	49.2	38.3	77.55	321
24 16.5	25.6	69	0	353	0	142	36.2	30.2	38.3	0.119	0.134	0.186	0.121	32	36.6	32.4	33.1	41.1	35.2	85.81	143
24 17.5	24.1	78	0	142	0	10	27.6	28.5	27.7	0.034	0.175	0.086	0.165	24.6	27.6	28	24.3	27.7	28.2	98.16	10
25 6.5	20.8	89	1.7	146	0	28	21.8	22.2	21.7	0.03	0.122	0.024	0.101	19	21.4	21	18.6	21.4	20.7	63.09	34
25 7.5	23.3	78	3.9	31	0	172	28.7	23.9	31.6	0.055	0.148	0.15	0.137	25.2	31	24.9	25.1	35.9	27	88.54	183
25 8.5	24.4	72	4.2	28	0	499	37.1	26.5	44.6	0.073	0.133	0.125	0.116	32	43.6	30.4	34.6	55.4	35.6	78.94	576
25 9.5	26.1	66	2.8	27	0	607	41.2	28	50.4	0.089	0.127	0.14	0.11	35.4	48.9	33.4	39.1	65.1	39.9	77.52	687
25 10.5	26.9	61	3.6	16	0	831	45.8	30.1	57.4	0.106	0.118	0.15	0.091	39.8	56.5	36.6	44.4	75.1	44.6	71.47	939
25 11.5	27.4	63	2	30	0	516	44.2	31.1	54.4	0.11	0.103	0.101	0.079	39	52.9	37	43.5	66.6	44.3	61.47	529
25 12.5	26.6	55	2.4	1	0	746	46.5	32	56.8	0.151	0.119	0.188	0.09	41.5	57.5	37.9	45.9	72.2	44.8	75.76	832
25 13.5	28.9	53	2.1	18	0	700	48.5	33.1	59	0.191	0.135	0.249	0.096	43.3	58.8	39.6	48.4	73.9	47	87.25	784
25 14.5	28	56	1.9	360	0	503	43.9	32.8	50.6	0.165	0.115	0.189	0.091	39	49.4	37.2	42.1	59.1	42.5	75.46	551
25 15.5	28	55	1.3	23	0	267	40.1	32.4	44.3	0.128	0.131	0.168	0.111	35.3	42.6	35.6	37.4	49.6	39.5	81.97	270
25 16.5	26.8	61	0.5	30	0	70	35	31.6	36	0.065	0.136	0.14	0.129	30.5	35.2	32.5	30.9	37.8	34.2	82.93	66
25 17.5	24.3	79	0.9	28	0	7	28.8	30.2	28.8	0.033	0.171	0.077	0.155	25.6	28.8	29.4	25.2	28.8	29.4	93.79	7

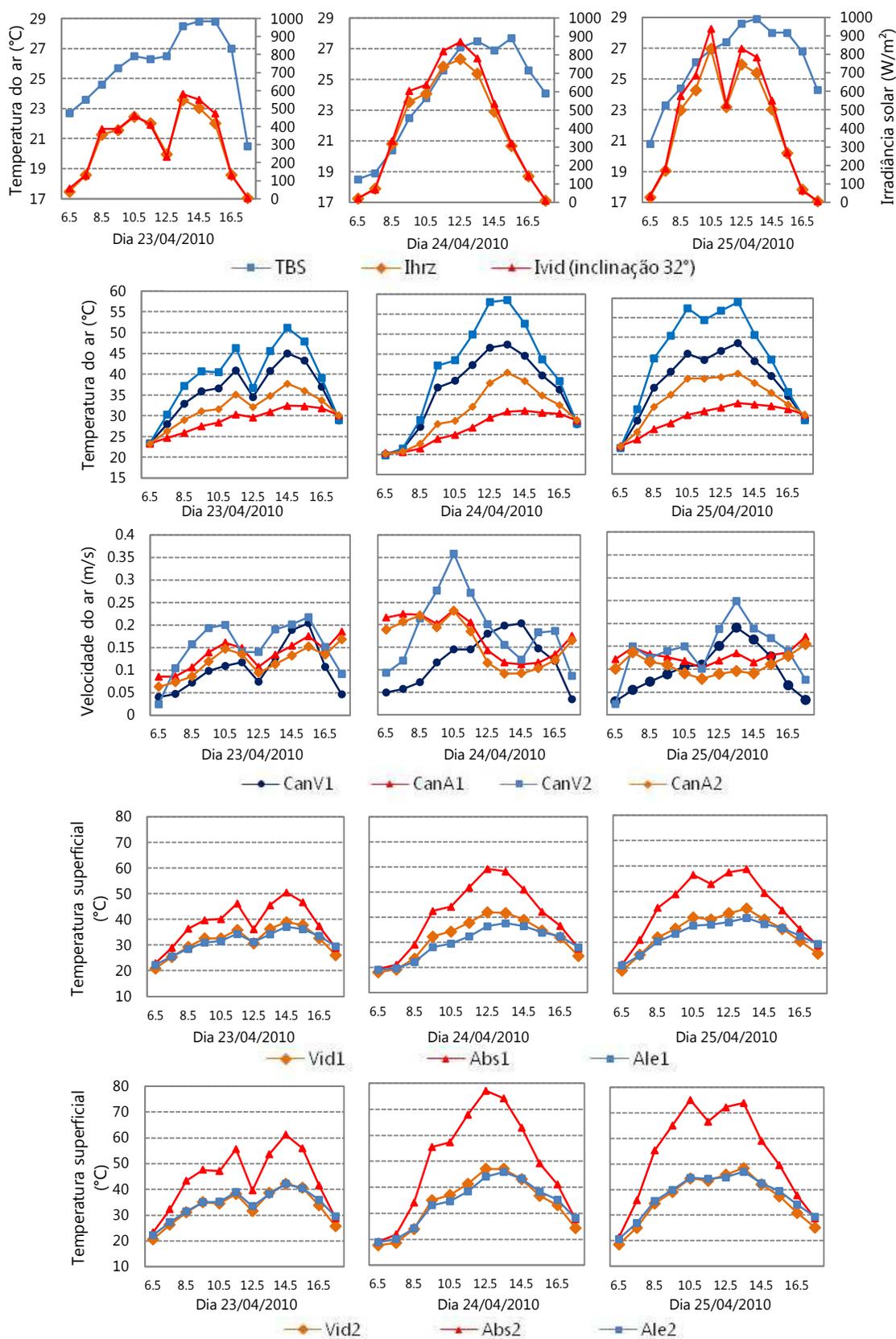


Figura 1: Dados monitorados em abril de 2010

Tabela 3: Dados adquiridos em maio de 2010

Dia e hora	Dados Estação INMET				Temperaturas do ar no coletor (°C)		Velocidades do ar no coletor (m/s)		Temperaturas superficiais no coletor (°C)						Cálculo						
	TBS	UR	VelV	DirV	Pluv	CanV1	CanV2	CanV1	CanA1	CanA2	CanV1	Abs1	Abs2	Ale1	Ale2	Q	Ivid				
27 6.5	15.6	87	2.2	145	0	18	162	16.1	16.7	0.199	0.289	0.184	0.215	13.4	15.3	15.4	13.2	15.4	15.2	156.65	18
27 7.5	16.5	84	3.8	143	0	179	232	17.9	25.3	0.131	0.285	0.301	0.222	19.2	25	18.1	19.1	30.7	161.20	288	288
27 8.5	17.9	78	1.1	148	0	374	288	18.9	32.3	0.093	0.37	0.283	0.298	24.3	34.1	20.6	24.7	43.6	23.9	203.23	523
27 9.5	18.5	73	1.9	146	0	548	347	20.2	38.9	0.078	0.38	0.318	0.321	29.3	41.2	23.4	30	54.7	28.2	214.50	721
27 10.5	19.8	67	4.8	140	0	657	394	21.6	44.3	0.072	0.352	0.376	0.307	33.4	47.4	26.1	34.3	62.9	31.9	206.41	837
27 11.5	20.8	65	4.7	144	0	706	40	22.3	44.9	0.087	0.435	0.385	0.371	34.3	50.4	26.5	35.1	64.7	32.1	248.52	886
27 12.5	21.3	58	4.7	147	0	689	42	23.2	47	0.085	0.407	0.496	0.354	35.6	51.7	27.7	36.8	65.7	33.3	242.00	864
27 13.5	21.8	54	4.3	143	0	626	42.6	24.3	47.1	0.112	0.373	0.473	0.327	35.6	50.7	28.7	36.9	63.1	34.2	225.10	796
27 14.5	21.8	52	4.1	148	0	469	42	24.9	45.7	0.102	0.29	0.462	0.268	34.7	46.8	29.3	36.1	57.6	34.4	184.24	600
27 15.5	21.1	55	3.8	146	0	303	37.1	24.8	39.7	0.127	0.316	0.338	0.28	30.7	40	27.7	31.6	48	31.5	188.60	398
27 16.5	19.8	57	2.5	145	0	86	29.7	24	30.8	0.105	0.297	0.174	0.258	24.6	30.4	24.7	24.8	34.4	26.5	166.09	88
27 17.5	18.9	57	3.5	151	0	0	21.3	22.6	21.4	0.178	0.279	0.184	0.211	17.8	21	21.6	17.6	21.1	21.4	151.65	0
28 6.5	13.2	90	1.6	144	0	19	14.3	15.1	14.1	0.074	0.251	0.055	0.19	11.4	13.3	13.4	11.3	13.5	13.1	125.91	19
28 7.5	14.7	86	2.1	146	0	183	21.9	16.2	24.7	0.034	0.231	0.164	0.19	17.3	23.4	16.6	17.4	30.2	18.5	125.35	299
28 8.5	17.8	68	3	144	0	380	30.3	17.6	34.6	0.041	0.261	0.321	0.217	25.4	34.8	20.6	26.5	46.6	24.9	150.79	534
28 9.5	19.8	58	3.3	145	0	538	36.7	19.7	41.3	0.05	0.274	0.401	0.234	31.5	42	24.3	32.7	57.5	29.9	164.45	707
28 10.5	21.5	54	1.8	127	0	648	41.3	21.9	47.1	0.063	0.221	0.421	0.194	35.9	48.8	28.1	37.9	66.2	34.3	140.69	824
28 11.5	22.1	50	2.4	136	0	699	43.8	23.8	50.5	0.068	0.193	0.434	0.171	38.3	53.9	31	40.6	71.1	38	127.47	877
28 12.5	23.9	49	1.8	79	0	696	45.5	25.2	52.6	0.08	0.178	0.502	0.161	39	55.5	32.5	41.8	72.1	39.9	124.66	873
28 13.5	23.2	47	2.2	78	0	608	45	25.8	50.9	0.091	0.199	0.456	0.18	37.6	52.8	32.3	39.8	67	39.2	133.91	768
28 14.5	22.7	49	1.4	29	0	439	42.4	26.3	46.8	0.097	0.195	0.429	0.174	36	46.9	31.6	38.2	57.9	37.3	129.72	546
28 15.5	22.4	53	2.6	142	0	204	33.2	26	35.2	0.056	0.137	0.165	0.123	27.7	34.6	28.6	28.8	39.3	31.8	82.74	211
28 16.5	20.7	59	1.8	145	0	83	31.4	24.9	32.6	0.068	0.105	0.184	0.101	26.3	31.5	26.1	26.6	35.8	28.2	69.63	85
28 17.5	18.6	68	1.4	145	0	0	21.3	23.1	21.5	0.069	0.074	0.148	0.079	17.9	21.1	22	17.8	21	21.7	52.96	0
30 7.5	18.9	72	1.5	22	0	164	24.1	18.6	26.7	0.084	0.21	0.399	0.197	20	25.5	19.4	20.4	31.2	21.4	136.65	252
30 8.5	20.9	63	3	351	0	373	34.1	21.7	40.2	0.087	0.078	0.472	0.078	30.4	39.4	26.8	33.1	51.8	32.6	72.33	523
30 9.5	22.1	58	3	359	0	526	39.8	23.2	45.9	0.062	0.134	0.376	0.118	34.7	45.7	30	38.1	62.1	36.8	92.70	689
30 10.5	23.9	50	3.5	348	0	641	44	24.9	50.4	0.069	0.153	0.403	0.133	38.1	51.8	32.4	41.7	69.6	39.7	104.11	815
30 11.5	25	47	3.7	342	0	694	46.7	26.8	53.6	0.073	0.152	0.407	0.129	40.1	56.5	34.4	43.7	73.7	42.2	103.21	871
30 12.5	26	41	3.2	329	0	668	48.6	28.3	54.9	0.094	0.177	0.478	0.153	40.9	57.7	35.5	44	73.4	42.9	121.69	833
30 13.5	26.2	40	3.5	330	0	586	48.8	29.7	54.4	0.114	0.168	0.433	0.145	40.4	56.3	36.1	42.8	69.8	43	115.57	733
30 14.5	26.3	39	3.5	324	0	400	44	29.2	47.8	0.117	0.179	0.334	0.155	37	48.2	34.2	38.7	57.9	39.8	115.98	475
30 15.5	24.8	43	2.7	322	0	213	38.9	29	41.3	0.137	0.204	0.283	0.191	32.7	40.7	32.1	33.6	46.9	35.8	130.54	226
30 16.5	23.4	50	1.8	328	0	25	27.4	27.1	27.8	0.228	0.188	0.287	0.144	25.2	27.6	26.9	25.1	28.1	27.6	117.48	2
30 17.5	19.8	57	2.2	324	0	1	24.7	26.2	24.8	0.192	0.093	0.154	0.07	22.9	24.6	25.2	22.8	24.3	24.9	62.64	2

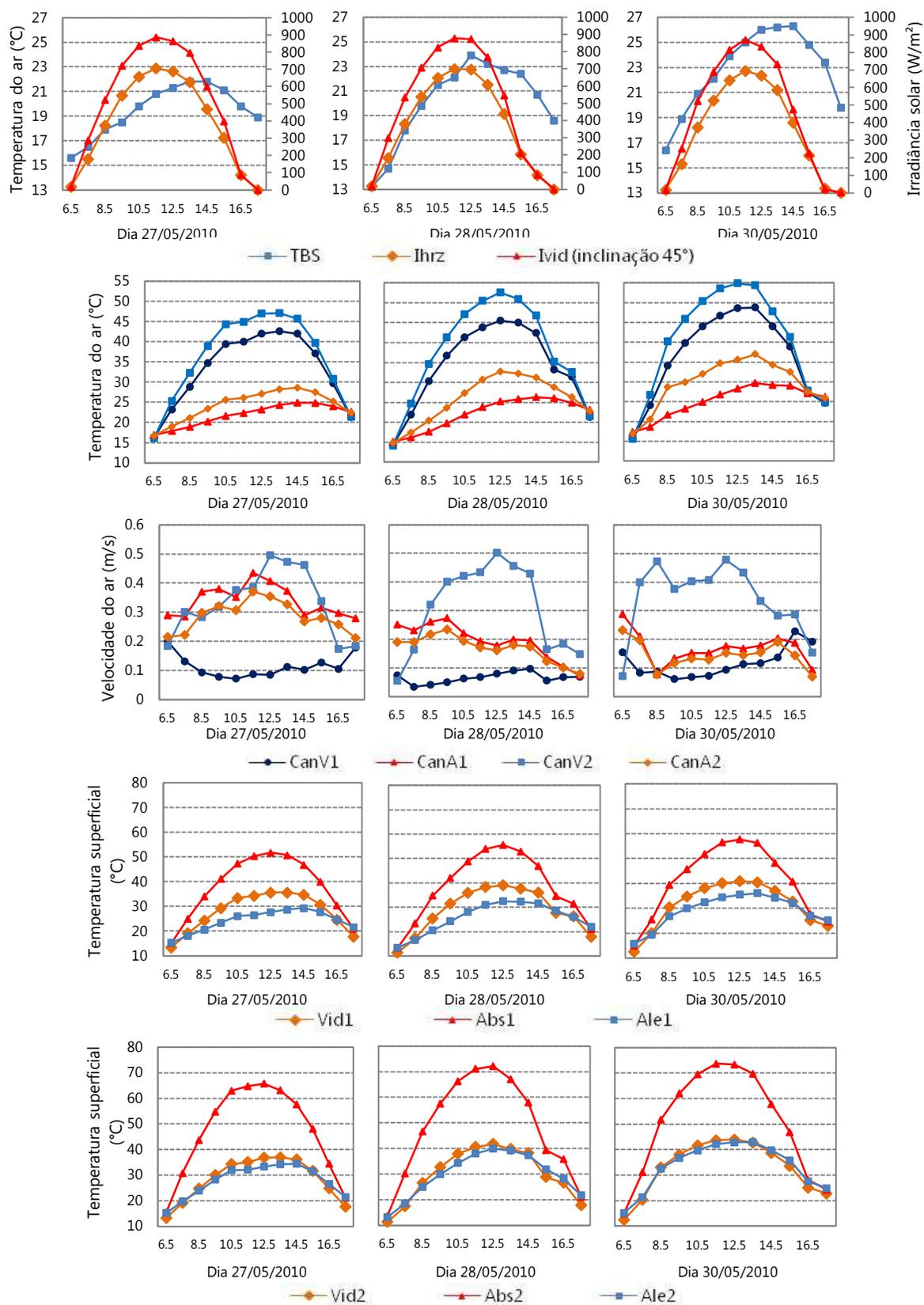


Figura 2: Dados monitorados em maio de 2010

Tabela 4: Dados adquiridos em junho de 2010

Dia e hora	Dados Estação INMET							Temperaturas do ar no coletor (°C)				Velocidades do ar no coletor (m/s)				Temperaturas superficiais no coletor (°C)						Cálculo	
	TBS	UR	VelV	DirV	Pluv	Ihrz		CanV1	CanA1	CanV2	CanA2	CanV1	CanA1	CanV2	CanA2	Vid1	Abs1	Ale1	Vid2	Abs2	Ale2	Q	Ivid
10 6.5	12.7	91	2.6	124	0	4	14.4	15.4	14.3	15.1	15.9	0.042	0.226	0.012	0.173	12.2	13.4	13.7	12.1	13.2	13.4	110.50	2
10 7.5	13.5	91	2.7	150	0.8	83	17.5	15.6	18.3	15.9	17.5	0.049	0.302	0.081	0.244	14.1	17.2	14.7	14.4	19.7	15.4	154.89	92
10 8.5	16.3	85	2.4	134	0	204	20	16.2	21.2	17.1	16.2	0.038	0.231	0.097	0.191	15.7	20.5	16	16.3	24.1	17.4	121.59	229
10 9.5	17	83	3.5	36	0	170	21.1	17.3	22.7	18.7	18.7	0.037	0.151	0.092	0.122	17.6	21.7	17.7	18	25.3	19.8	81.07	154
10 10.5	19.3	72	3.5	55	0	485	30	19.4	34.9	24	24	0.061	0.157	0.191	0.137	24.3	34.4	22.3	26.1	43.5	27.5	94.05	620
10 11.5	19.7	70	3.5	29	0	430	31.2	20.8	36.4	26.2	26.2	0.063	0.128	0.183	0.114	26.1	35.4	24.3	28.1	44.1	30.2	79.42	476
10 12.5	21.5	61	1.7	1	0	619	38.6	22.9	46.7	32	32	0.079	0.099	0.283	0.091	32.1	47.1	28.9	35.8	61.1	36.6	71.49	845
10 13.5	21.7	60	1.3	321	0	366	36	23.7	41.6	30.3	30.3	0.069	0.088	0.332	0.087	32.1	41.2	29.2	35.5	52	36.1	72.03	394
10 14.5	22	58	1	227	0	304	33.1	23.6	36.4	27.7	27.7	0.067	0.102	0.265	0.09	29.3	35.7	27	30.8	42.4	31.5	70.21	338
10 15.5	20.7	65	1.6	206	0	78	26.4	22.6	27.4	23.8	24.4	0.045	0.184	0.132	0.166	24.1	26.5	23.7	24.4	29	25.8	104.53	70
10 16.5	18.3	78	3	151	0	32	22.3	21.7	22.5	21.9	21.9	0.034	0.201	0.03	0.168	19.9	21.9	21.1	19.7	22.4	21.4	103.18	29
10 17.5	17	82	1.8	144	0	0	19.4	20.7	19.4	20.5	19.4	0.049	0.209	0.011	0.158	17	18.9	19.4	16.7	18.6	19	102.15	0
11 6.5	12.8	94	3	154	0	6	14.7	15.5	14.6	15.2	15.2	0.045	0.238	0.016	0.185	12.8	13.6	13.8	12.6	13.5	13.5	117.38	3
11 7.5	13.6	91	3.3	149	0	68	15.9	15.4	15.8	15.4	15.4	0.048	0.272	0.039	0.22	13.5	15	14	13.4	15.5	14.1	137.62	67
11 8.5	15.1	83	3.5	148	0	267	23.2	16.4	25.1	17.8	17.8	0.058	0.276	0.161	0.228	18.8	25.3	16.8	18.9	31.4	18.9	149.22	374
11 9.5	16.6	75	3.9	150	0	494	34.1	18	38.8	21.3	21.3	0.074	0.281	0.378	0.245	28.4	38.5	22	30.1	53.4	27.1	169.37	735
11 10.5	17.8	67	4.2	153	0	617	37.6	19.3	42.8	23.3	23.3	0.087	0.311	0.393	0.284	31.3	44.6	24.2	33	60.9	30	190.40	878
11 11.5	18.9	63	3.9	162	0	672	40.5	20.7	46.3	25.2	25.2	0.097	0.269	0.448	0.249	34.2	49.1	26.5	36.3	65.9	32.5	172.66	936
11 12.5	19	63	4.2	167	0	650	42.6	21.5	48.3	26	26	0.123	0.274	0.598	0.259	36.1	50.6	27.7	38.8	67.2	33.8	186.19	900
11 13.5	19.4	59	3.2	147	0	603	42.6	22	47.6	26.3	26.3	0.147	0.277	0.616	0.267	35.5	49.2	28	38.1	64.1	34	191.35	857
11 14.5	19	58	4.5	148	0	468	39.8	22.3	43.8	25.9	25.9	0.148	0.276	0.491	0.263	32.7	44	27.1	34.7	55.7	32.4	182.98	687
11 15.5	18.1	59	4.1	149	0	271	35.2	21.8	37.7	24.2	24.2	0.127	0.29	0.357	0.274	29.3	37	24.8	29.6	45.6	28.5	180.99	392
11 16.5	16.6	62	3.9	154	0	75	27.4	20.9	28.6	22.2	22.2	0.085	0.302	0.163	0.269	21.7	27.5	21.9	22.1	32.1	23.8	168.94	81
11 17.5	15.1	69	2.4	164	0	0	17.5	19.5	17.8	19.2	19.2	0.067	0.292	0.02	0.217	14	17.2	18.1	13.9	17.3	17.7	141.79	0
12 6.5	11	86	3.2	144	0	12	11.9	12.5	11.7	12.3	12.3	0.126	0.379	0.085	0.255	9.1	10.7	10.9	9.2	10.9	10.8	182.42	7
12 7.5	12.3	80	4.7	146	0	169	18.1	13.2	20.4	14.1	14.1	0.053	0.496	0.142	0.394	13.7	19.4	12.9	14	26.2	14.4	252.75	383
12 8.5	14.3	72	4.4	143	0	364	24.9	14.3	28.4	16.1	16.1	0.063	0.586	0.251	0.462	20.4	30	15.5	20.8	40.8	18.6	304.50	615
12 9.5	16.1	62	4.5	140	0	531	29.7	15.6	33.4	17.7	17.7	0.091	0.694	0.311	0.548	24.9	36	17.5	25.3	49.3	21.3	364.15	803
12 10.5	17.6	62	4.1	128	0	643	33.6	16.9	37.6	19.4	19.4	0.096	0.676	0.356	0.548	25.5	41.8	19.4	29.1	56	23.9	363.05	922
12 11.5	18.7	56	4.5	146	0	695	37.2	18.6	42.1	21.9	21.9	0.078	0.489	0.415	0.419	31.4	47.1	22.4	32.4	62.3	28	278.25	975
12 12.5	19.2	51	4.1	142	0	687	39.4	19.9	44.7	23.6	23.6	0.101	0.439	0.528	0.383	33.1	49	24.4	34.5	64.1	30.2	261.89	962
12 13.5	20.5	47	3	146	0	618	40.8	21.1	45.9	25.2	25.2	0.11	0.351	0.573	0.313	33.8	48.6	26.3	35.6	63	32.4	220.49	884
12 14.5	20.1	50	3	150	0	486	39.5	21.9	43.8	25.8	25.8	0.13	0.301	0.468	0.268	32.2	45	26.5	33.8	56.8	32.1	189.20	725
12 15.5	19.3	52	2.7	150	0	297	36.1	22.2	39.1	25.2	25.2	0.126	0.253	0.354	0.226	29.4	38.7	26	30.9	48	30.4	157.44	462
12 16.5	17.2	61	2.7	157	0	66	26.4	21.3	27.9	22.6	22.6	0.061	0.234	0.134	0.202	21.6	28.8	22.5	21.9	30.8	24.5	129.10	66
12 17.5	15.1	70	3.7	152	0	1	17.6	19.7	17.9	19.4	19.4	0.061	0.268	0.006	0.192	14.1	17.4	18.3	13.9	17.3	18	127.49	1

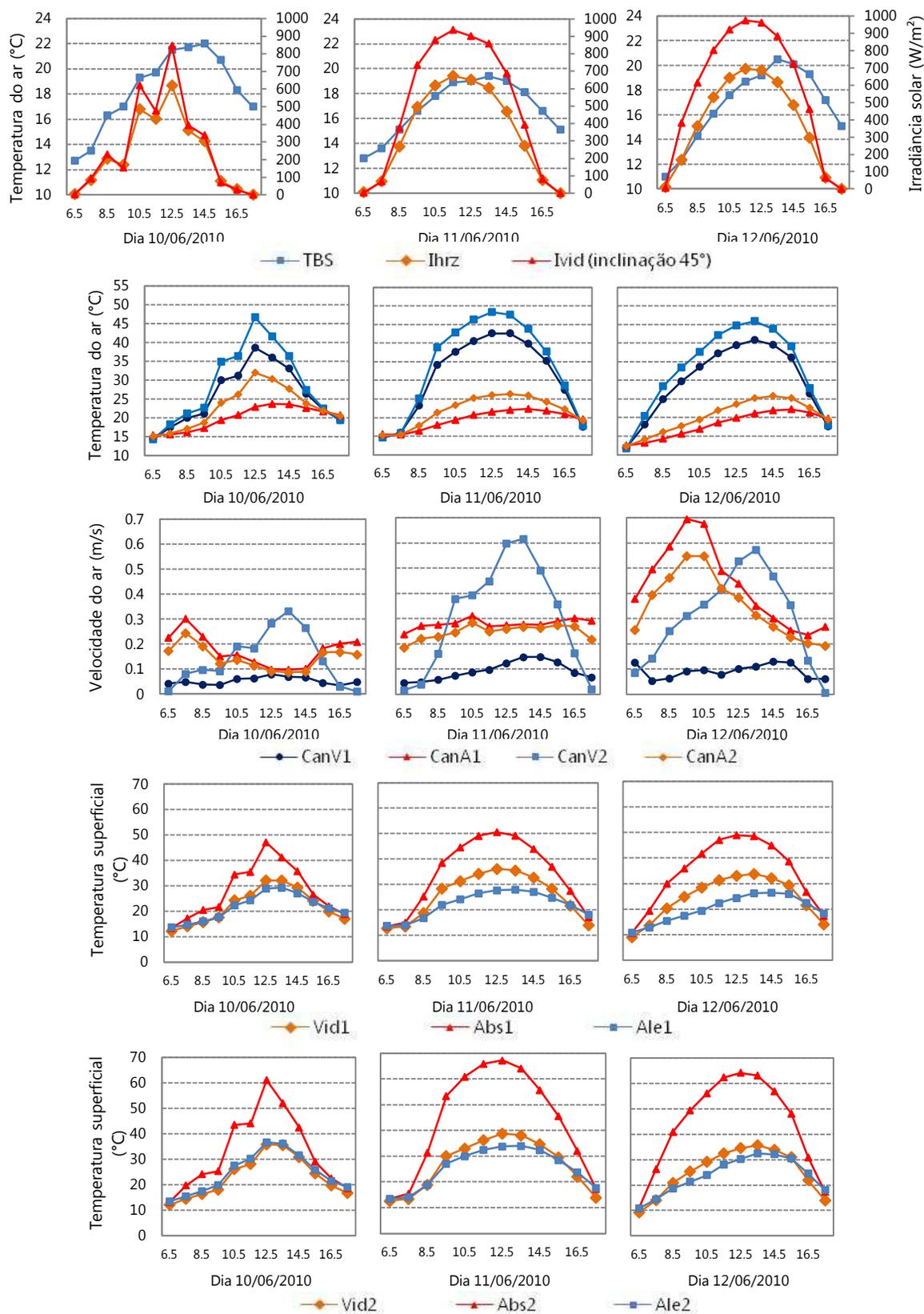


Figura 3: Dados monitorados em junho de 2010

Tabela 5: Dados adquiridos em julho de 2010

Dia e hora	Dados Estação INMET					Temperaturas do ar no coletor (°C)			Velocidades do ar no coletor (m/s)			Temperaturas superficiais no coletor (°C)						Cálculo Q		
	TBS	UR	VeV	DirV	Pluv	CanV1	CanA1	CanV2	CanA2	CanV1	CanA1	CanV2	CanA2	Vid1	Abs1	Ale1	Vid2		Abs2	Ale2
22 6.5	17.2	67	0	27	0	16	17.1	18.2	0.046	0.146	0.081	0.09	14.3	16.3	17	18.5	16.3	16.5	70.45	12
22 7.5	19.4	62	0	30	0	156	25.4	20.1	0.04	0.124	0.169	0.059	20.8	27.2	21	29.8	32.4	22.8	71.91	391
22 8.5	20.7	56	0.4	28	0	362	33.7	22.1	0.063	0.131	0.196	0.11	28.3	38.7	26.2	41.1	49	30.9	79.97	645
22 9.5	22.7	51	0	18	0	534	39.4	23.8	0.077	0.157	0.194	0.129	32.9	45.7	29.6	47.8	60.4	35.7	93.38	835
22 10.5	24.8	45	0.2	6	0	656	43.8	25.5	0.081	0.164	0.21	0.135	37.2	51.8	32.6	53.1	69	39.7	98.31	966
22 11.5	26.3	41	0.6	34.3	0	714	46.8	27.2	0.086	0.178	0.222	0.141	40.3	56.7	34.8	56.2	73.8	42.4	104.94	1023
22 12.5	27.1	35	0.2	33.2	0	710	49.4	29.1	0.111	0.192	0.249	0.151	42.2	59.1	36.5	57.4	75.2	44	114.44	1014
22 13.5	27.8	32	0	32.8	0	639	49.9	30.1	0.153	0.221	0.255	0.177	41.4	57.6	36.5	55.5	72.1	43.3	132.22	927
22 14.5	27.7	33	0	33.7	0	507	48.5	30.8	0.159	0.194	0.248	0.154	40.7	54	36.6	52.7	66.8	42.9	117.97	760
22 15.5	27.3	33	0.1	33.6	0	330	44.7	30.6	0.15	0.212	0.234	0.176	37.6	47.3	35	47.5	56.6	40	127.32	520
22 16.5	25.3	39	0	34.4	0	118	38.1	29.7	0.089	0.195	0.216	0.153	32.3	38.1	32.2	40.3	43.2	35.2	108.68	154
22 17.5	22.4	49	0	34.8	0	2	27.1	28.2	0.055	0.197	0.106	0.137	23.5	27.2	27.9	29.5	27.7	28.2	98.77	1
23 6.5	19.4	59	0	29	0	16	18.3	19.5	0.041	0.132	0.091	0.084	15.9	17.6	18	19.8	17.5	17.6	65.36	12
23 7.5	21.1	56	0	27	0	154	26.2	21.1	0.041	0.104	0.171	0.083	22.3	27.9	22.2	30.7	32.8	24	62.24	378
23 8.5	23.3	48	0	25	0	358	34.6	23.3	0.057	0.101	0.198	0.09	29.9	39.6	27.7	42.2	49.8	32.6	65.95	635
23 9.5	24.1	46	0	31.9	0	510	41.1	25.9	0.066	0.125	0.213	0.108	35.8	46.9	31.8	49.6	61.3	38.1	79.05	789
23 10.5	25.1	43	0	28.9	0	638	45.8	27.7	0.079	0.157	0.221	0.126	39.5	53.4	34.7	54.8	70.1	41.6	94.32	934
23 11.5	25.8	43	0.2	31.5	0	693	48.6	29.2	0.081	0.186	0.23	0.154	41.7	57.8	36.1	57.1	73.7	43.1	110.88	987
23 12.5	26.9	38	0	27.2	0	684	49.9	29.7	0.097	0.202	0.281	0.169	42.7	58.7	36.7	57.3	74.3	43.8	123.11	968
23 13.5	27	38	0	25.9	0	609	50.1	30.3	0.122	0.204	0.303	0.172	43	57	36.7	55.6	71.7	43.6	126.90	870
23 14.5	27.1	37	0	14.1	0	478	48	30	0.143	0.235	0.32	0.198	41.6	52	35.8	51.5	64.8	41.8	144.49	696
23 15.5	27.3	36	0	22.7	0	299	43.9	30.2	0.135	0.203	0.306	0.165	38.4	45.7	34.6	46.6	55	39.2	124.78	432
23 16.5	25.3	42	0	8.1	0	104	37	29.8	0.065	0.189	0.246	0.162	32.2	36.9	32.1	39.1	41.3	34.9	112.40	121
23 17.5	21.7	58	0	15.3	0	3	26.9	28.4	0.058	0.232	0.113	0.169	23.3	27.1	27.8	29.2	27.4	28	117.32	1
24 6.5	15	91	0	14.4	0	15	16.1	17.2	0.17	0.103	0.159	0.124	13.1	15.2	15.6	16.9	15.2	15.2	96.39	11
24 7.5	17.7	83	0	14.6	0	160	22.5	17.9	0.052	0.296	0.181	0.203	17.9	23.4	17.8	26	28.6	19	148.27	402
24 8.5	21.1	67	0	14.3	0	367	32.1	20.1	0.044	0.326	0.252	0.262	27.7	35.9	22.7	38	46.1	26.7	177.49	655
24 9.5	23.6	50	1	48	0	543	38.1	22.4	0.065	0.362	0.241	0.305	33	43.5	26.4	45.1	57.3	31.6	200.74	852
24 10.5	24.7	47	0.7	31	0	674	41.3	24.9	0.092	0.319	0.202	0.277	35.3	49.9	29.9	49.8	65.3	36	180.69	995
24 11.5	25.9	44	1.4	42	0	735	42	26.3	0.112	0.357	0.193	0.321	35.9	53.3	31.1	50.7	68.1	37.4	203.89	1057
24 12.5	25.5	42	0.8	11.2	0	728	43.5	27	0.124	0.414	0.242	0.365	37	54.7	31.7	51.1	68.6	37.7	235.35	1043
24 13.5	26.4	40	0	7.4	0	648	45.3	27.9	0.136	0.382	0.267	0.309	37.9	54.2	32.8	51.3	67.6	38.7	204.69	942
24 14.5	26.5	32	0	30	0	521	45	28.7	0.145	0.298	0.264	0.258	37.3	50.9	33.3	49.1	62.9	38.8	175.80	788
24 15.5	25.4	41	0	38	0	346	42.6	29.1	0.142	0.213	0.24	0.181	35.3	45.8	33.2	46.2	55.3	38	128.81	559
24 16.5	22.8	50	0	31	0	126	35.7	28.2	0.1	0.213	0.203	0.178	29.4	36.4	30.1	38.5	41.4	33	122.96	176
24 17.5	21.1	53	0	31	0	3	25.4	26.7	0.062	0.204	0.123	0.143	21.2	25.4	25.9	27.9	26.1	26.2	103.56	2

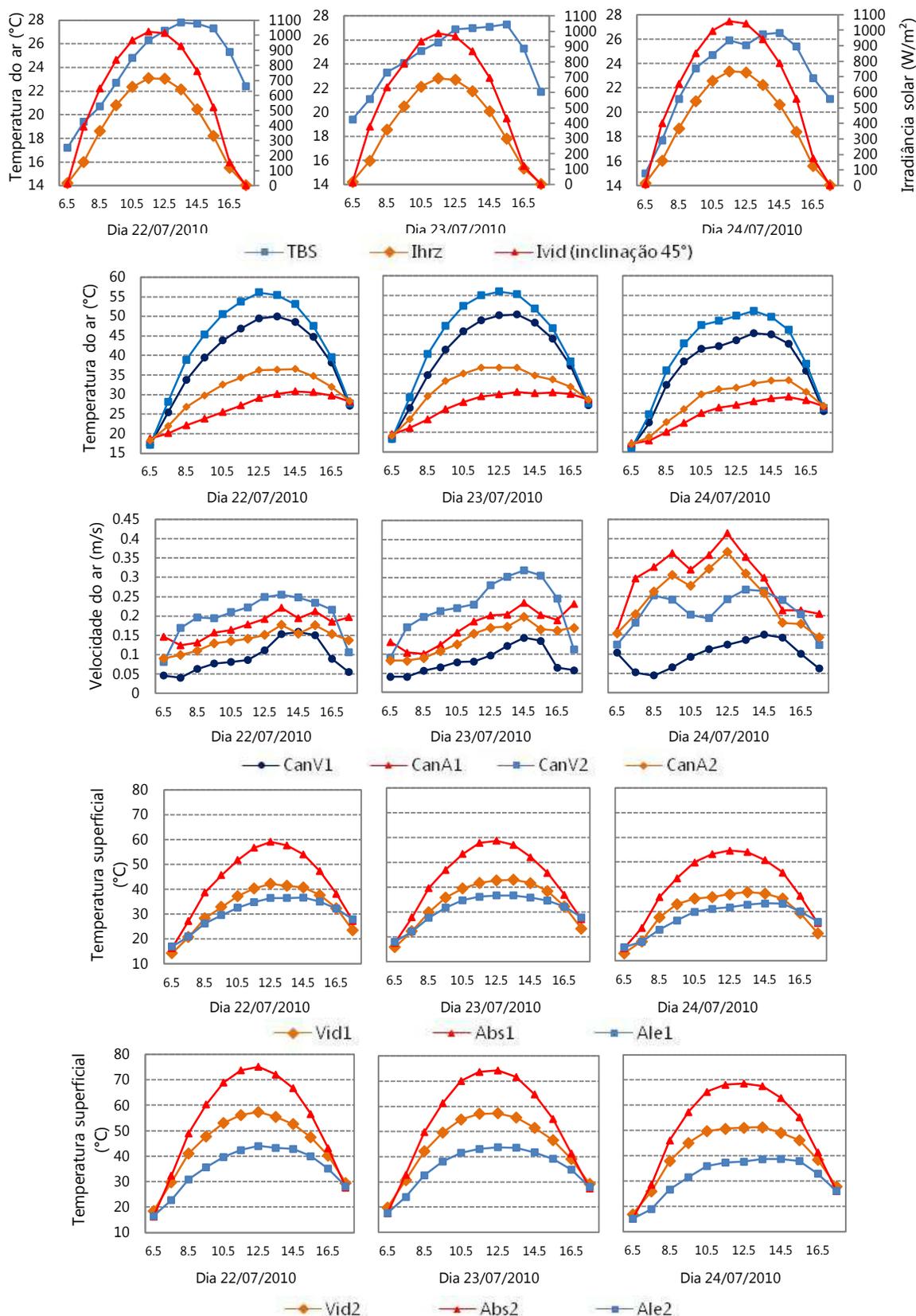


Figura 4: Dados monitorados em julho de 2010

Tabela 6: Dados adquiridos em agosto de 2010

Dia e hora	Dados Estação INMET						Temperaturas do ar no coletor (°C)			Velocidades do ar no coletor (m/s)						Temperaturas superficiais no coletor (°C)						Cálculo	
	TBS	UR	VelV	DirV	Pluv	Ihrz	CanV1	CanA1	CanV2	CanA2	CanV1	CanA1	CanV2	CanA2	Vid1	Abs1	Ale1	Vid2	Abs2	Ale2	Q	Ivid	
15 6.5	9.3	89	0	147	0	26	11.8	13.7	11.7	13.3	0.083	0.367	0.002	0.272	8.4	11.1	11.7	11	11	11.1	176.68	23	
15 7.5	11	80	0	149	0	174	18	14	19.5	14.7	0.042	0.39	0.106	0.314	13.4	18.7	13.5	23.6	22.9	14.5	199.27	306	
15 8.5	13.4	71	0	149	0	419	26.1	15.6	29.6	17.9	0.058	0.319	0.238	0.255	20.9	30.5	17.4	39.3	39.6	20.8	173.29	660	
15 9.5	15.3	62	0	159	0	598	32.4	17.1	36.8	20.5	0.079	0.333	0.341	0.277	26.9	38.4	20.7	49.6	51.1	25.6	190.77	852	
15 10.5	17.3	52	0	170	0	725	37.4	18.9	42.3	23.3	0.09	0.308	0.379	0.269	31.5	44.7	24.1	57.6	59.8	30.1	184.83	986	
15 11.5	17.4	50	0	157	0	791	41.2	19.9	45.7	24.4	0.093	0.336	0.515	0.303	36	48.9	25.9	62.9	65.1	32.7	209.87	1054	
15 12.5	18.9	46	0	167	0	779	43.2	21.1	47.7	25.9	0.114	0.309	0.601	0.283	37.6	50.6	27.6	64.6	66.8	34.6	202.46	1032	
15 13.5	19	45	0	148	0	701	43.6	21.8	47.2	26	0.152	0.336	0.697	0.316	37.8	49	27.8	62.3	64.1	34.5	226.11	937	
15 14.5	19	46	0.1	169	0	565	41.1	22.4	44	26	0.148	0.351	0.558	0.327	34.7	44.7	27.1	55.8	57.2	32.7	225.24	775	
15 15.5	17.5	50	0	171	0	381	36.1	21.7	37.9	24.1	0.141	0.437	0.423	0.399	30.4	37.5	24.7	45.5	46.2	28.7	260.40	542	
15 16.5	15.9	53	0.5	169	0	163	28.1	20.6	29.2	21.8	0.125	0.464	0.204	0.388	23.2	28.3	21.5	33.1	33	23.4	250.23	215	
15 17.5	14.4	57	0	169	0	8	18.6	19.1	19	19	0.101	0.508	0.056	0.393	14.8	18.3	18	18.9	18.8	17.8	248.96	8	
16 6.5	8.3	81	0.3	141	0	30	10.4	10.5	10.1	10.3	0.191	0.704	0.208	0.56	7.6	9.2	8.9	9.6	9.5	8.7	362.75	26	
16 7.5	10.1	73	3.3	143	0	197	15.2	11.5	16.9	12.1	0.117	0.827	0.188	0.602	12.3	17.2	10.8	21.6	22.1	11.8	404.64	388	
16 8.5	12.3	64	3.3	146	0	465	20.5	12.5	23.5	13.8	0.125	1.056	0.247	0.727	17.7	26.7	12.8	33.6	35.1	15	507.67	745	
16 9.5	13.9	58	1.9	147	0	641	24.6	13.7	28.1	15.3	0.167	1.166	0.314	0.803	21.6	33.2	14.3	40.5	43.2	17	566.73	921	
16 10.5	16.2	47	1.4	136	0	765	30.6	15.7	35.4	18.5	0.133	0.705	0.368	0.528	26.7	40.7	18.1	49.5	53.3	22.5	367.42	1045	
16 11.5	17.5	43	0	142	0	828	33.7	17.4	39.2	20.7	0.124	0.599	0.398	0.472	29.7	45.5	20.6	54.6	58.7	25.8	324.33	1106	
16 12.5	18.5	35	0.3	137	0	816	38.3	19.4	43.9	23.6	0.118	0.429	0.491	0.356	32.9	48.9	24	59.1	62.9	30	250.20	1086	
16 13.5	19.3	32	0	147	0	738	39	20.4	44.2	24.6	0.161	0.411	0.537	0.349	33.2	47.7	25.1	58.1	61.3	31	247.78	996	
16 14.5	19.1	31	0	131	0	597	39.1	21.3	43.1	25.2	0.162	0.354	0.492	0.304	32.9	44.7	25.9	55.1	57.1	31.4	216.87	831	
16 15.5	19.4	32	0	149	0	407	35.9	21.7	38.6	24.7	0.152	0.325	0.382	0.382	30	38.8	25.3	47.2	48.2	29.7	195.64	597	
16 16.5	17.8	36	0	149	0	178	29.6	21.3	31	23	0.116	0.317	0.219	0.267	24.5	30	22.9	35.5	35.4	25.6	177.52	253	
16 17.5	16.1	40	0.2	152	0	6	19.8	20.1	20.4	20.2	0.069	0.316	0.04	0.235	16.2	19.7	19.4	20.7	20.6	19.7	154.65	7	
17 6.5	9	75	0	147	0	29	11.1	11.4	11	11.2	0.094	0.576	0.057	0.46	8.1	10.1	9.8	10.7	10.5	9.6	287.77	25	
17 7.5	12.9	55	2	74	0	194	17.2	12.4	19.4	13.2	0.057	0.626	0.143	0.479	13.9	18.9	12.1	24.9	24.4	13.5	311.51	370	
17 8.5	15.1	48	1.1	56	0	466	23.2	14.4	27.2	16.4	0.088	0.571	0.232	0.428	19.9	29.6	15.7	37.5	39.2	19.2	290.77	747	
17 9.5	16.7	43	0.9	41	0	644	28.8	16.2	34	19.1	0.105	0.502	0.289	0.391	24.5	37.2	18.8	46.9	49.7	23.7	267.00	925	
17 10.5	17.7	39	0.1	70	0	769	34	18.1	40	22.2	0.103	0.402	0.316	0.328	28.9	44	22.3	55.3	58.7	28.4	224.24	1051	
17 11.5	19.3	32	0.2	41	0	830	38	20.1	44.4	25.1	0.098	0.345	0.343	0.293	32.2	49.3	25.4	60.9	64.5	32.3	200.31	1110	
17 12.5	20.5	28	0.1	52	0	822	40.8	21.3	47.2	26.9	0.114	0.334	0.453	0.282	35	51.5	27.2	63.4	66.6	34.2	201.07	1095	
17 13.5	20.8	27	0	71	0	742	41.6	22.5	47.5	28.1	0.143	0.295	0.463	0.252	34.7	50.4	28.5	62.4	65	35.4	183.80	1001	
17 14.5	21.8	27	0	60	0	599	41	23.4	45.9	28.7	0.162	0.266	0.415	0.228	34.2	47	29	58.4	60	35.3	167.29	835	
17 15.5	21.2	28	0	141	0	409	36.9	23.4	40.2	26.8	0.155	0.312	0.329	0.272	30.8	40.2	27.2	48.9	49.8	31.9	186.55	601	
17 16.5	19.7	29	0	143	0	184	30.4	22.6	31.9	24.1	0.109	0.378	0.217	0.32	25.8	31	24	36.5	36.3	26.5	208.11	269	
17 17.5	16.3	37	0	147	0	5	21.3	21.7	21.9	21.7	0.067	0.286	0.041	0.215	17.4	21.2	20.9	22.2	22.1	21.3	141.08	6	

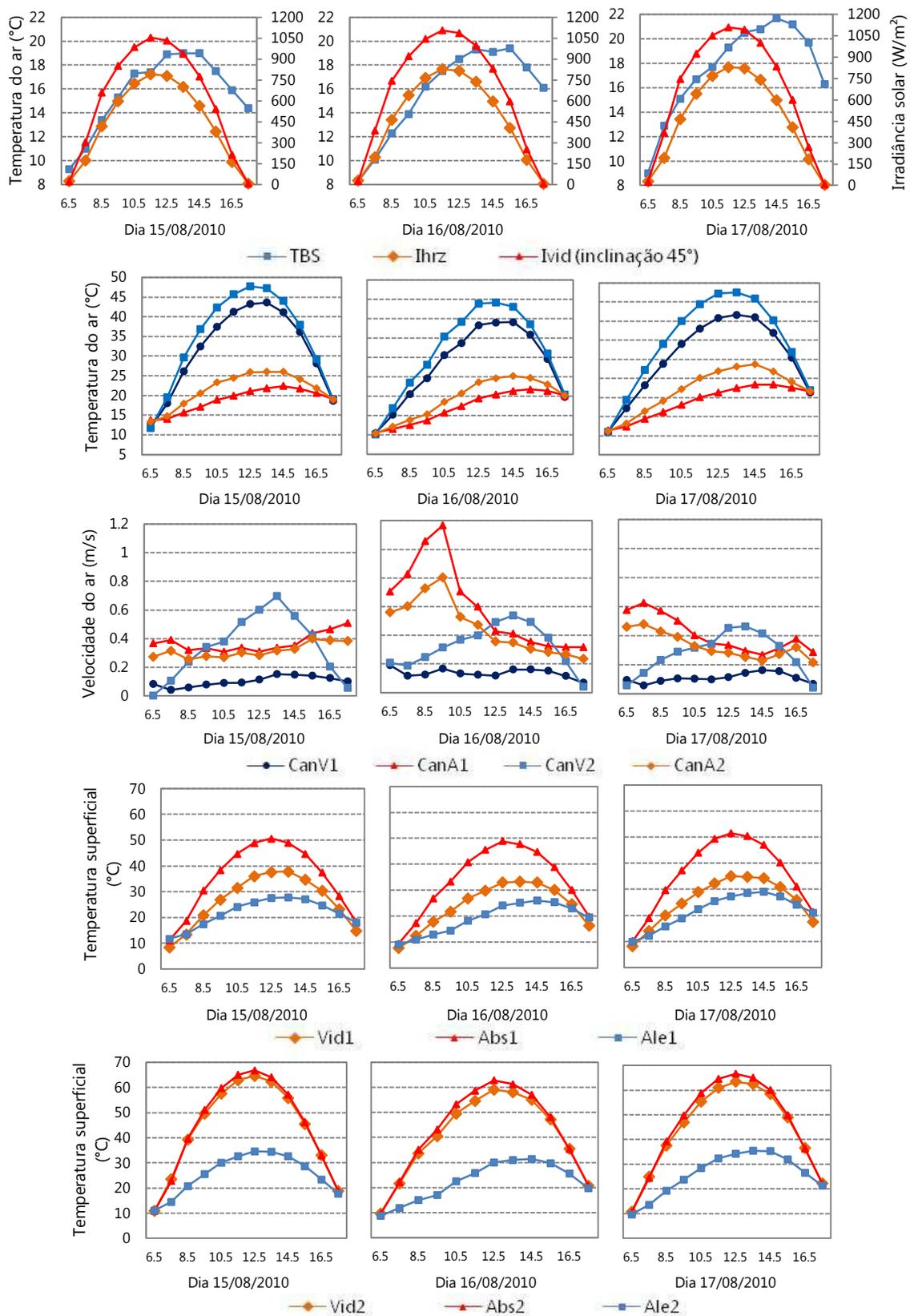


Figura 5: Dados monitorados em agosto de 2010