



Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade de Tecnologia - FT  
Departamento de Engenharia Mecânica

# **Estudo Teórico e Experimental de Chaminés Solares**

Por: Vítor Matos Silva

Brasília, DF  
2021

Vítor Matos Silva

# **Estudo Teórico e Experimental de Chaminés Solares**

Relatório submetido como requisito parcial  
para obtenção de grau de Engenheiro Mecânico

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade de Tecnologia - FT

Orientador: Prof. João Manoel Dias Pimenta

Brasília, DF

2021

---

Vítor Matos Silva  
Estudo Teórico e Experimental de  
Chaminés Solares/ Vítor Matos Silva. – Brasília, DF, 2021-  
66 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. João Manoel Dias Pimenta

Projeto de Graduação – Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade de Tecnologia - FT , 2021.

1. Chaminé solar. 2. Climatização passiva. I. Prof. João Manoel Dias Pimenta.  
II. Universidade de Brasília. III. Faculdade de Tecnologia - FT. IV. Estudo  
Teórico e Experimental de  
Chaminés Solares

CDU 02:141:005.6

---

# RESUMO

Este trabalho tem o propósito de aplicar e verificar experimentalmente um modelo matemático capaz de auxiliar o projeto de chaminés solares para atingir níveis de vazão de ar desejados em edificações. Inicialmente, são apresentados diversos estudos realizados por outros autores e também uma revisão de conceitos teóricos acerca do tema. Também é realizado um detalhamento sobre os parâmetros que impactam no desempenho de chaminés solares, de modo a auxiliar a análise de que fatores poderiam ser mudados para obter uma maior vazão de ar. Posteriormente, é utilizado um modelo matemático já existente para chaminés de configuração vertical, com dados climáticos reais fornecidos para o clima de Brasília, DF e obtendo valores de vazão de ar a cada hora do ano e verificando se a vazão de ar obtida é o suficiente para satisfazer um mínimo arbitrado. Posteriormente, é construído um aparato experimental para permitir a tomada de medições acerca das temperaturas atingidas em certos pontos da chaminé, bem como das velocidades do ar atingidas na saída da chaminé. Por fim, compara-se os valores calculados pelo modelo matemático proposto e os valores obtidos experimentalmente, sugerindo-se soluções para a melhora dos resultados em trabalhos futuros.

**Palavras-chaves:** chaminé solar, ventilação, ventilação passiva, climatização passiva, efeito chaminé.

# ABSTRACT

This paper has the purpose of applying and experimentally validating a mathematical model capable of aiding the design of solar chimneys in order to reach desired levels of airflow in buildings. Initially, many studies made by other authors are presented, as well as a review of concepts regarding the topic. It's also done a detailing of parameters that have an impact on the performance of solar chimneys. Afterwards, an existing mathematical model for vertical chimneys is utilized with real climatic data for the region of Brasília, Brazil, obtaining values for airflow for each hour of the year and verifying if the obtained airflow is enough to suffice an arbitrated minimum. An experimental setup is then built to allow for taking measures on attained temperatures in certain points of the chimney, as well a airflow velocities on the chimney exit. Finally, a comparison between the values calculated by the proposed mathematical model and the experimentally obtained values is made, with suggestions for the improvement of results in further projects.

**Key-words:** solar chimney, passive ventilation, passive climatization, stack effect, chimney effect, buoyancy-driven ventilation.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Exemplo de variação da radiação solar ao longo do dia. . . . .	8
Figura 3.1 – Representação simplificada de uma chaminé inclinada. . . . .	10
Figura 5.1 – Variação da largura da chaminé com a radiação direta. . . . .	19
Figura 5.2 – Vazão de ar obtida de 9 às 16h ao longo de Janeiro. . . . .	20
Figura 5.3 – Vazão de ar obtida de 9 às 16h ao longo de Fevereiro. . . . .	20
Figura 5.4 – Vazão de ar obtida de 9 às 16h ao longo de Março. . . . .	21
Figura 5.5 – Vazão de ar obtida de 9 às 16h ao longo de Abril. . . . .	21
Figura 5.6 – Vazão de ar obtida de 9 às 16h ao longo de Maio. . . . .	22
Figura 5.7 – Vazão de ar obtida de 9 às 16h ao longo de Junho. . . . .	22
Figura 5.8 – Vazão de ar obtida de 9 às 16h ao longo de Julho. . . . .	23
Figura 5.9 – Vazão de ar obtida de 9 às 16h ao longo de Agosto. . . . .	23
Figura 5.10–Vazão de ar obtida de 9 às 16h ao longo de Setembro. . . . .	24
Figura 5.11–Vazão de ar obtida de 9 às 16h ao longo de Outubro. . . . .	24
Figura 5.12–Vazão de ar obtida de 9 às 16h ao longo de Novembro. . . . .	25
Figura 5.13–Vazão de ar obtida de 9 às 16h ao longo de Dezembro. . . . .	25
Figura 5.14–Vazão de ar obtida de 9 às 16h ao longo do ano. . . . .	26
Figura 5.15–Variação de radiação solar para superfícies inclinada e vertical ao longo do ano. . . . .	26
Figura 6.1 – Rebaixo nas paredes da chaminé para encaixe do vidro. . . . .	27
Figura 6.2 – Detalhe de uma das cantoneiras usadas para fixar a parede de vidro na montagem. . . . .	28
Figura 6.3 – Dobradiças do suporte da chaminé solar . . . . .	29
Figura 7.1 – Indicação da radiação recebida pelo piranômetro. . . . .	31
Figura 7.2 – Montagem do piranômetro na mesma inclinação da chaminé solar. . . .	32
Figura 7.3 – Anemômetro de turbina Lutron AM-4201. . . . .	33
Figura 7.4 – Diagrama do aparato experimental. . . . .	34
Figura 7.5 – Montagem da chaminé solar. . . . .	35
Figura 8.1 – Variação das temperaturas ao longo do Teste 1. . . . .	36
Figura 8.2 – Variação das temperaturas ao longo do Teste 2. . . . .	36
Figura 8.3 – Variação das temperaturas ao longo do Teste 3. . . . .	37
Figura 8.4 – Variação das temperaturas ao longo do Teste 4. . . . .	37
Figura 8.5 – Variação das temperaturas com a radiação solar incidente no Teste 1. .	38
Figura 8.6 – Variação das temperaturas com a radiação solar incidente no Teste 2. .	38
Figura 8.7 – Variação das temperaturas com a radiação solar incidente no Teste 3. .	38
Figura 8.8 – Variação das temperaturas com a radiação solar incidente no Teste 4. .	39

Figura 8.9 – Visão infravermelha da parede interna da chaminé. . . . .	39
Figura 8.10–Efeito da radiação solar incidente na vazão de ar obtida. . . . .	40
Figura 8.11–Efeito da radiação solar incidente no vidro. . . . .	40
Figura 8.12–Efeito da radiação solar incidente na parede absorvedora. . . . .	41
Figura 8.13–Efeito da radiação solar incidente no ar. . . . .	41
Figura 8.14–Montagem do termopar para medição da temperatura do ar. . . . .	42
Figura 8.15–Efeito da radiação solar incidente na vazão de ar no Teste 1. . . . .	42
Figura 8.16–Variações na vazão e na temperatura do ar no Teste 3. . . . .	43
Figura F.1 – Detalhe do encaixe dos termopares e da termorresistência de referência. . . . .	62
Figura F.2 – Curva de calibração do termopar nº 1. . . . .	64
Figura F.3 – Curva de calibração do termopar nº 2. . . . .	64
Figura F.4 – Curva de calibração do termopar nº 3. . . . .	65
Figura F.5 – Curva de calibração do termopar nº 4. . . . .	65
Figura F.6 – Curva de calibração do termopar nº 5. . . . .	66

# Lista de símbolos

## Símbolos Latinos

$G_{s,o}$	Irradiação solar extraterrestre
$S_c$	Constante solar
$f$	[Coeficiente de correção para a excentricidade da órbita solar]
$Nu$	[Número de Nusselt]
$Ra$	[Número de Rayleigh]
$S$	[Profundidade do canal da chaminé]
$L$	[Comprimento da chaminé]
$g$	[Gravidade]
$Pr$	[Número de Prandtl]
$T$	[Temperatura]
$T_m$	[Temperatura média do fluido]
$A$	[Área da superfície]
$h$	[Coeficiente de transferência de calor por convecção]
$U_b$	[Coeficiente de transferência de calor por condução]
$T_r$	[Temperatura do ambiente interno]
$k_f$	[Condutividade térmica do ar]
$C$	[Capacidade calorífica]
$T_f$	[Temperatura do ar na saída da chaminé]
$T_i$	[Temperatura do ar na entrada da chaminé]
$\dot{m}$	[Vazão mássica de ar]
$\dot{V}$	[Vazão volumétrica de ar]
$C_d$	[Coeficiente de descarga]
$A_o$	[Área da seção de saída da chaminé]



$A_r$  [Razão entre as áreas de entrada e saída da chaminé]

## Símbolos Gregos

$\theta$  [Ângulo zenital]

$\sigma$  [Constante de Stefan–Boltzmann]

$\beta$  [Coeficiente de expansão volumétrica térmico]

$\nu$  [Viscosidade cinemática]

$\phi$  [Ângulo de inclinação da chaminé]

$\tau$  [Transmissividade]

$\alpha_s$  [Absortividade solar]

$\varepsilon$  [Emissividade da parede absorvedora]

$\rho_f$  [Massa específica do ar na saída da chaminé]

## Subscritos

$w$  Parede absorvedora

$g$  Cobertura de vidro

$g$  Céu

$a$  Ambiente

$ar$  Ar

$rwg$  Radiante da parede absorvedora para a cobertura de vidro

$rs$  Radiante da cobertura de vidro para o ambiente externo

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	O tema em estudo e sua relevância	1
1.2	Revisão bibliográfica	1
1.2.1	Predecessores da chaminé solar	1
1.2.2	Estudos na atualidade	2
1.3	Objetivos	5
1.4	Metodologia	5
1.5	Estrutura do trabalho	5
<b>2</b>	<b>REVISÃO E CONCEITOS TEÓRICOS</b>	<b>7</b>
2.1	Radiação solar	7
2.2	Convecção natural em canais	8
<b>3</b>	<b>DETALHAMENTO DE PARÂMETROS</b>	<b>10</b>
3.1	Altura	10
3.2	Profundidade do canal	11
3.3	Áreas de entrada e saída	12
3.4	Ângulo de inclinação	12
3.5	Entradas de ar no edifício	13
3.6	Materiais utilizados	13
3.6.1	Absorvedor solar	13
3.6.2	Cobertura de vidro	13
3.6.3	Isolante térmico	14
3.7	Radiação solar	14
<b>4</b>	<b>MODELAGEM MATEMÁTICA</b>	<b>15</b>
4.1	Transferência de calor na parede absorvedora	15
4.2	Transferência de calor na cobertura de vidro	16
4.3	Transferência de calor no ar do canal	17
<b>5</b>	<b>APLICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO</b>	<b>18</b>
5.1	Vazão de ar	18
5.2	Dimensionamento do canal	18
5.3	Desempenho da chaminé	19
<b>6</b>	<b>CONSTRUÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL</b>	<b>27</b>

	<b>7 INSTRUMENTAÇÃO</b>	<b>30</b>
7.1	Medição de temperatura	30
7.2	Medição de radiação solar	30
7.3	Medição de vazão do ar	32
	<b>8 RESULTADOS E ANÁLISE</b>	<b>36</b>
8.1	Medidas de temperatura	36
8.2	Medidas de vazão do ar	39
8.3	Comparações entre valores teóricos e medições	40
	<b>9 CONCLUSÃO</b>	<b>44</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>45</b>
	<b>APÊNDICES</b>	<b>48</b>
	<b>APÊNDICE A – CÓDIGO 1</b>	<b>49</b>
	<b>APÊNDICE B – CÓDIGO 2</b>	<b>51</b>
	<b>APÊNDICE C – CÓDIGO 3</b>	<b>53</b>
	<b>APÊNDICE D – DESENHOS TÉCNICOS</b>	<b>55</b>
	<b>APÊNDICE E – LINKS E ARQUIVOS</b>	<b>61</b>
	<b>APÊNDICE F – CURVAS DE CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES</b>	<b>62</b>

# 1 Introdução

## 1.1 O tema em estudo e sua relevância

A ventilação de edifícios visando a sua climatização e o conforto térmico de seus ocupantes tem sido uma preocupação há milênios, quando civilizações antigas utilizavam de soluções passivas para controlar a temperatura no interior dos edifícios. Tais soluções passivas podem envolver o controle de quanto calor o ambiente interno recebe do exterior, bem como estratégias para a melhor dissipação do calor no ambiente interno.

Esse tipo de solução geralmente envolve um projeto arquitetônico que visa um melhor aproveitamento de recursos e fenômenos que ocorrem naturalmente, possuindo a vantagem de não consumir energia e portanto possuir um custo econômico mais baixo do que utilizar as soluções ativas, como equipamentos de ar condicionado ou aquecedores. Essas técnicas são especialmente interessantes no caso específico do resfriamento para o conforto térmico, onde o uso do ar condicionado em residências e escritórios cresce cada vez mais e se torna uma preocupação para o consumo de energia no futuro. O uso do ar condicionado está previsto para ser uma das maiores demandas de energia elétrica, possivelmente tendo o consumo triplicado até 2050, como dito no artigo da Agência Internacional de Energia (2018).

Dentre as possíveis soluções passivas para melhorar a dissipação de calor, existe a chaminé solar. Utilizando-se do calor transmitido pela radiação solar, o ar dentro de uma estrutura similar a uma chaminé é aquecido e, se tornando menos denso, tende a subir em direção à saída da chaminé. Isso naturalmente força um fluxo de ar que pode ser utilizado para resfriar o interior de um edifício.

## 1.2 Revisão bibliográfica

### 1.2.1 Predecessores da chaminé solar

Conceitos semelhantes ao da chaminé solar têm sido utilizados há mais de 3000 anos, tendo sido encontrados em civilizações antigas no Oriente Médio. Um exemplo é a torre de vento encontrada no Irã. Como explicado por MOGHADDAM et al. (2011), essa torre é uma estrutura alta ou uma torre pequena instalada no topo de telhados que se aproveita da diferença de pressão do vento em uma altura mais elevada para o ar ao nível do solo. Ela foi bastante utilizada em áreas quente e secas, e ainda é utilizada em algumas áreas do Oriente Médio, servindo como um método de melhorar a ventilação natural de edifícios. Caso a torre esteja com sua abertura voltada para a direção em que o vento

geralmente flui, isso causa um fluxo natural de ar entrando e descendo pela abertura da torre para resfriar o ambiente interno de um edifício e sair por aberturas mais baixas. Caso a torre esteja com a abertura voltada para o lado contrário ao fluxo do vento, o ar entrará pelas aberturas inferiores do edifício e sairá pela abertura da torre, similarmente ao que acontece na chaminé solar.

Em 1972, Félix Trombe patenteou a Parede de Trombe, uma ideia extremamente parecida com a ideia da chaminé solar. A Parede de Trombe é uma parede feita para absorver grandes quantidades de energia térmica obtida através do sol que foi originalmente pensada para ser uma solução passiva visando o aquecimento de edifícios pela radiação solar, consistindo em uma parede escura para a absorção de radiação solar, coberta por uma parede de vidro. O ar frio passa por uma abertura inferior, sendo aquecido principalmente pela transferência de calor por convecção com a superfície escura da Parede de Trombe, e então flui para cima devido ao efeito da diferença de densidade, indo para a área interior do edifício através de uma abertura para ventilação.

Apesar de o conceito original ter sido criado para realizar o aquecimento do ambiente interior de um edifício, ele pode ser facilmente modificado para que funcione a favor do resfriamento, muitas vezes sendo utilizado para ambas as finalidades a depender da necessidade trazida por cada época do ano. Ao fechar a abertura superior e impedir a entrada do ar aquecido no ambiente interno, direciona-se o ar aquecido para uma abertura que leve ao exterior do edifício, criando assim um fluxo de ar que constantemente renova o ar do ambiente interno. Desta forma, o conceito da parede de Trombe se torna o mesmo do conceito da chaminé solar.

### 1.2.2 Estudos na atualidade

A estrutura de uma chaminé solar é bem simples, consistindo de uma superfície interna coletora de energia solar coberta por uma parede de vidro, com uma certa distância entre uma e outra para que haja um canal por onde o ar pode fluir, além de um isolamento térmico entre a superfície coletora e a parede do edifício. Diversos estudos buscam verificar a influência desses parâmetros na eficiência das chaminés solares alterando o ângulo da placa coletora para melhor absorção de radiação solar ou aumentando a profundidade do canal de ar, por exemplo.

Chaminés solares podem ser classificadas em duas categorias principais: chaminés de parede e de telhado. A chaminé de parede é a que utiliza o conceito da Parede de Trombe, tendo uma disposição totalmente vertical com um exterior de vidro que permite que um coletor absorva a radiação solar e aqueça o ar no interior do canal, fazendo com que o ar se mova para cima e crie o fluxo de ar. A chaminé solar de telhado ou Roof Solar Chimney (RSC) é um tipo de chaminé que utiliza um absorvedor no telhado de

um edifício, tendo sua estrutura inclinada para maximizar a captura de radiação solar ao longo do dia.

Desde o fim do século passado, estudos relacionados a chaminés solares passaram a ser mais frequentes conforme cresce o interesse em utilizar técnicas de climatização que não gerem impactos negativos no meio ambiente. BANSAL et al. (1993) desenvolveram um modelo matemático de uma chaminé em regime permanente, levando em consideração diferentes tamanhos para a abertura da chaminé. A análise foi feita verificando diferentes valores de temperatura ambiente e radiação solar, obtendo valores potenciais de vazão volumétrica de ar gerada pela chaminé.

A eficácia de uma chaminé solar foi verificada por BOUCHAIR (1994) experimentalmente e analiticamente. Foi montado um aparato com variações na profundidade do canal e na altura da entrada de ar e que permitia um controle da temperatura da parede da chaminé. Ao fim do estudo, foi observada uma relação proporcional entre a vazão mássica e a profundidade do canal. O autor também concluiu que nas condições específicas do estudo, a chaminé solar foi capaz de reduzir a temperatura e produzir uma vazão de ar com uma velocidade capaz de promover conforto térmico para as pessoas dentro do cômodo.

Um artigo estudando a influência da profundidade do canal da chaminé na vazão de ar gerada foi publicado por MATHUR et al. (2006). Foi realizado um experimento para verificar 9 combinações de diferentes alturas e profundidades do canal com diferentes níveis de radiação solar. O estudo concluiu que a vazão de ar aumenta linearmente com o aumento da radiação solar e também aumenta conforme a profundidade do canal aumenta. No mesmo ano também foi estudada a eficiência de chaminés solares com canal inclinado durante o verão. Neste estudo, MATHUR et al. (2006) verificaram a influência de um ângulo de inclinação sobre a vazão de ar induzida pela chaminé, criando um modelo matemático para estimar os valores de vazão mássica ao longo de um período do dia variando de 09:30 a 16:30 em um dia de verão com os ângulos de  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ$  no absorvedor. Também foi montado um aparato experimental para verificar os resultados encontrados através da simulação da solução teórica, utilizando uma câmara cúbica de madeira e uma chaminé solar do tipo RSC. Os autores relataram haver uma boa concordância entre os resultados teóricos e os experimentais, demonstrando que a inclinação ótima para obter uma maior vazão mássica de ar é de  $45^\circ$  para a latitude de  $27^\circ$ , que é a latitude na cidade de Jaipur, na Índia, onde o estudo foi realizado.

BASSIOUNY e KOURA (2008) realizaram um estudo analítico e numérico sobre o uso de chaminés solares para ventilação natural em um cômodo. O estudo considerava a influência do tamanho da abertura da entrada da chaminé e da profundidade do canal na renovação do ar dentro do cômodo. Utilizando um programa escrito em linguagem FORTRAN para simular a chaminé em diferentes condições, foi concluído que a profundidade

do canal possui uma influência maior que a abertura da chaminé e que após um certo ponto, o aumento da área da entrada pode ter um efeito prejudicial diminuindo a vazão de ar na chaminé.

Outro estudo analítico foi realizado por SAKONIDOU et al. (2008), utilizando dados da radiação solar absorvida pela parede da chaminé ao longo de um dia para diferentes valores de ângulos de inclinação para prever a temperatura e a velocidade do ar no interior da chaminé, assim como as temperaturas da parede. Os resultados obtidos pelo modelo desenvolvido foram validados por métodos numéricos e experimentais, indicando que o modelo pode ser utilizado para avaliar parâmetros no projeto de chaminés solares.

A relação entre o ângulo de inclinação do coletor solar e a vazão de ar produzida pela chaminé foi verificada por NEVES et al. (2011). Foram comparados resultados de uma simulação utilizando o software EnergyPlus e os resultados experimentais de um protótipo construído que permitia a variação do ângulo do coletor. Os resultados do estudo foram de que, para locais de baixa latitude, é mais eficiente projetar a chaminé para que tenha uma inclinação visando capturar maior incidência solar do que uma inclinação que visa maior fluxo de ar.

O efeito de uma chaminé solar na economia de energia de um edifício em Xangai foi estudado por ZHA et al. (2017). Foi utilizado um modelo teórico para simular numericamente a vazão de ar na chaminé e o impacto disso na economia de energia devido ao uso de um ar condicionado no edifício. Posteriormente foi realizada uma simulação no software EnergyPlus para comparar os resultados. Além de ser constatado que o software utilizado obtém resultados muito parecidos com os da simulação numérica, também foi observado que a chaminé solar possui um efeito considerável na taxa de economia de energia na época em que mais se usa ar condicionado no local, economizando 61,8 %, 47,7%, 11,8%, 13,9% e 59,6% nos meses de Abril, Maio, Junho, Setembro e Outubro, respectivamente.

Avaliando o efeito da variação da temperatura na parede absorvedora, SHI e ZHANG (2016) utilizaram um modelo numérico para obter a vazão de ar esperada teoricamente com diversas profundidades de canal e posteriormente validaram os valores obtidos por meios experimentais.

Baseado na revisão bibliográfica realizada, é possível diferenciar os tipos de estudos realizados na área em três diferentes tipos que podem ser aplicados a chaminés solares: o tipo de estudo que relaciona um ou mais parâmetros específicos, como altura ou profundidade do canal, com a vazão de ar obtida pela chaminé; o tipo que utiliza a temperatura ou a densidade do ar no canal para obter a vazão de ar; e o tipo que verifica a relação entre a incidência de radiação solar e a vazão de ar obtida. O último tipo será o mais útil para o objetivo desse trabalho, que será verificar a variação da vazão de ar de acordo com a incidência de radiação solar ao longo do ano.

## 1.3 Objetivos

O objetivo desse trabalho é projetar uma chaminé solar com parâmetros que lhe permitam gerar uma determinada vazão de ar requerida para atingir os níveis de ventilação de um ambiente interno. Um modelo matemático é utilizado para verificar o desempenho da chaminé solar de acordo com os dados de irradiação solar para a região do Distrito Federal. Posteriormente, é construída uma chaminé solar para medições experimentais e comparação com os resultados teóricos do modelo matemático.

## 1.4 Metodologia

A metodologia utilizada consiste em aplicar um modelo matemático verificar o desempenho de uma chaminé solar em termos da vazão de ar obtida. Utilizando o modelo, verifica-se o desempenho teórico ao longo de um ano com os dados meteorológicos do INMET. Para a verificação do modelo matemático, um aparato experimental será construído e medições de parâmetros como a radiação solar, temperaturas em diversos pontos e a velocidade do ar na saída da chaminé serão realizadas. Assim, é possível fazer a comparação dos resultados teóricos esperados e os obtidos experimentalmente, bem como sugerir possíveis melhorias para o trabalho.

## 1.5 Estrutura do trabalho

Este projeto de graduação é dividido em 9 capítulos. O primeiro capítulo dá uma breve introdução ao tema, mostrando a importância do estudo sobre chaminés solares na área de climatização para conforto térmico. Também é feita uma revisão bibliográfica para melhor compreensão do que já tem sido feito em estudos sobre o tema.

Nos Capítulos 2 e 3, é feita uma revisão de conceitos teóricos necessários para a realização e o entendimento do trabalho. No Capítulo 2 são esclarecidos conceitos já estudados na graduação, bem como teorias novas que auxiliarão no desenvolvimento do modelo matemático apresentado nos capítulos seguinte. Já no Capítulo 3, são descritos todos os parâmetros pertinentes ao desenvolvimento de uma chaminé solar, com descrições detalhadas sobre como esses parâmetros podem influenciar no seu desempenho.

Finalmente, o Capítulo 4 apresenta o desenvolvimento do modelo matemático proposto para essa etapa do trabalho, apresentando as equações de balanço de energia que descrevem o problema da chaminé projetada. No Capítulo 5 é aplicado o modelo e verificado se é possível atender ao requerimento de vazão volumétrica de ar para um ambiente com dados de radiação solar ao longo do ano.



No Capítulo 6, há o detalhamento da construção do aparato experimental que será utilizado na segunda etapa do trabalho. Após a construção do aparato, a instrumentação e a maneira como foram realizadas as medições experimentais são especificadas no Capítulo 7. Em seguida, o Capítulo 8 apresenta a análise das medições experimentais, bem como a comparação dos dados com o modelo matemático proposto. Por fim, o Capítulo 9 contém a conclusão do trabalho.

## 2 Revisão e Conceitos Teóricos

### 2.1 Radiação solar

A radiação solar recebida na Terra pode ser quantificada por uma constante solar  $S_c$  definida como o fluxo de energia solar que incide sobre uma superfície normal aos raios solares no exterior da atmosfera quando a Terra está a uma distância média do Sol. Essa radiação também depende do ângulo zenital, que é o ângulo de inclinação dos raios solares com a direção normal à superfície. Dessa forma, a radiação recebida na atmosfera pode ser descrita pela Equação 2.1.

$$G_{s,o} = S_c \cdot f \cdot \cos \theta \quad (2.1)$$

onde,  $G_{s,o}$  é a irradiação solar extraterrestre,  $S_c$  é a constante solar,  $f$  é o coeficiente de correção para a excentricidade da órbita solar e  $\theta$  é o ângulo zenital.

Como a radiação solar atinge a superfície da Terra em ângulos diferentes, esta radiação possui valores diferentes ao longo do dia. A depender do ângulo de inclinação dos raios solares, esta radiação se espalha ao atingir a atmosfera e se torna difusa, diminuindo a quantidade de raios solares que conseguem atingir a superfície diretamente. Portanto, a tendência é que o momento do dia em que se consegue a maior incidência de raios solares e, portanto, maior radiação solar, é o momento em que os raios solares atingem a superfície sem nenhuma inclinação. A Figura 2.1 mostra um exemplo de como a curva vermelha, representando a radiação solar direta, varia ao longo de um dia qualquer, tendendo a se maximizar em um horário próximo ao meio-dia, com grandes variações repentinas devido à presença de nuvens durante as medições. A curva azul, que representa a radiação solar difusa, permanece sem grandes variações, pois esta radiação não depende da presença de nuvens.

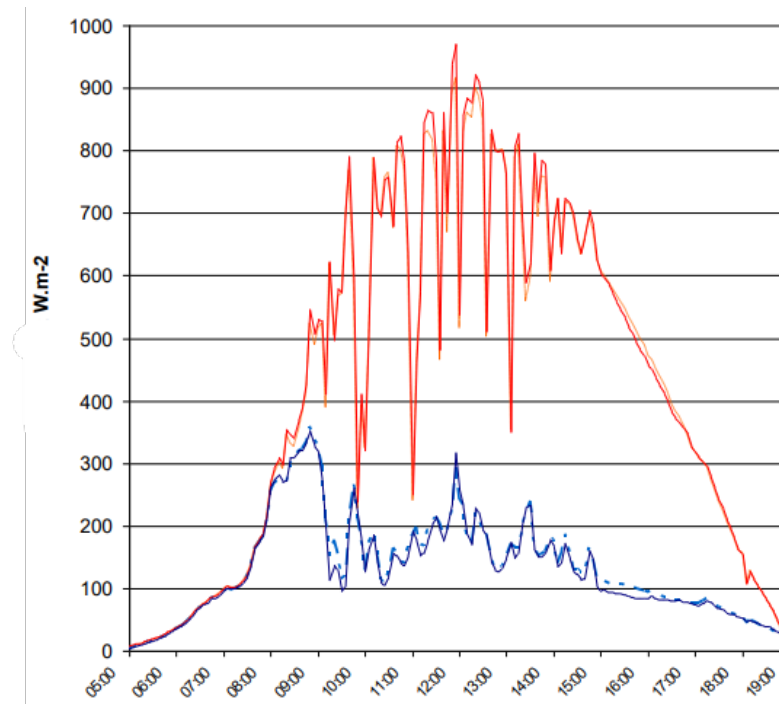


Figura 2.1 – Exemplo de variação da radiação solar ao longo do dia.  
 Fonte: SPN1 User Manual (2019).

## 2.2 Convecção natural em canais

A convecção natural é o mecanismo de troca de calor que ocorre devido ao empuxo gerado pela diferença de densidade do fluido a diferentes temperaturas. No caso do escoamento em canais como o de uma chaminé, a força de empuxo é o que causa o fluxo do fluido na direção vertical.

Para determinar a constante de transferência de calor por convecção neste tipo de escoamento, definem-se alguns parâmetros que influenciam essa constante. Um desses parâmetros é o número de Nusselt, definido como a razão entre a transferência de calor por convecção e a transferência de calor por condução de um fluido.

No caso de convecção natural, a complexidade do movimento do fluido dificulta a obtenção de relações analíticas para análise da transferência de calor, de forma que essas relações são obtidas através de estudos experimentais. Para a convecção natural em canais, pode ser utilizada a relação encontrada por AZEVEDO e SPARROW (1985), que calcularam o número de Nusselt para canais verticais e inclinados em vários ângulos e modos de aquecimento, encontrando a equação:

$$Nu = 0,645[Ra(S/L)]^{1/4} \quad (2.2)$$

onde,  $S$  é a distância entre as paredes do canal,  $L$  é o comprimento do canal e o número de Rayleigh  $Ra$  é definido pela Equação 2.3, obtido a partir da multiplicação dos números de Grashof e Prandtl, que são a relação entre flutuabilidade e viscosidade e a relação entre a difusividade dinâmica e a difusividade térmica dentro de um fluido, respectivamente.

$$Ra = \left( \frac{g\beta(T_s - T_{ar})L^3}{\nu^2} \right) Pr \quad (2.3)$$

onde,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $\beta$  é o coeficiente de expansão volumétrica térmica. A temperatura da superfície da parede  $T_s$  utilizada por AZEVEDO e SPARROW (1985) para calcular o número de Rayleigh foi uma temperatura média  $T_s$  entre as temperaturas medidas nas duas paredes, como mostrado na Equação 2.4:

$$T_s = \frac{T_w + T_g}{2} \quad (2.4)$$

As propriedades físicas do ar para o cálculo de  $\beta$ ,  $\nu$  e  $Pr$  foram calculadas em uma temperatura estimada  $T_m$  entre a temperatura  $T_s$  e a temperatura do fluido fora da camada limite, como mostra a Equação 2.5:

$$T_m = \frac{T_s + T_{ar}}{2} \quad (2.5)$$

### 3 Detalhamento de Parâmetros

A Figura 3.1 representa um modelo simples de uma chaminé inclinada com um ângulo  $\phi$  e um comprimento  $L$ , onde as áreas de entrada e saída são iguais à área do canal de profundidade  $S$  por onde o ar escoa. A cobertura de vidro possui a mesma área que a parede absorvedora, sendo esta representada pela seção hachurada.

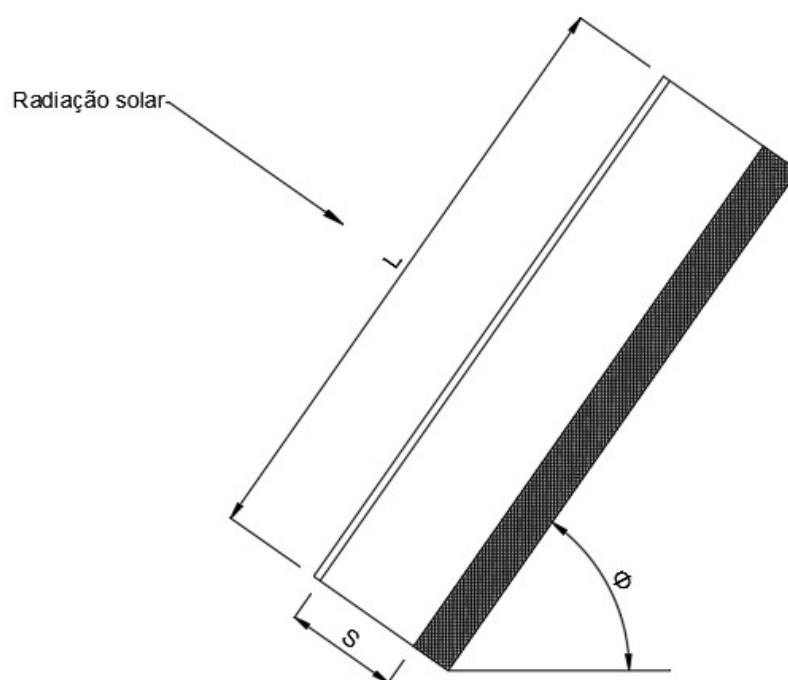


Figura 3.1 – Representação simplificada de uma chaminé inclinada.

#### 3.1 Altura

A altura da chaminé solar pode influenciar o desempenho positivamente devido a alguns motivos. Primeiramente, a diferença de pressão se torna maior pelo fato de a abertura de saída da chaminé se encontrar em um nível mais elevado, o que favorece o fluxo de ar dentro do canal. Outro motivo é que com o aumento da altura também há o aumento da área da parede absorvedora, que então absorve mais calor através da radiação solar e também favorece a taxa de ventilação induzida pela chaminé.

Alguns estudos confirmam essa influência positiva da altura, como o estudo de DING et al. (2005) e o estudo de SPENCER et al. (2000) que demonstrou um aumento linear da vazão de ar com o aumento da altura do canal da chaminé.

A eficiência térmica, definida como a razão entre o calor ganho pelo ar no interior do canal e o calor adquirido pela parede por radiação térmica, também pode ser melhorada pelo aumento da altura. Isto é demonstrado no estudo de SOMSILA et al. (2010) onde é

observado um aumento de 5% da eficiência térmica ao dobrar a altura da chaminé.

No caso de uma chaminé do tipo RSC, onde o comprimento do canal aumenta mais do que a altura devido ao ângulo de inclinação, as mesmas observações podem não ser válidas. Dados experimentais de ZHAI et al. (2005) demonstram que o ganho de temperatura pelo ar começa a decrescer após um certo valor de comprimento do canal.

## 3.2 Profundidade do canal

A profundidade do canal da chaminé solar é a distância entre a parede de vidro e a placa absorvedora na parede interna. Este parâmetro pode ter grande influência no desempenho da chaminé, como descrito no artigo de BASSIONY e KOURA (2008). Baseado em dados experimentais, HALLDORSSON et al. (2002) observaram que ao manter todos os outros parâmetros constantes e variar a profundidade da chaminé, houve um incremento contínuo da vazão de ar induzida.

No entanto, a vazão de ar nem sempre aumenta conforme o aumento da profundidade. Um estudo numérico de LEE e STRAND (2009) demonstra que para valores de profundidade a partir de 0,15 até 0,75 m, a vazão de ar diminui de 1,9 a 4,7%. Isso pode ser explicado pelo ocorrência de um fluxo reverso caso haja o descolamento da camada limite ou devido à maior dificuldade de se transferir calor ao ar no centro do canal quando a profundidade é muito grande. Assim, ocorre uma diferença de temperatura muito grande entre o ar em contato com a superfície quente da parede e o ar mais distante da parede, o que tem grande influência sobre a ocorrência de uma inversão no fluxo de acordo com SHI et al. (2018).

Além de estudos que demonstram uma diminuição no desempenho ao ultrapassar-se um certo valor de profundidade para a chaminé, também há estudos que relatam haver uma profundidade ótima mesmo sem observar uma inversão no fluxo de ar. MIYAZAKI et al. (2006) demonstraram por meio de simulações numéricas que ao aumentar a profundidade da chaminé além de 0,2 m o efeito sobre a vazão de ar era praticamente irrelevante.

É possível também observar uma relação entre a altura e a profundidade do canal, de forma a encontrar uma razão que maximize a vazão de ar. LIPING e ANGUI (2004) encontraram razões de altura/profundidade de 2:1 para uma chaminé solar do tipo RSC e de 10:1 para uma chaminé de parede que maximizavam os seus desempenhos.

### 3.3 Áreas de entrada e saída

As áreas de entrada e saída de ar geralmente estão associadas com a profundidade do canal e também possuem uma influência positiva na vazão de ar induzida. Estudos experimentais de SPENCER et al. (2000) demonstram que ao aumentar o tamanho da área de entrada da chaminé também aumenta a taxa de ventilação. Especificamente, caso a profundidade do canal não seja muito grande, o efeito da área de entrada da chaminé é mais relevante do que o tamanho da abertura de ar do edifício. Porém, se a profundidade do canal for muito pequena, as perdas por atrito se tornam mais relevantes que a influência da área de entrada da chaminé sobre a vazão de ar.

A relação entre as áreas de entrada e saída também é um fator de interesse, como mostrado por simulações numéricas de LI et al. (2004), obtém-se a maior vazão de ar quando a área de entrada é igual à área de saída. Quando as áreas não são iguais, a área de saída possui uma maior influência sobre a vazão.

### 3.4 Ângulo de inclinação

O ângulo de inclinação diz respeito ao ângulo entre o canal da chaminé e a horizontal, sendo um dos parâmetros mais importantes para o desempenho de uma chaminé solar. O ângulo de  $45^\circ$  é geralmente descrito como sendo o ângulo que permite a máxima vazão de ar. Porém, o ângulo que obtém a maior vazão de ar nem sempre é o ângulo que capta o máximo de radiação solar.

O modelo analítico de SAKONIDOU et al. (2008) mostra que a vazão máxima é obtida em um intervalo de ângulos entre  $65^\circ$  e  $76^\circ$  enquanto a máxima radiação solar é obtida por ângulos entre  $12^\circ$  e  $44^\circ$ . Em outro estudo realizado na Índia, PRASAD e CHANDRA (1990) observaram que a vazão máxima é obtida entre ângulos de  $50^\circ$  a  $75^\circ$ , enquanto a máxima radiação solar é coletada entre ângulos de  $0^\circ$  e  $55^\circ$ . Isto mostra que o melhor ângulo de inclinação de uma chaminé solar não é necessariamente o ângulo que capta mais radiação solar.

A latitude do local da chaminé possui grande influência sobre o ângulo de inclinação. O estudo de MATHUR et al. (2006) analisou os ângulos que obtinham a maior vazão de ar para latitudes entre 0 e  $65^\circ$  e encontrou valores de inclinação entre  $45^\circ$  e  $60^\circ$ , sendo que para latitudes de  $20^\circ$  a  $30^\circ$  o valor da inclinação foi consistentemente  $45^\circ$ .

## 3.5 Entradas de ar no edifício

As entradas de ar no edifício podem ser as portas, janelas ou qualquer abertura que conecte o interior da área a ser resfriada com o exterior do edifício, permitindo a tomada de ar externo. Essas aberturas são necessárias para o funcionamento da chaminé, pois um local totalmente fechado não permitiria a circulação do ar e portanto negaria o efeito de indução de fluxo de ar que a chaminé solar promove.

O estudo de LIPING e ANGUI (2006) encontrou uma relação entre a área da abertura de ar do edifício e outros parâmetros como a altura e a profundidade da chaminé, observando que uma maior abertura de ar promove um melhor desempenho da chaminé conforme as suas altura e profundidade aumentam.

Porém, nem sempre uma maior abertura para entrada de ar no edifício promove um melhor desempenho da chaminé. Por exemplo, DING et al. (2005) demonstraram experimentalmente que a vazão de ar começa a decrescer ao aumentar a área de abertura além de  $16m^2$ . A posição da abertura não parece ter influência relevante sobre a vazão de ar, como visto na simulação realizada por SHI et al. (2019), onde a variação da altura da janela no edifício simulado obteve uma diferença pequena na vazão.

## 3.6 Materiais utilizados

### 3.6.1 Absorvedor solar

O absorvedor solar é colocado na superfície interna do canal da chaminé, servindo o propósito de captar o máximo de energia térmica possível através dos raios solares. O efeito de materiais com maiores absorvidades é apresentado no estudo de LEE e STRAND (2009), onde é vista uma variação média de 48% na vazão de ar induzida pela chaminé ao aumentar o valor de absorvidade do material do absorvedor solar. O resultado é esperado, visto que uma maior absorvidade significa que o material absorve uma maior quantidade da energia emitida pelo sol através da radiação e, portanto, possui uma temperatura maior em sua superfície, aumentando a temperatura do ar no canal da chaminé e melhorando o seu desempenho.

### 3.6.2 Cobertura de vidro

A cobertura de vidro serve para permitir que os raios solares entrem no canal e aqueçam o absorvedor. O efeito de tipos de vidro com maiores transmissividades também é apresentado no estudo de LEE e STRAND (2009) que mostra um aumento médio de 38%



na vazão de ar da chaminé solar conforme a transmissividade do material aumenta, indicando que escolher vidros com maiores valores de transmissividade é de grande interesse para o projeto de uma chaminé solar.

### 3.6.3 Isolante térmico

O isolamento térmico é o material colocado entre o absorvedor e a parede interna da chaminé. Esse isolamento é de extrema importância para que o calor do absorvedor não seja perdido e transmitido ao ambiente interno do edifício. O artigo escrito por GAN (1998) mostra que caso não haja isolamento, a vazão de ar induzida pode ser até 40% menor, dependendo da espessura da parede entre o interior da chaminé e o ambiente interior.

## 3.7 Radiação solar

A quantidade de radiação solar incidindo sobre o absorvedor possui grande influência no desempenho da chaminé. MANCA et al. (2014) analisou a influência da radiação solar sobre a temperatura do absorvedor e sobre a vazão do ar, obtendo um acréscimo de 10% e 30%, respectivamente, ao dobrar o valor de radiação de 300 para 600  $W/m^2$ . BANSAL et al. (1993) também obtiveram uma relação entre a vazão de ar e a radiação solar, mostrando que ao aumentar a radiação de 100 para 1000  $W/m^2$  a vazão de ar aumentou de 100 a 350  $m^3/h$ . Apesar de nem todos os resultados serem otimistas, como o do estudo experimental de LEE et al. (2015) que mostrou um aumento de apenas 4% na vazão de ar quando a radiação variou de 340 a 960  $W/m^2$ , o aumento da radiação solar sempre é positivo no desempenho da chaminé.

# 4 Modelagem Matemática

Para o equacionamento do modelo matemático será utilizado o modelo de BANSAL et al. (2005) para uma chaminé solar vertical, incluindo também algumas modificações para adaptá-lo para um caso em que o canal está inclinado. Serão adotadas algumas considerações simplificadoras:

- O sistema se encontra em regime permanente;
- As temperaturas na cobertura de vidro e na placa absorvedora são constantes ao longo de sua área;
- A temperatura do fluido ao entrar no canal da chaminé é igual à temperatura ambiente;
- A cobertura de vidro foi considerada opaca para a reirradiação vindo da parede absorvedora;
- As propriedades do ar são calculadas a uma temperatura média entre as paredes da chaminé.

## 4.1 Transferência de calor na parede absorvedora

A parede absorvedora recebe calor na forma de radiação solar direta e aproximadamente difusa devido à interferência da atmosfera. A parede também perde calor por convecção pro ar que escoar pelo canal, além de perder uma fração pela própria emissão de radiação térmica. O balanço de energia pode ser calculado pela Equação 4.1.

$$\tau_g(\alpha_{sw}G)A_w = h_w A_w (T_w - T_a) + h_{rwg} A_w (T_w - T_g) + U_b A_w (T_w - T_r) \quad (4.1)$$

onde,  $\tau_g$  é a transmissividade do vidro,  $\alpha_{sw}$  é a absorptividade solar da parede absorvedora,  $A_w$  é a área superficial da parede absorvedora,  $A_g$  é a área superficial da cobertura de vidro,  $T_r$  é a temperatura do ambiente interno, que será considerada como igual à temperatura ambiente,  $h_w$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção da parede absorvedora,  $h_g$  é coeficiente de transferência de calor por convecção da cobertura de vidro,  $h_{rwg}$  é o Coeficiente de transferência de calor radiante da parede absorvedora para a cobertura de vidro e  $U_b$  é o coeficiente de transferência de calor por condução. Não será contabilizado o calor perdido por condução assumindo que o isolante térmico entre

a parede interna do edifício e a parede absorvedora torna esta troca de calor desprezível. Assim, o balanço de energia é obtido pela Equação 4.2.

$$\tau_g(\alpha_{sw}G)A_w + \tau_g(\alpha_{sky}G_{sky})A_w = h_w A_w (T_w - T_a r) + h_{rwg} A_w (T_w - T_g) \quad (4.2)$$

O coeficiente de transferência de calor por convecção da parede é calculado através da Equação 4.3, enquanto o número de Nusselt varia para os casos de uma chaminé vertical e uma chaminé inclinada.

$$\bar{h} = \frac{Nu \cdot k_f}{L} \quad (4.3)$$

O número de Nusselt para a chaminé vertical utilizado será o mesmo do modelo de BANSAL et al. (2005), descrito na Equação 4.4, enquanto o número de Nusselt para canais inclinados será retirado da Equação 2.2.

$$Nu = 0.68 + \frac{(0.67Ra^{1/4})}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad (4.4)$$

O coeficiente de transferência de calor radiante para a radiação que a parede absorvedora irradia para a cobertura de vidro pode ser calculado pela equação:

$$h_{rwg} = \sigma \frac{(T_g^2 + T_w^2)(T_g + T_w)}{(1/\varepsilon_g + 1/\varepsilon_w - 1)} \quad (4.5)$$

## 4.2 Transferência de calor na cobertura de vidro

A cobertura de vidro possui trocas de calor pelo recebimento de radiação solar direta e difusa e radiação térmica emitida pela parede absorvedora. Há também a perda de calor por convecção com o ar no interior do canal e pela emissão da própria radiação térmica. O balanço de energia para a cobertura de vidro pode ser calculado pela Equação 4.6.

$$(\alpha_{sg}G)A_g + h_{rwg}A_w(T_w - T_g) = h_g A_g (T_g - T_a r) + h_{rs} A_g (T_g - T_a) \quad (4.6)$$

onde,  $\alpha_{sg}$  é a absorvidade solar do vidro. O coeficiente de transferência de calor radiante para a radiação que a cobertura de vidro irradia para o ambiente exterior pode ser calculado pela Equação 4.7:

$$h_{rs} = \sigma \varepsilon_g \frac{(T_g + T_{sky})(T_g^2 + T_{sky}^2)(T_g - T_{sky})}{(T_g - T_a)} \quad (4.7)$$

onde a temperatura efetiva do céu  $T_{sky}$  é estimada pela Equação 4.8, equação empírica retirada também do modelo matemático de BANSAL et al (2005):

$$T_{sky} = 0,0552T_a^{1,5} \quad (4.8)$$

### 4.3 Transferência de calor no ar do canal

O ar no interior da chaminé apenas recebe calor pela convecção com a cobertura de vidro e com a parede absorvedora. A Equação 4.9 apresenta o balanço de energia para o ar.

$$q = h_g A_g (T_g - T_{ar}) + h_w A_w (T_w - T_{ar}) \quad (4.9)$$

Dada a hipótese simplificadora de que o sistema se encontra em regime permanente, todo o calor ganho pelo sistema deve ser retirado em mesma quantidade, de modo que o ar que sai pela chaminé retira todo o calor ganho pela convecção com a cobertura de vidro e a parede absorvedora. Desta forma, o calor retirado do sistema pode ser calculado pela Equação 4.10:

$$q = \dot{m} C_{ar} (T_f - T_i) \quad (4.10)$$

onde a vazão mássica  $\dot{m}$  pode ser escrita na forma de vazão volumétrica ao dividi-la pela massa específica do ar na entrada do canal. Assim, a Equação 4.10 pode ser reescrita em termos da vazão volumétrica na entrada da chaminé como na Equação 4.11:

$$q = \dot{V} C_{ar_1} (T_f - T_i) \quad (4.11)$$

A vazão mássica  $\dot{m}$  pode ser calculada pela relação empírica escrita na Equação 4.12, encontrada por BANSAL (1993) e ANDERSEN (1995):

$$\dot{m} = \frac{C_d \rho_f A_o}{\sqrt{1 + A_r^2}} \sqrt{\frac{2gL(T_{ar} - T_i) \sin \phi}{T_i}} \quad (4.12)$$

onde o coeficiente de descarga utilizado é o mesmo do modelo de BANSAL et al. 2005,  $C_d = 0,57$ .

# 5 Aplicação do Modelo Matemático

Utilizando as Equações 4.2, 4.6, 4.9 e 4.10 é possível resolver o sistema de equações para encontrar as temperaturas das superfícies da cobertura de vidro e da parede absorvedora e a temperatura do ar no canal da chaminé, bem como uma outra variável de interesse. Arbitrando-se os valores de comprimento e largura das paredes da chaminé e com a utilização do software EES, soluciona-se o sistema com o objetivo de obter a profundidade  $S$  do canal da chaminé necessária para que ela seja capaz de gerar uma vazão mínima requerida.

Para isso, é necessário introduzir as propriedades dos materiais utilizados, assumindo valores para a absorvidade e a emissividade do vidro, bem como escolher um material adequado para a parede absorvedora. Os valores das propriedades dos materiais são retirados de INCROPERA et al. (2011), com os valores de absorvidade e emissividade da parede absorvedora sendo arbitrados como sendo favoráveis para coleta de energia solar, de forma que a razão  $\alpha/\varepsilon$  seja grande. Admitindo valores similares aos de uma chapa de aço galvanizado, adota-se  $\alpha_{sw} = 0,8$  e  $\varepsilon = 0,3$ . Já os valores para o vidro são adotados como uma transmissividade  $\tau_g = 0,8$  e absorvidade solar  $\alpha_{sg} = 0,1$ . Todas as propriedades termofísicas do ar podem ser obtidas a partir da biblioteca de dados do software EES.

## 5.1 Vazão de ar

Inicialmente, deseja-se dimensionar uma chaminé solar que seja capaz de produzir uma certa vazão de ar em um certo dia do ano. O valor de vazão de ar utilizado como parâmetro será o da Resolução N<sup>o</sup> 09 de 16 de Janeiro de 2003 da ANVISA, que cita um valor mínimo de  $27 \text{ m}^3/h$ , ou aproximadamente  $0,008 \text{ m}^3/s$ . Assim, para propósitos de comparação, a chaminé solar terá seu desempenho considerado aceitável quando atingir este valor mínimo.

## 5.2 Dimensionamento do canal

Primeiramente, foi gerada uma tabela do tipo *Lookup Table* no software EES com uma coluna de valores da radiação direta  $G$  variando de 100 a  $900 \text{ W/m}^2$ . Desta forma, é possível resolver o sistema para mais de um valor de radiação, gerando uma tabela paramétrica com as variáveis que deseja-se conhecer para cada solução. Assim, ao gerar a tabela paramétrica para obter a profundidade do canal necessária para gerar a vazão  $V = 0,008 \text{ m}^3/s$ , obtém-se uma relação entre  $S$  e a radiação solar.

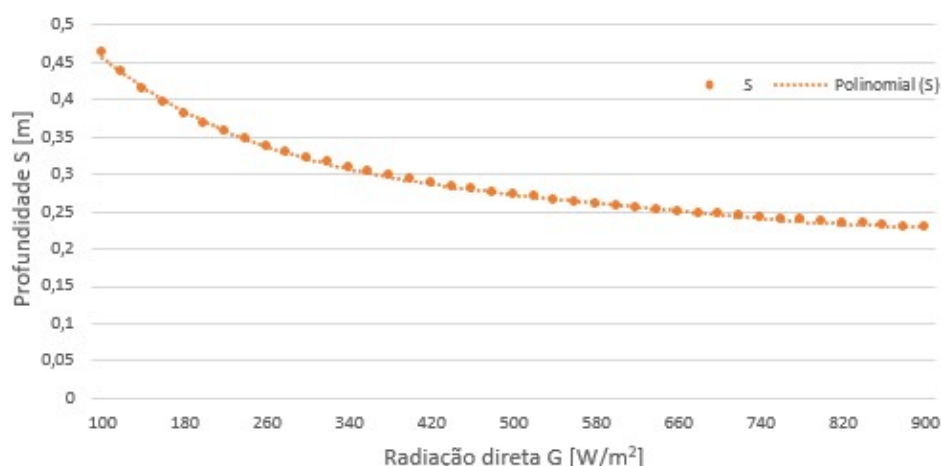


Figura 5.1 – Variação da largura da chaminé com a radiação direta.

Como visto na Figura 5.1, a profundidade do canal necessária para prover a vazão desejada decai conforme os valores de radiação solar aumentam, como esperado. Os valores se encontram dentro de uma escala razoável, sendo que em condições mais desfavoráveis de radiação solar seria necessária uma chaminé com canal de quase meio metro de profundidade. Na Seção 3.2 foi visto que, na prática, profundidades muito grandes não são desejadas, podendo ter um efeito negativo sobre o desempenho da chaminé solar ao ultrapassar um certo valor, com a possibilidade de ocorrer fluxo reverso no canal.

### 5.3 Desempenho da chaminé

Fixando um valor arbitrário para a profundidade do canal, é possível avaliar o desempenho das chaminés vertical e inclinada ao longo do ano, executando os códigos dos Apêndices B e C com os dados de radiação solar obtidos dos arquivos climáticos do INMET em formato .EPW, que é um tipo de arquivo utilizado para dados climáticos no software Energy Plus.

Como os dados horários de irradiação solar são obtidos em formato .EPW, é necessário um software capaz de acessar os dados. Portanto, foi utilizado o software Climate Consultant, que já permite a avaliação dos dados do INMET variando o ângulo de inclinação da superfície que recebe os raios solares, de forma que não foi preciso fazer o tratamento desses dados no próprio modelo. Assim, foi criada uma tabela com os valores que o software gerou para uma superfície com inclinação de 45°. Os valores de radiação de hora a hora obtidos eram para todas as horas do dia, porém, julgando que os valores no início da manhã e no fim da tarde eram muito baixos para alcançar um funcionamento relevante da chaminé solar, apenas os valores de 9 às 17h foram utilizados para prever a vazão atingida.

Criando uma nova tabela paramétrica e arbitrando uma profundidade de 0,2 m para o canal, obtém-se os valores de vazão ao longo de várias horas do dia, para todos os dias do ano. Os resultados se encontram nas Figuras 5.2 a 5.13.

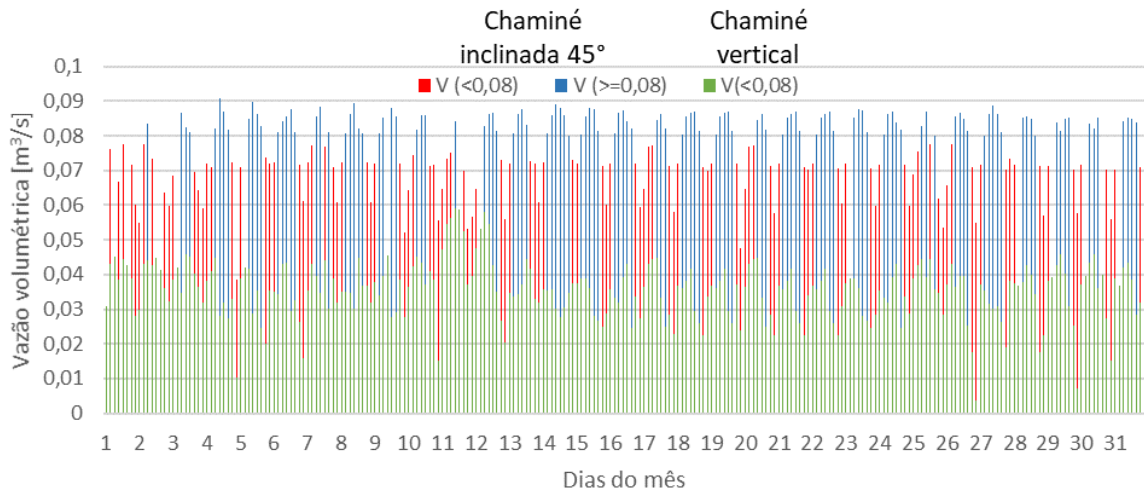


Figura 5.2 – Vazão de ar obtida de 9 às 16h ao longo de Janeiro.

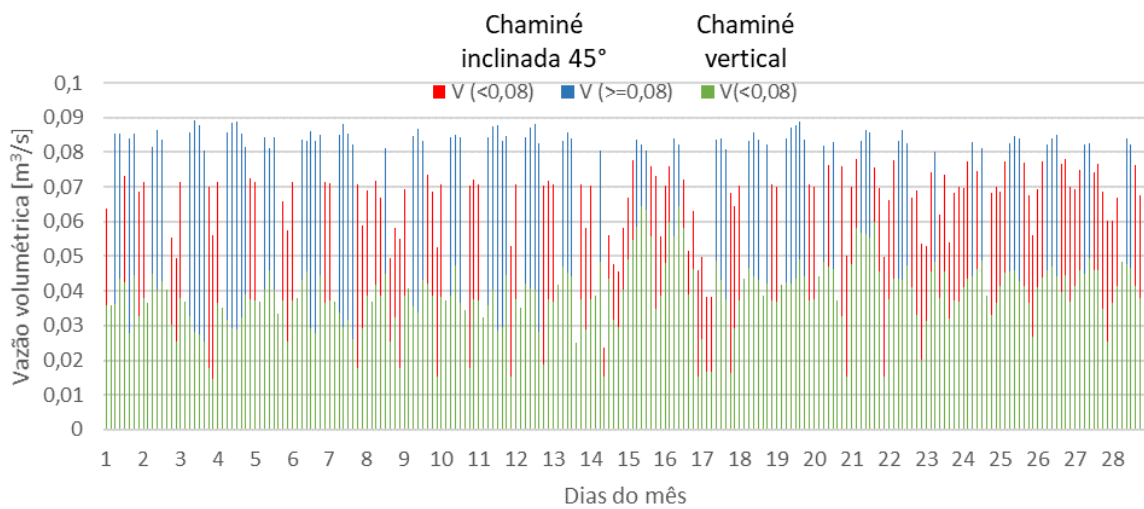


Figura 5.3 – Vazão de ar obtida de 9 às 16h ao longo de Fevereiro.

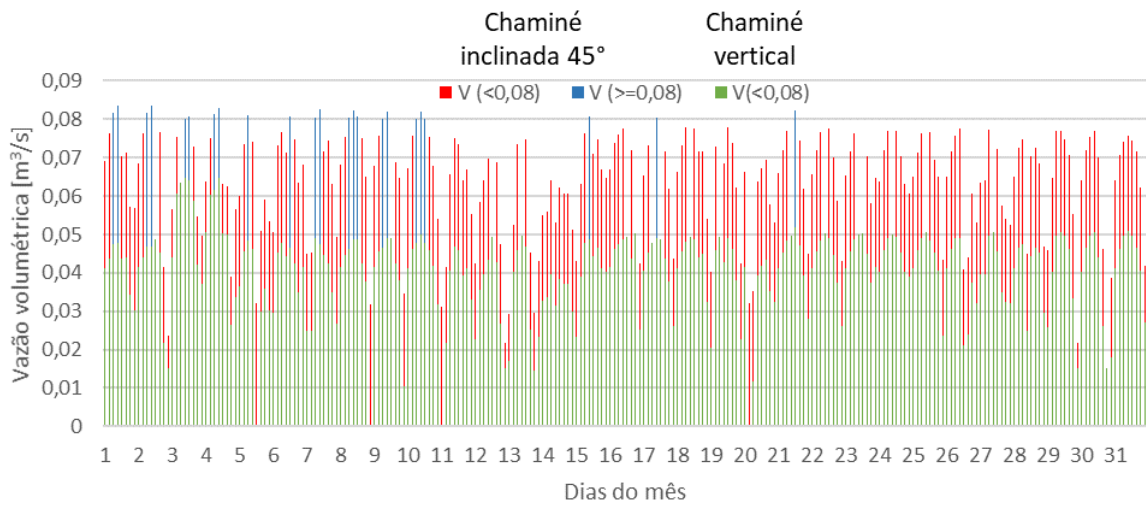


Figura 5.4 – Vazão de ar obtida de 9 às 16h ao longo de Março.

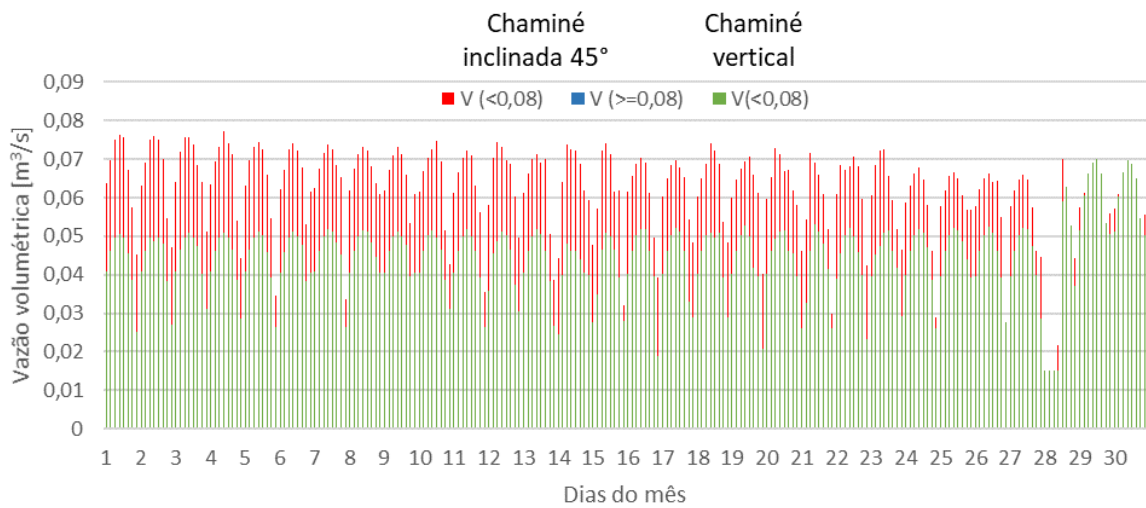


Figura 5.5 – Vazão de ar obtida de 9 às 16h ao longo de Abril.



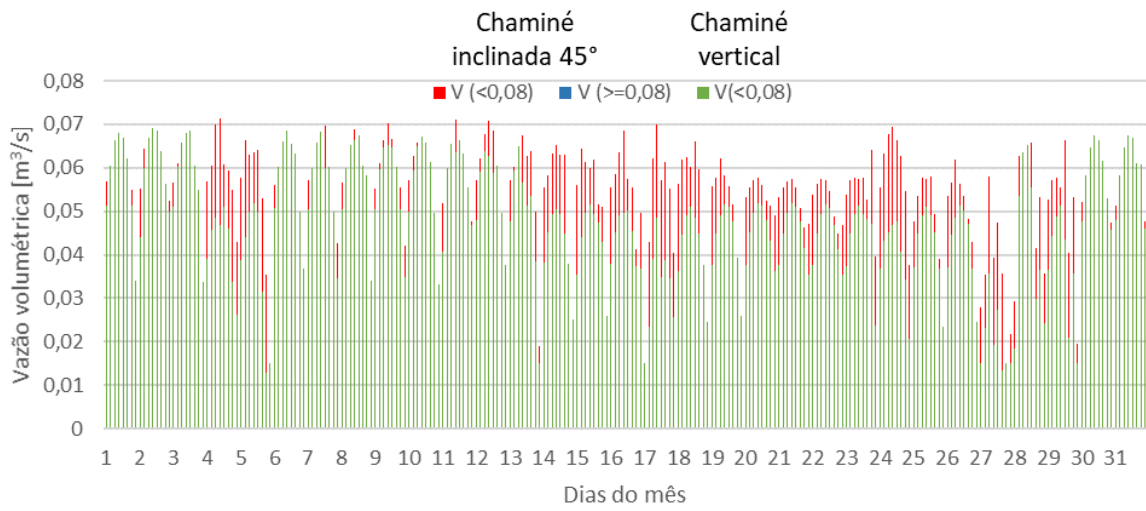


Figura 5.6 – Vazão de ar obtida de 9 às 16h ao longo de Maio.

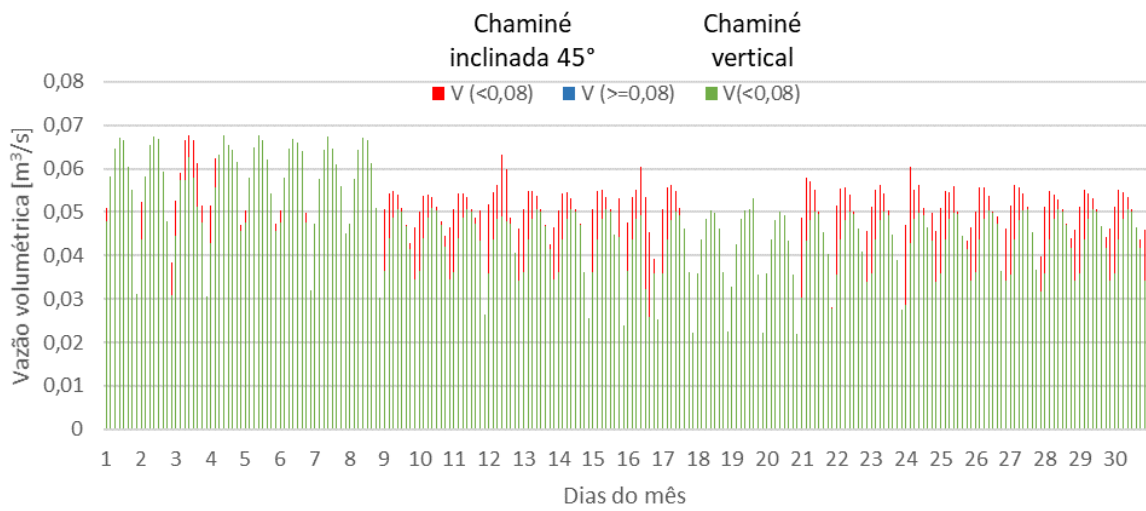


Figura 5.7 – Vazão de ar obtida de 9 às 16h ao longo de Junho.

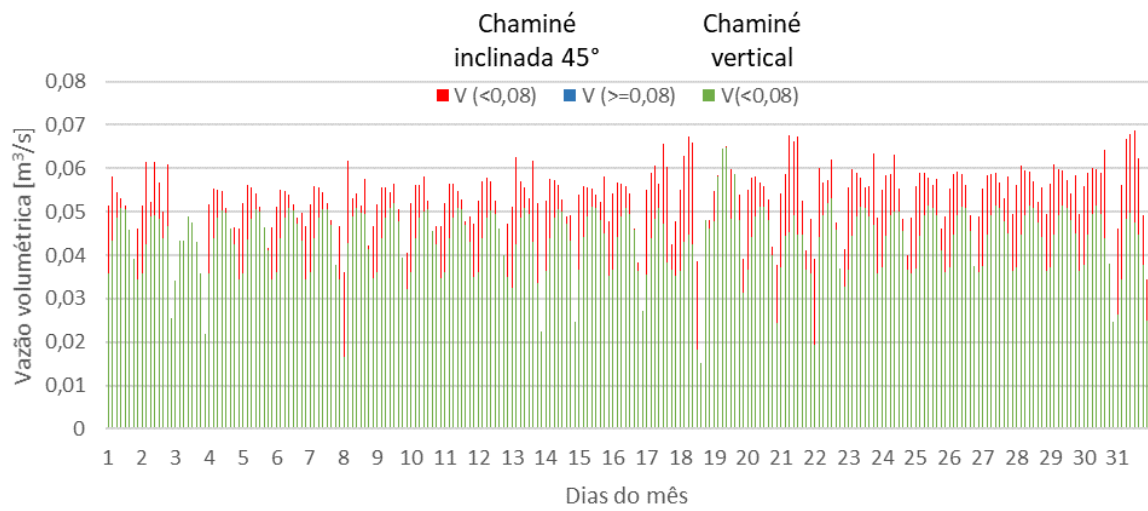


Figura 5.8 – Vazão de ar obtida de 9 às 16h ao longo de Julho.

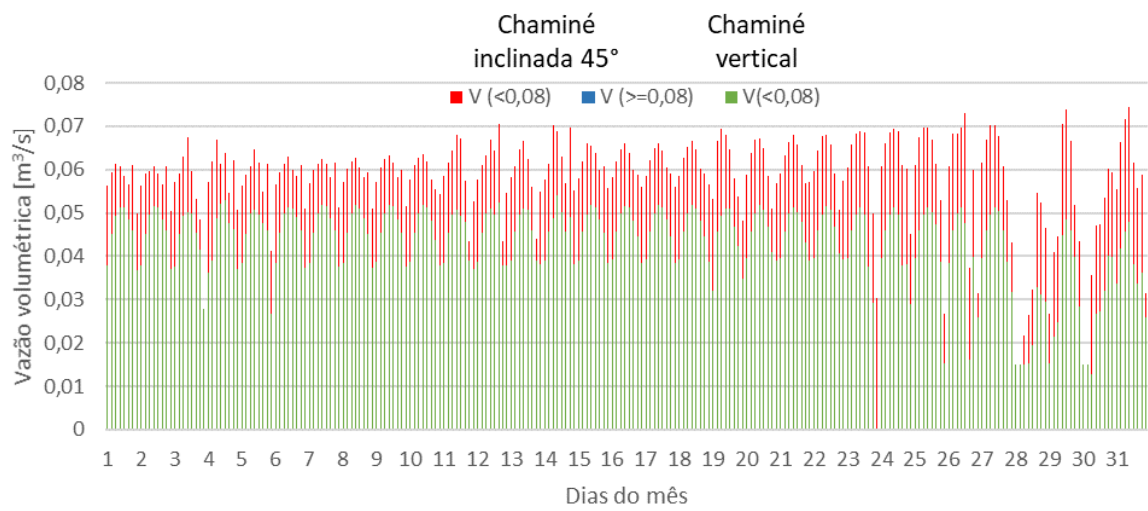


Figura 5.9 – Vazão de ar obtida de 9 às 16h ao longo de Agosto.

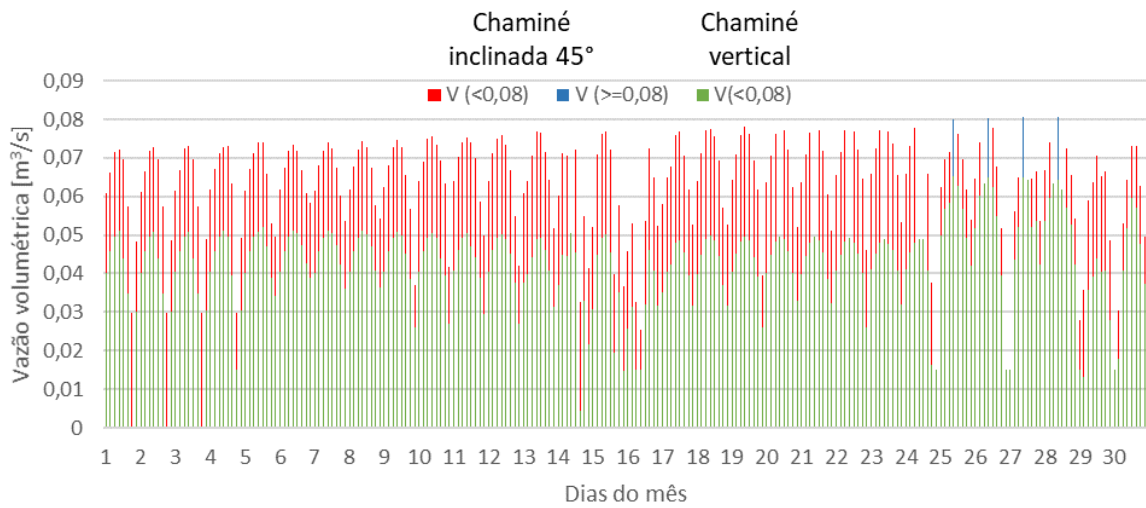


Figura 5.10 – Vazão de ar obtida de 9 às 16h ao longo de Setembro.

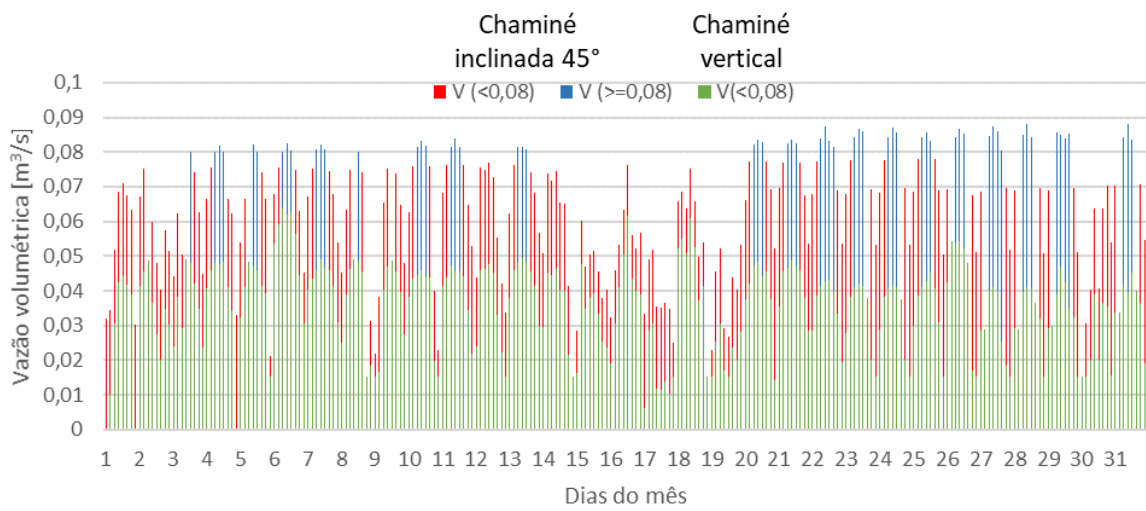


Figura 5.11 – Vazão de ar obtida de 9 às 16h ao longo de Outubro.

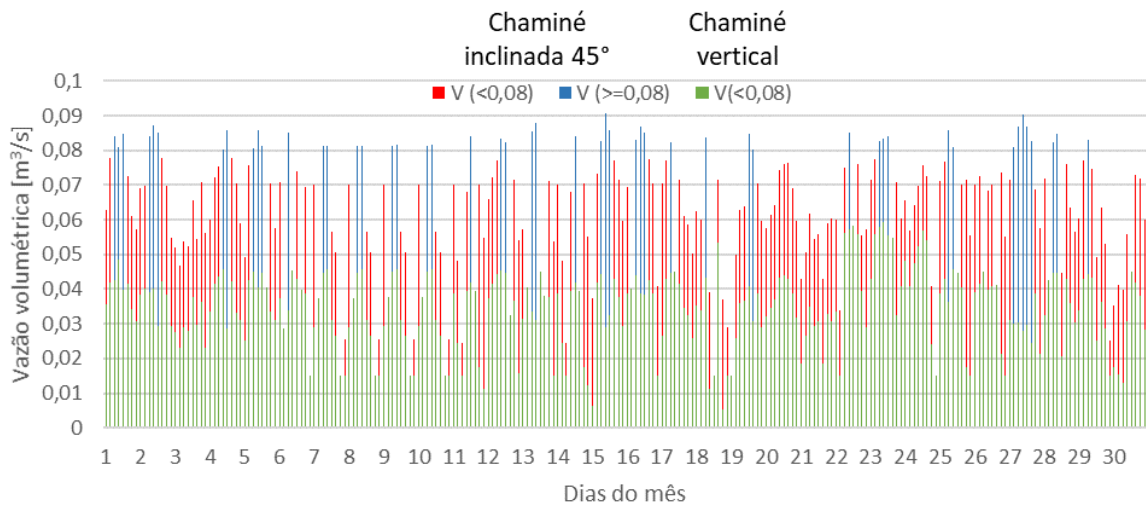


Figura 5.12 – Vazão de ar obtida de 9 às 16h ao longo de Novembro.

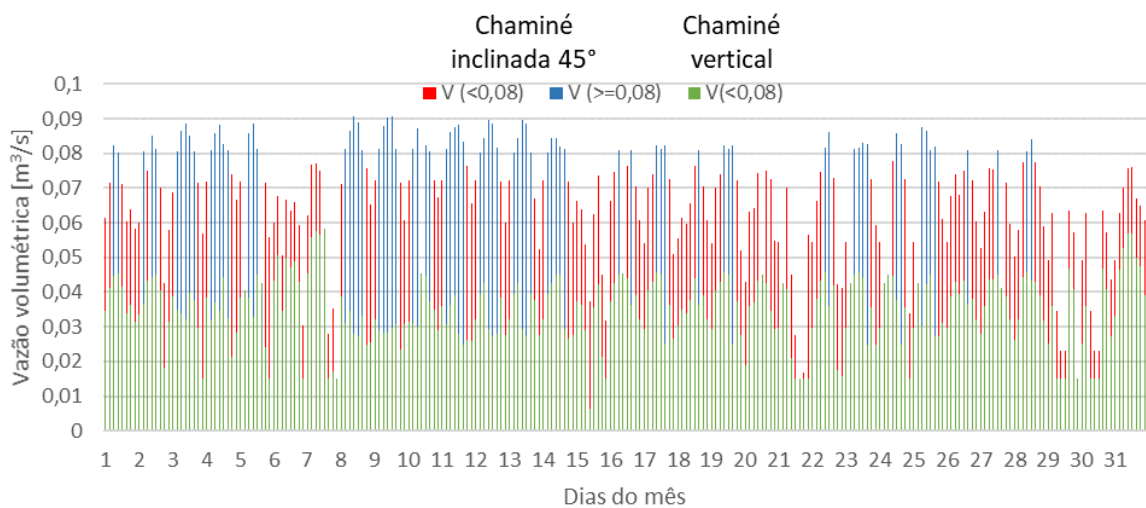


Figura 5.13 – Vazão de ar obtida de 9 às 16h ao longo de Dezembro.

Como visto nas Figuras 5.2 a 5.13, a vazão atingida pela configuração inclinada é claramente superior à configuração vertical ao longo de todo o ano, movimentando uma quantidade total de ar de  $650.610,58 \text{ m}^3$  e  $426.077,69 \text{ m}^3$ , respectivamente. Ou seja, a chaminé inclinada em  $45^\circ$  possui um desempenho aproximadamente 53% superior. Essa diferença é dada pela maior incidência de raios solares que é possível obter com uma superfície inclinada em contraste com uma superfície totalmente vertical.

Em um cenário hipotético em que se desejasse obter a vazão de ar de um edifício apenas por meio de um exaustor durante um horário das 8h às 18h, este exaustor estaria ligado durante 3650 horas do ano. A chaminé inclinada em  $45^\circ$  é capaz de suprir totalmente a vazão desejada em 15% do tempo, gerando uma vazão de ar superior a  $0,008 \text{ m}^3/\text{s}$  em 536 horas do ano. Além disso, também seria possível trabalhar com o exaustor em

potências menores mesmo nas horas em que a vazão da chaminé não fosse o suficiente por si só, diminuindo o consumo de energia consideravelmente.

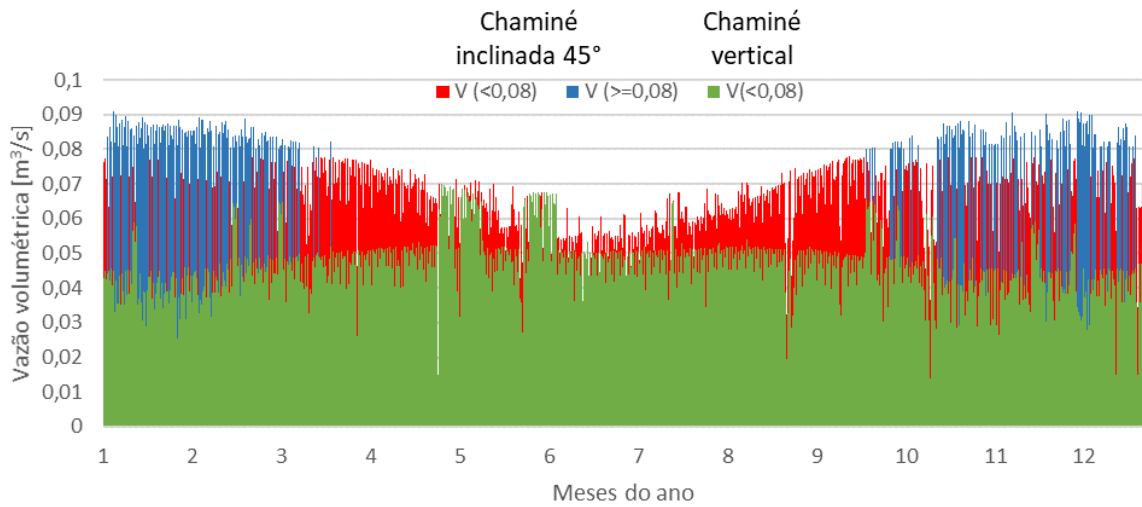


Figura 5.14 – Vazão de ar obtida de 9 às 16h ao longo do ano.

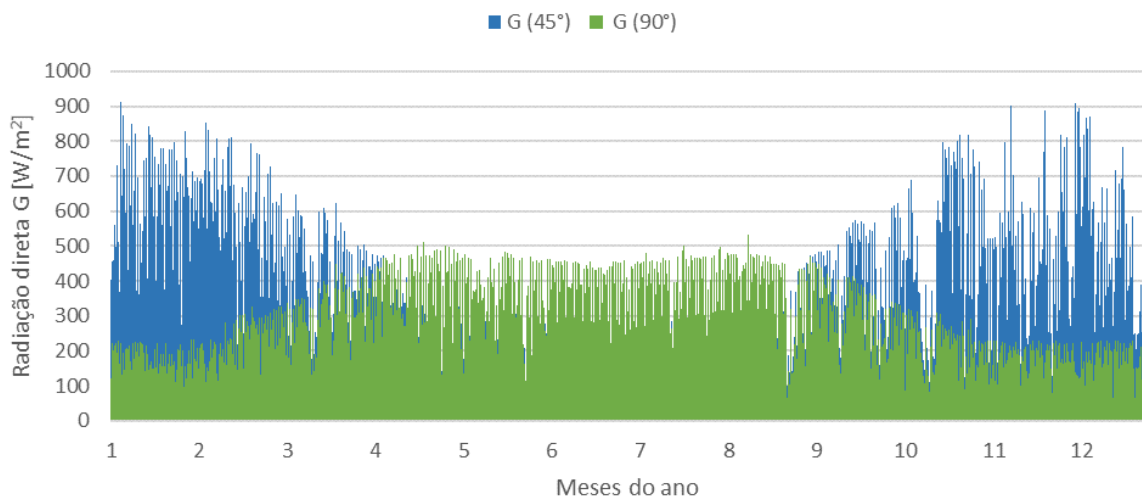


Figura 5.15 – Variação de radiação solar para superfícies inclinada e vertical ao longo do ano.

Ao comparar o gráfico da Figura 5.15 de radiação solar ao longo do ano com o gráfico da vazão de ar obtida pela chaminé mostrado na Figura 5.14, percebe-se que o desempenho da chaminé está diretamente ligado à quantidade de radiação solar recebida, sendo bem menor nos meses em que há pouca radiação.

## 6 Construção do Aparato Experimental

No projeto da chaminé solar, as paredes são construídas com painéis de MPU, que são painéis compostos de uma espuma rígida de poliuretano envolvida por superfícies de alumínio gofrado. Este material é comumente utilizado na construção de dutos em sistemas de ar condicionado e ventilação. O MPU confere uma ótima resistência estrutural e um ótimo isolamento térmico, além de ser leve e razoavelmente fácil de ser cortado nas dimensões desejadas.

O material foi adquirido em chapas de 2,0 x 1,2 m e espessura de 20 mm e posteriormente cortado manualmente nas dimensões especificadas nos desenhos que se encontram no apêndice.

As placas cortadas foram coladas com um adesivo multiuso de alta fixação e as arestas do interior do canal foram vedadas com um selante acrílico especialmente desenvolvido para a aplicação em dutos de MPU, de forma a garantir que o escoamento de ar não seja prejudicado por vazamentos mesmo com a presença de imperfeições como as rebarbas advindas do processo de corte.

O painel de vidro foi encaixado no rebaixo existente nas paredes, de forma que não pudesse ser movido lateralmente e nem cair verticalmente, além de serem fixadas 4 cantoneiras 50 x 50 mm para garantir que o vidro não poderia sair do encaixe do ressalto acidentalmente, como mostram as Figura 6.2 e 6.1.



Figura 6.1 – Rebaixo nas paredes da chaminé para encaixe do vidro.

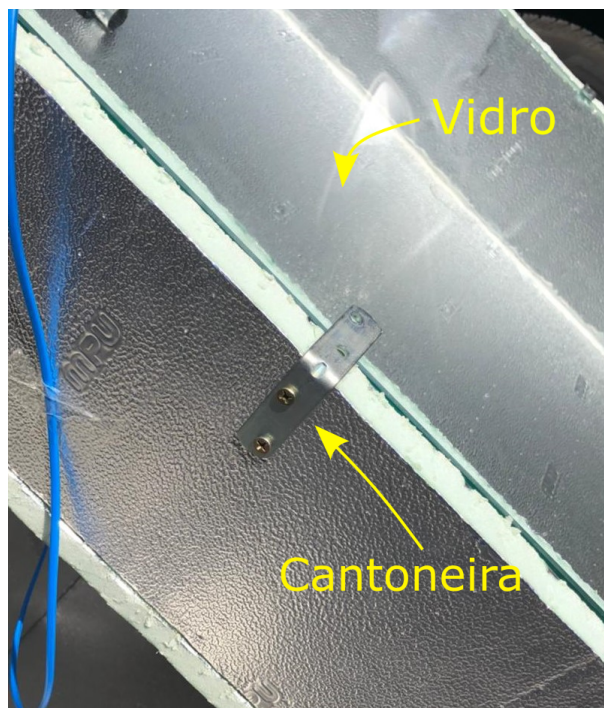


Figura 6.2 – Detalhe de uma das cantoneiras usadas para fixar a parede de vidro na montagem.

As arestas exteriores foram revestidas com fita adesiva silver tape para melhor acabamento, assim como é realizado na fabricação dos dutos de ar de MPU.

Na saída da chaminé foi conectado um outro aparato construído para fazer a redução de área da saída retangular até um tubo circular e, assim, possibilitar o cálculo da vazão de ar através da velocidade medida com um anemômetro. Esta redução de área foi construída em papelão, com a seção circular de um tubo de PVC de 75 mm de diâmetro.

O suporte da estrutura foi construído com sobras das chapas de MPU, unindo-se a chapa de suporte à chapa da parede exterior da chaminé com três dobradiças que permitem o ajuste do ângulo do suporte, como mostra a Figura 6.3, de forma que a chaminé pode ser apoiada verticalmente no seu ângulo de 90° ou apoiada no suporte ficando em um ângulo de 45°.



Figura 6.3 – Dobradiças do suporte da chaminé solar



# 7 Instrumentação

## 7.1 Medição de temperatura

A coleta de dados das temperaturas foi feita em cinco pontos, sendo três para a medição da temperatura do ar e dois para a medição da temperatura de superfícies:

- Um ponto na superfície da parede absorvedora;
- Um ponto na superfície da cobertura de vidro;
- Um ponto a uma distância média entre a parede absorvedora e o vidro na entrada da chaminé;
- Um ponto a uma distância média entre a parede absorvedora e o vidro em um ponto médio ao longo do comprimento da chaminé;
- Um ponto a uma distância média entre a parede absorvedora e o vidro na saída da chaminé.

As aferições das temperaturas nos pontos de interesse foram realizadas com o auxílio de termopares de tipo T, que são compostos pelos materiais cobre e Constantan e possuem sua faixa de operação de  $-200^{\circ} C$  a  $400^{\circ} C$ . Os dados foram obtidos através de cinco Nanoshields para termopar, que são módulos universais para medição de temperatura com termopares. Esses módulos utilizam o chip MAX 31856, que realiza a amplificação da tensão em milivolts gerada pelos termopares e também a conversão para graus Celsius, de forma que os dados de saída já são entregues em formato de temperatura. Os Nanoshields são conectados à uma Base Board que suporta a conexão de até seis módulos e, então, essa Base Board é acoplada à placa de aquisição Arduino Duemilanove.

A calibração dos termopares foi feita com o banho termostático do equipamento Julabo F25 localizado no Laboratório de Termociência e Metrologia Dinâmica da Faculdade de Tecnologia na UnB. O processo foi realizado conforme as recomendações da norma NBR 13770 sobre calibração de termopar por comparação com termorresistência de referência. O detalhamento do procedimento de calibração se encontra no Apêndice F.

## 7.2 Medição de radiação solar

As medidas de radiação solar foram tomadas com auxílio do piranômetro SPN1 da fabricante Delta T, que mede a radiação global e a radiação difusa em um dado local. O

equipamento permite que os dados sejam registrados com a saída analógica utilizando um Data Logger ou com a saída serial diretamente para um arquivo de texto em um computador. Ressalta-se a necessidade da utilização de um cabo adaptador da conexão RS-232 do equipamento para a entrada USB do computador, instalando o driver CH341SER disponibilizado no Apêndice E para que a comunicação entre o piranômetro e o computador seja realizada. Assim, utilizando o software da fabricante, os valores de radiação solar foram registrados a cada minuto, de forma que o aparecimento de nuvens ocasionais não prejudicassem as medidas realizadas.

Conforme recomendações da fabricante, o instrumento foi instalado na mesma inclinação que a chaminé solar, para que ele registre exatamente a mesma radiação que a chaminé recebe, como indica a Figura 7.1.

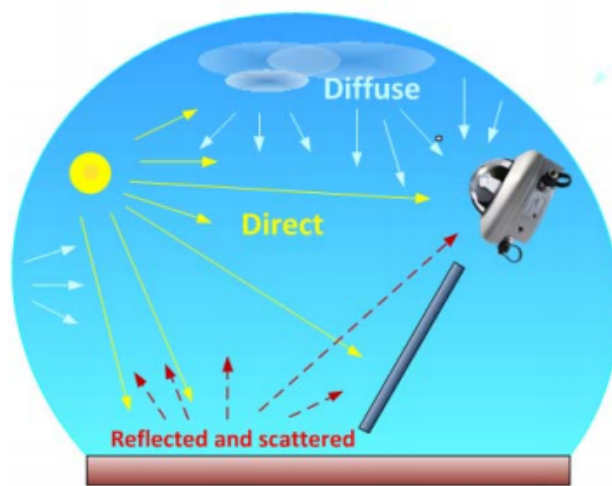


Figura 7.1 – Indicação da radiação recebida pelo piranômetro.  
Fonte: SPN1 Technical Fact Sheet (2014).

O piranômetro foi montado utilizando o suporte horizontal incluso no equipamento, acoplado a um mastro usado como suporte vertical. A montagem do piranômetro ao lado da chaminé solar pode ser vista na Figura 7.2.

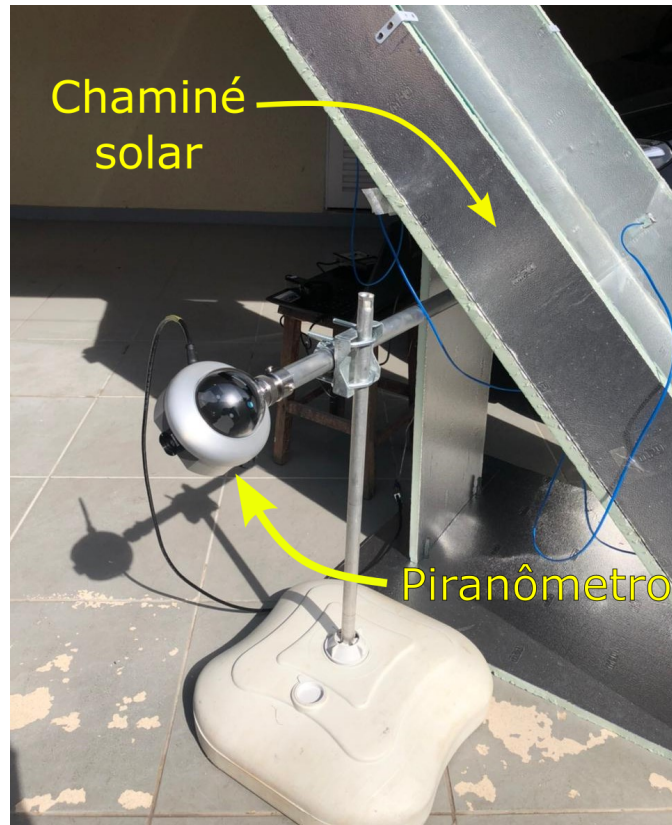


Figura 7.2 – Montagem do piranômetro na mesma inclinação da chaminé solar.

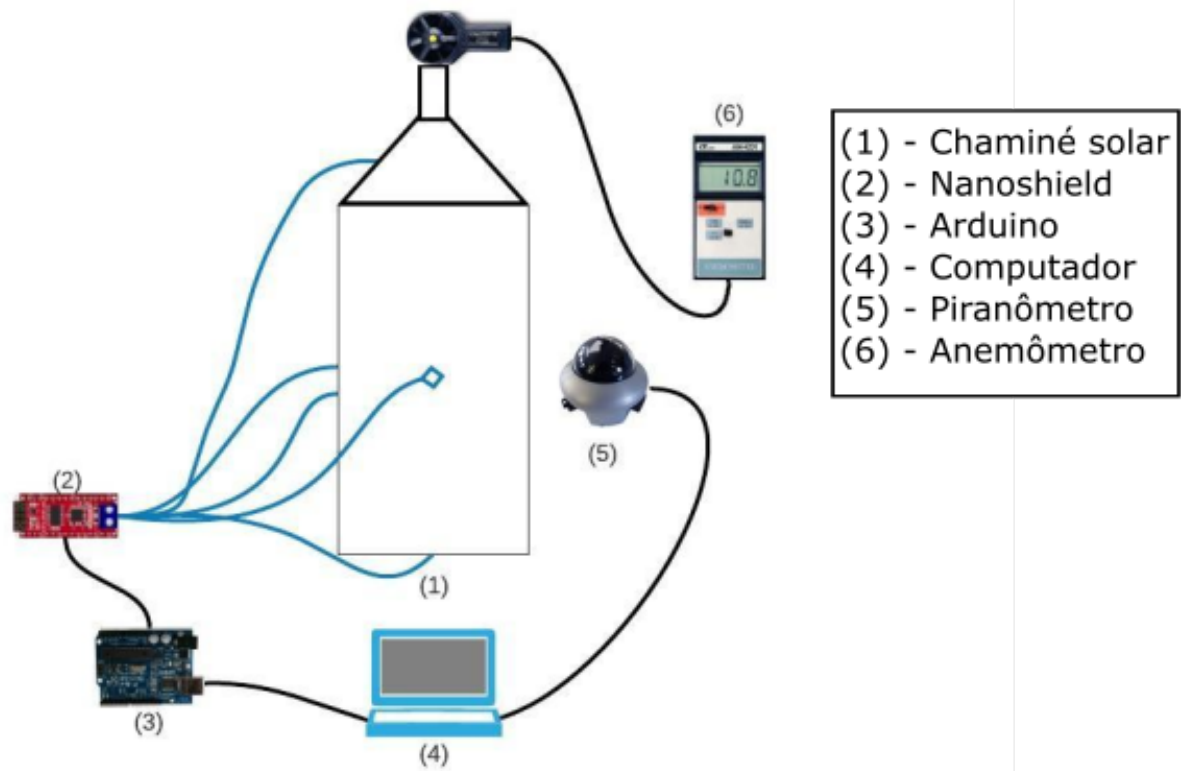
### 7.3 Medição de vazão do ar

A vazão de ar será obtida medindo a velocidade do ar que passa através de uma seção de área conhecida. Essa velocidade será medida com o uso do anemômetro de hélice de modelo AM-4201 da fabricante Lutron, devidamente calibrado. Este instrumento não possui saídas analógicas ou digitais e nenhum outro meio de registro dos dados, tornando necessária a anotação manual de cada medição. Levando isto em consideração, optou-se por registrar as velocidades obtidas com um intervalo de 5 minutos entre cada medição, considerando o período extensivo de horas que cada dia de teste da chaminé solar levaria. O modelo do anemômetro utilizado pode ser visto da Figura 7.3.



Figura 7.3 – Anemômetro de turbina Lutron AM-4201.

Toda a instrumentação utilizada na aquisição de dados deste trabalho pode ser vista no diagrama da Figura 7.4, onde os cinco termopares na chaminé solar (1) são conectados aos módulos Nanoshield de aquisição de temperatura (2). Estes módulos são conectados ao Arduino Duemilanove, que realiza a transferência de dados para o computador (1), que registra os dados coletados. O piranômetro (5) montado ao lado da chaminé também é conectado a uma porta serial do computador, que realiza o registro das medidas de radiação solar. A velocidade do ar é medida no topo da chaminé através da turbina do anemômetro (6).



- (1) - Chaminé solar
- (2) - Nanoshield
- (3) - Arduino
- (4) - Computador
- (5) - Piranômetro
- (6) - Anemômetro

Figura 7.4 – Diagrama do aparato experimental.

A montagem final da chaminé solar pronta para o funcionamento pode ser vista na Figura 7.5

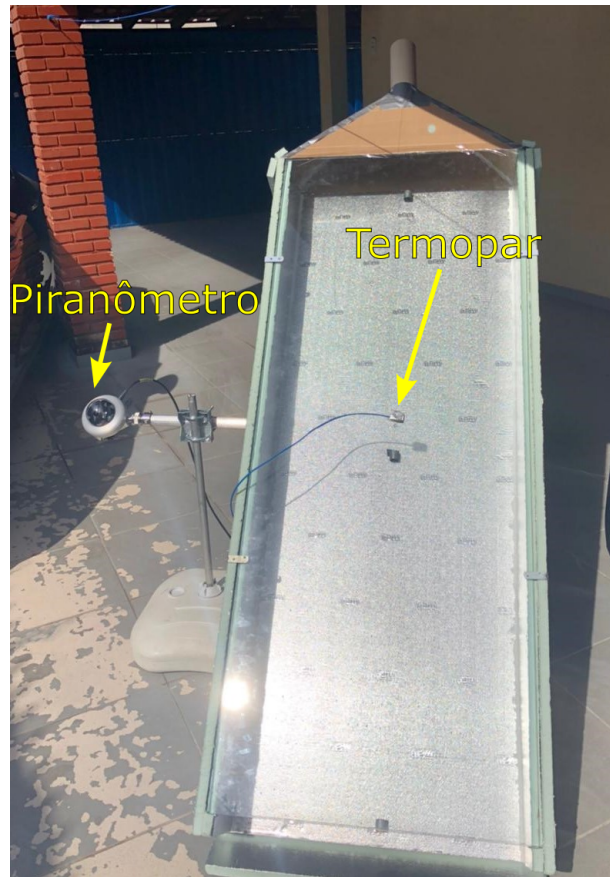


Figura 7.5 – Montagem da chaminé solar.

# 8 Resultados e Análise

## 8.1 Medidas de temperatura

As temperaturas de cada ponto descrito na Seção 7.1 foram medidas e registradas de minuto a minuto, posteriormente sendo utilizadas para calcular a média de temperaturas a cada cinco minutos. As temperaturas foram corrigidas pela curva de calibração dos respectivos termopares utilizados para cada medição. Foram realizados 4 testes em dias distintos com a duração de aproximadamente 3 horas, nos horários entre 9h e 13h.

As medidas de temperatura variaram como o esperado de acordo com o que se calculou no modelo matemático, tendo a temperatura da parede como sendo a mais alta, seguida pela temperatura do ar na saída e a temperatura do ar medida no meio da chaminé. As Figuras 8.1, 8.2, 8.3 e 8.4 mostram como as temperaturas em cada ponto variaram ao longo dos testes.

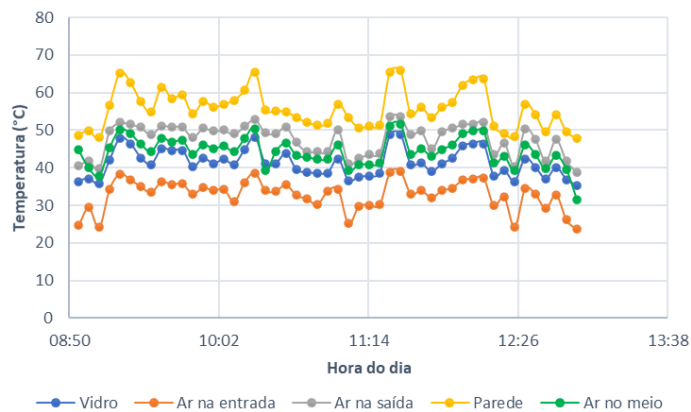


Figura 8.1 – Variação das temperaturas ao longo do Teste 1.

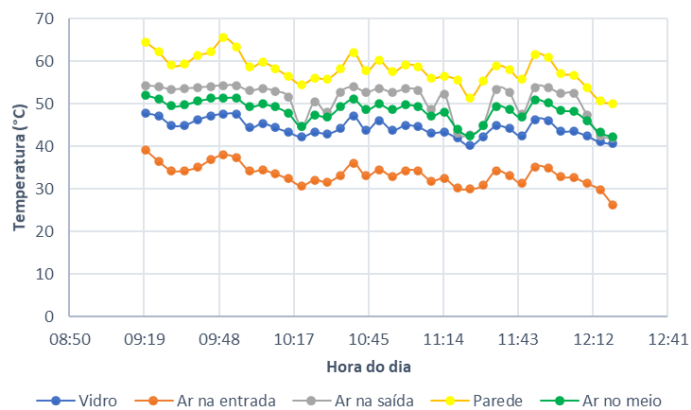


Figura 8.2 – Variação das temperaturas ao longo do Teste 2.

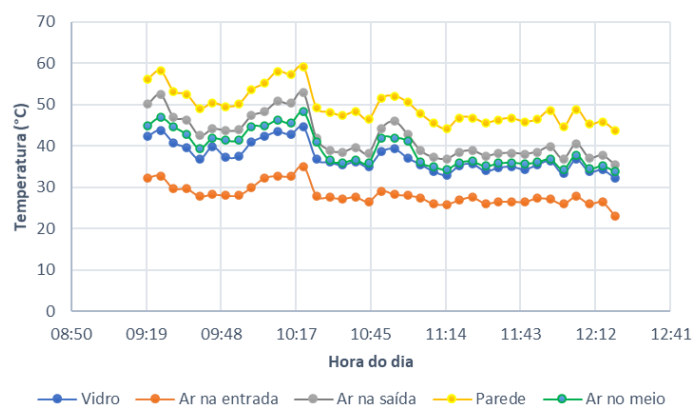


Figura 8.3 – Variação das temperaturas ao longo do Teste 3.

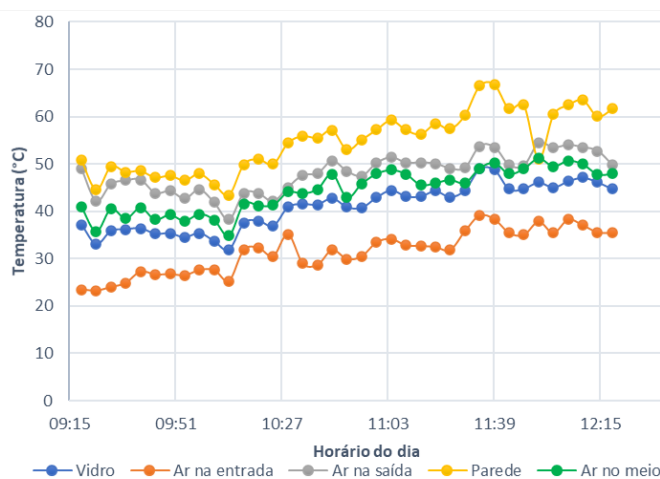


Figura 8.4 – Variação das temperaturas ao longo do Teste 4.

Como visto nas Figuras 8.1, 8.2, 8.3 e 8.4, as temperaturas variam conforme o esperado de um experimento cujas medidas possuem grande dependência de condições climáticas variáveis, como a presença de nuvens e passagens de vento aleatórias.

Foi possível também observar uma dependência das temperaturas obtidas com a incidência de radiação solar medida pelo piranômetro, como mostram as Figuras 8.5, 8.6, 8.7 e 8.8.



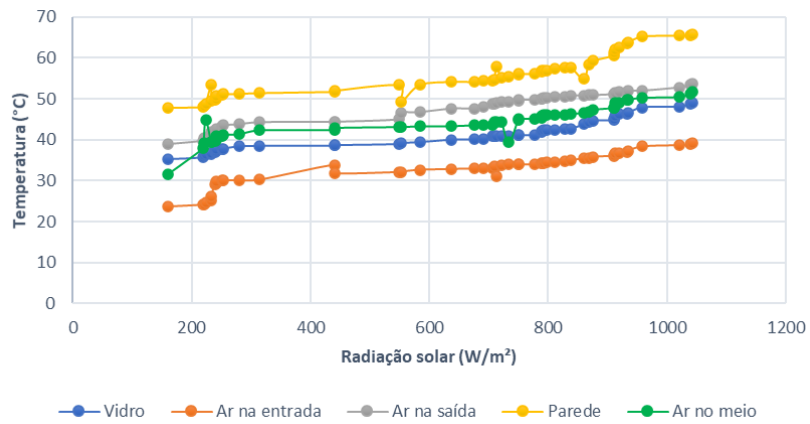


Figura 8.5 – Variação das temperaturas com a radiação solar incidente no Teste 1.

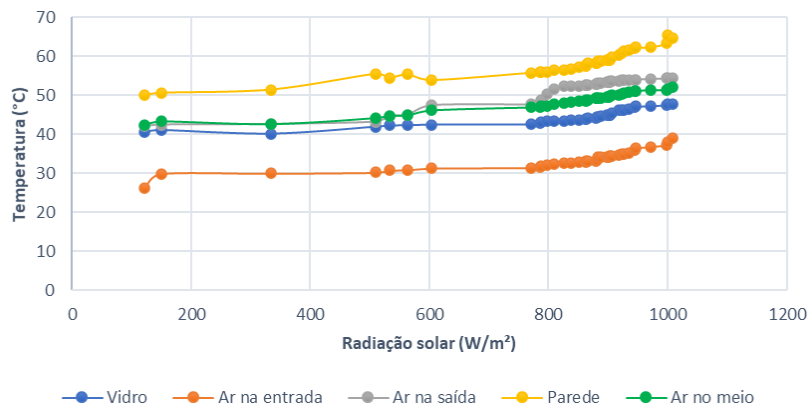


Figura 8.6 – Variação das temperaturas com a radiação solar incidente no Teste 2.

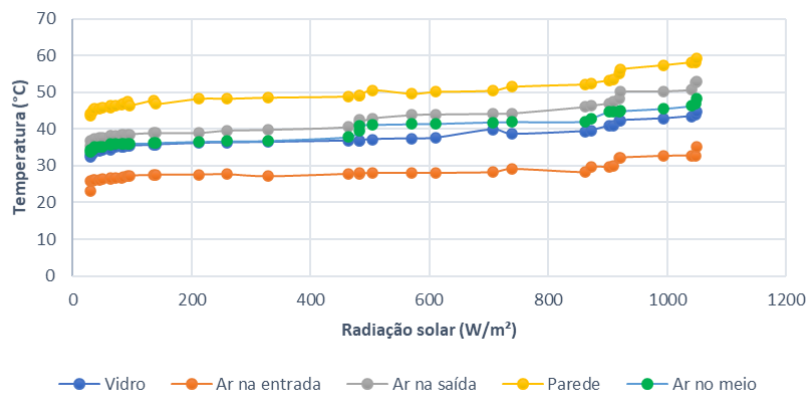


Figura 8.7 – Variação das temperaturas com a radiação solar incidente no Teste 3.

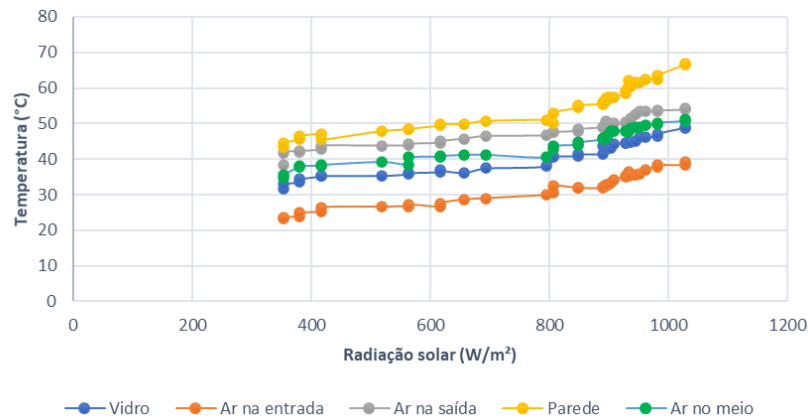


Figura 8.8 – Variação das temperaturas com a radiação solar incidente no Teste 4.

É importante ressaltar que devido às dificuldades atribuídas ao orçamento disponível para a construção do projeto, poucos termopares puderam ser utilizados para as medições e, portanto, a uniformidade das temperaturas ao longo da chaminé não pode ser garantida. Para tentar remediar este problema, foi utilizada a câmera termográfica FLIR E40 para visualizar a distribuição de temperatura ao longo da largura da parede. A Figura 8.9 mostra que a temperatura é mantida uniforme ao longo da largura da chaminé, provavelmente devido à alta condutibilidade térmica da superfície de alumínio.

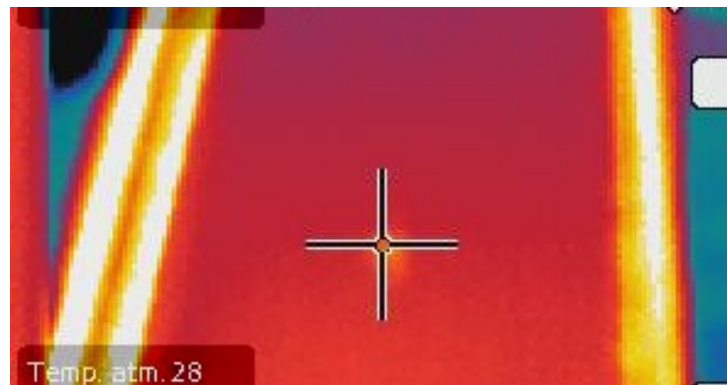


Figura 8.9 – Visão infravermelha da parede interna da chaminé.

## 8.2 Medidas de vazão do ar

Os valores de vazão de ar atingidos foram registrados manualmente a cada 5 minutos ao longo de cada um dos dias de medições. A Figura 8.10 mostra como os valores variaram com a radiação solar em cada teste.

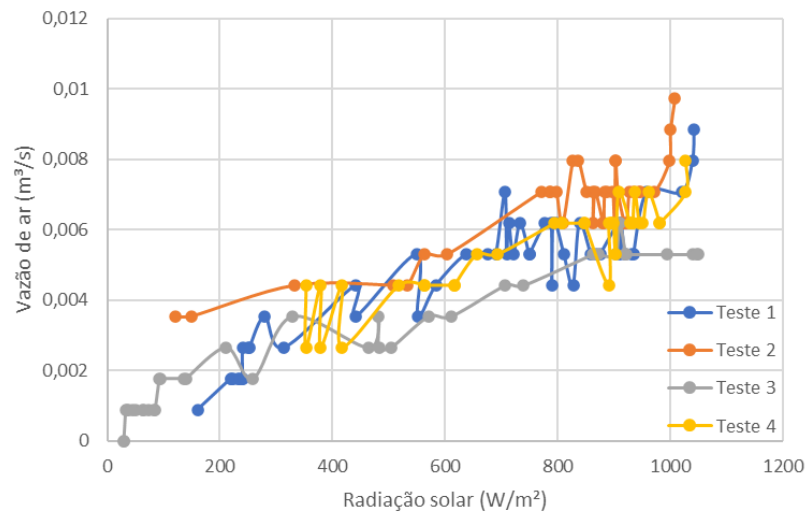


Figura 8.10 – Efeito da radiação solar incidente na vazão de ar obtida.

Como esperado, o comportamento geral da variação da vazão de ar é crescente conforme a radiação solar incidente aumenta, atingindo um valor médio de aproximadamente  $0,009 \text{ m}^3/\text{s}$ , ou  $32,4 \text{ m}^3/\text{h}$ , valor um pouco superior à taxa de renovação de ar mínima por pessoa determinada pela Resolução N<sup>o</sup> 09 de 16 de Janeiro de 2003 da ANVISA. Nota-se que as curvas possuem mudanças abruptas nos valores, efeito que se dá devido à resolução de  $0,1 \text{ m/s}$  do anemômetro utilizado e os valores de velocidade do ar medidos também serem baixos, fazendo com que qualquer mudança na medição se traduza em uma mudança abrupta no valor.

### 8.3 Comparações entre valores teóricos e medições

Utilizando o modelo matemático proposto no Capítulo 4 foi possível calcular os valores teóricos esperados para as medições, como é mostrado nas Figuras 8.11, 8.12, 8.13.

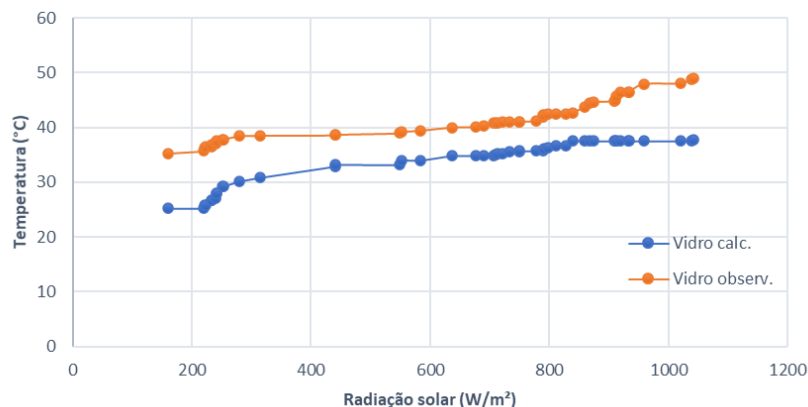


Figura 8.11 – Efeito da radiação solar incidente no vidro.

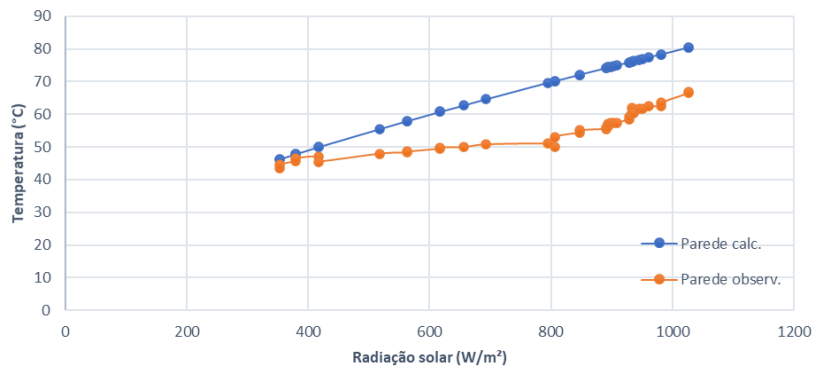


Figura 8.12 – Efeito da radiação solar incidente na parede absorvedora.

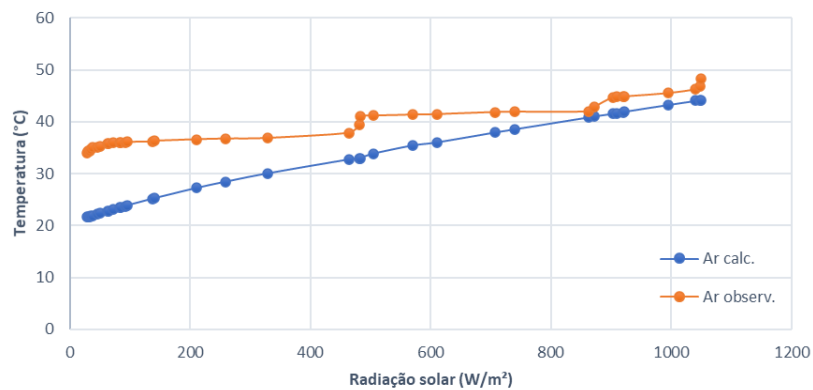


Figura 8.13 – Efeito da radiação solar incidente no ar.

As Figuras 8.11 e 8.12 demonstram que o modelo tende a superestimar as temperaturas medidas experimentalmente, principalmente no caso das temperaturas da parede absorvedora. Isso pode ser devido ao fato de ter sido desprezado o calor transferido por condução no equacionamento do modelo teórico, por ter sido utilizado um material isolante térmico como o MPU. As temperaturas calculadas teoricamente também podem ser mais altas do que os valores medidos experimentalmente devido ao fato de que a superfície utilizada como placa absorvedora foi sendo uma camada extremamente fina de alumínio, perdendo calor rapidamente para a espuma de poliuretano interna.

Na Figura 8.13, no entanto, é visto o efeito contrário, onde a temperatura do ar observada experimentalmente é maior do que o que se esperava. Isso possivelmente é causado pelo modo como foi feita a montagem do termopar para medição, como mostra a Figura 8.14. Pensava-se que o cilindro de aço utilizado para isolar o termopar da radiação solar seria o suficiente para evitar interferências nas medições, porém, a medição da temperatura do ar parece ter sido afetada, não condizendo com o que seria observado no resto do ar no interior da chaminé.

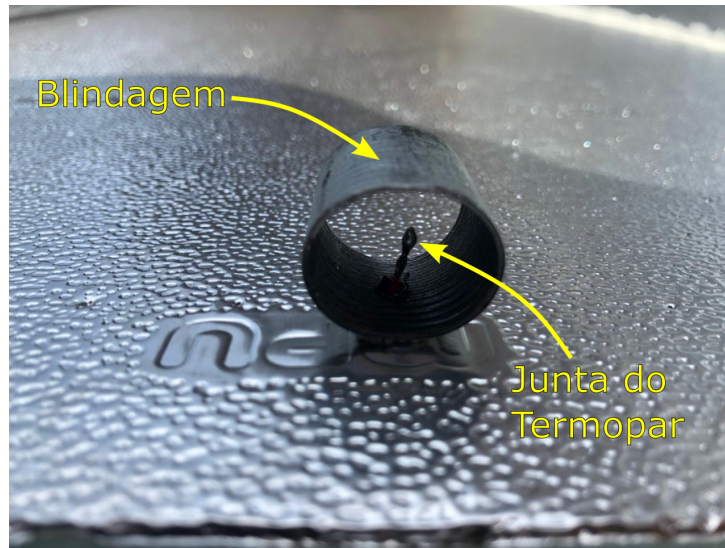


Figura 8.14 – Montagem do termopar para medição da temperatura do ar.

Além das temperaturas, também é possível comparar os valores de vazão de ar obtidos no modelo teórico e nas medições experimentais. Como mostra a Figura 8.15, os valores calculados diferem do observado. Essa diferença pode ser devido à perda de carga que a superfície rugosa do alumínio gofrado no interior da chaminé proporciona, bem como a perda de carga devido à redução de área utilizada para possibilitar a medição da vazão de ar. Essa redução de área pode ter restringido o fluxo de ar ao ponto de criar um campo de pressão adverso que pode vir a causar uma reversão no fluxo da chaminé. O problema da reversão de fluxo é conhecido e relatado em diversos estudos, como os estudos de CHEN et al. (2003), JING et al. (2015) e LIU et al. (2015). O estudo de IMRAN et al. (2015) também reporta a presença de reversão no fluxo da chaminé quando a distância entre a parede absorvedora e a cobertura de vidro passam de um certo valor, observando o efeito em uma distância de 150 mm, assim como a utilizada neste trabalho. RAGHIB et al. (2017) também atribui a discrepância entre valores teóricos e experimentais a uma possível reversão de fluxo do ar.

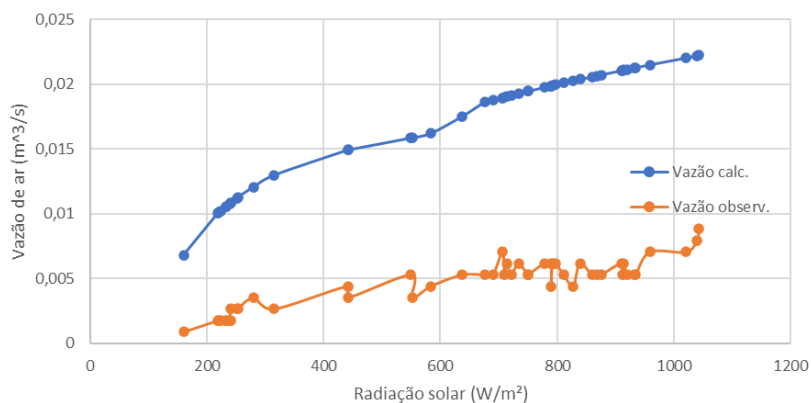


Figura 8.15 – Efeito da radiação solar incidente na vazão de ar no Teste 1.

Por fim, na Figura 8.16 nota-se a relação direta entre a variação da vazão de ar medida e o aumento da temperatura do ar proporcionado pelo aumento da radiação solar incidente.

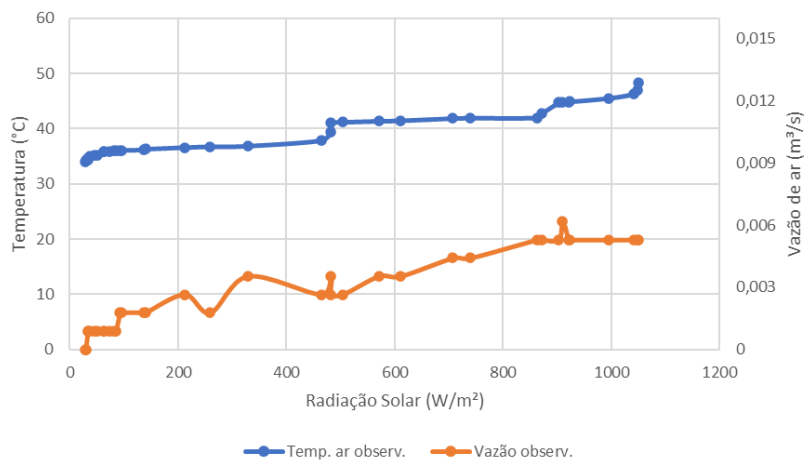


Figura 8.16 – Variações na vazão e na temperatura do ar no Teste 3.

## 9 Conclusão

Chaminés solares são uma das alternativas da utilização de energia renovável mais facilmente implementáveis em um ambiente, podendo ser utilizadas para melhorar a qualidade do ar ou o conforto térmico. Desta forma, estudos acerca de seu comportamento em dadas condições climáticas sempre pode beneficiar possíveis projetos para a sua implementação.

Neste projeto, foi apresentado um modelo matemático para tentar prever teoricamente o desempenho de uma chaminé solar em termos da vazão de ar obtida. Para verificar a validade do modelo matemático, um aparato experimental foi construído com uma chaminé de 1,6 m de altura, 0,6 m de largura e 0,15 m de distância entre a parede absorvedora e a cobertura de vidro. Foram realizados testes para comparar os resultados teóricos com os experimentais. Foi observado que o modelo teórico consegue prever em parte o comportamento da chaminé, embora tenda a superestimar os valores de vazão de ar obtidos. Esta discrepância pode ser devido a limitações do aparato experimental, como a necessidade de se usar a redução de área para possibilitar a medida da vazão de ar, bem como devido a um fluxo reverso de ar, um problema comum relatado em outros estudos que leva a vazão de ar medida a ser menor que a esperada.

Assim, um ponto que pode ser melhorado no projeto é a instrumentação utilizada, como por exemplo a substituição do anemômetro de turbina por anemômetros de fio quente em mais de um ponto da saída de ar, de forma que não seja necessária uma obstrução como a redução de área que prejudica a vazão obtida. Outro ponto passível de melhora é a diminuição da distância entre a parede absorvedora e o vidro, parâmetro que pode prejudicar o desempenho da chaminé quando aumentado além de um certo tamanho.

Conclui-se que o projeto cumpriu o seu objetivo de propor um modelo matemático e um estudo experimental para avaliação do desempenho de uma chaminé solar, porém ressalta-se a necessidade de melhorias no futuro para avaliar melhor a razão das discrepâncias observadas nos resultados.

# Referências

- ANDERSEN, K. T. *Theoretical considerations on natural ventilation by thermal buoyancy*. [S.l.], 1995.
- AZEVEDO, L.; SPARROW, E. Natural convection in open-ended inclined channels. 1985.
- BANSAL, N. et al. Modeling of window-sized solar chimneys for ventilation. *Building and Environment*, Elsevier, v. 40, n. 10, p. 1302–1308, 2005.
- BANSAL, N.; MATHUR, R.; BHANDARI, M. Solar chimney for enhanced stack ventilation. *Building and environment*, Elsevier, v. 28, n. 3, p. 373–377, 1993.
- BASSIOUNY, R.; KOURA, N. S. An analytical and numerical study of solar chimney use for room natural ventilation. *Energy and buildings*, Elsevier, v. 40, n. 5, p. 865–873, 2008.
- BOUCHAIR, A. Solar chimney for promoting cooling ventilation in southern algeria. *Building Services Engineering Research and Technology*, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 15, n. 2, p. 81–93, 1994.
- CHEN, Z. D. et al. An experimental investigation of a solar chimney model with uniform wall heat flux. *Building and Environment*, Elsevier, v. 38, n. 7, p. 893–906, 2003.
- DING, W.; HASEMI, Y.; YAMADA, T. Natural ventilation performance of a double-skin façade with a solar chimney. *Energy and Buildings*, Elsevier, v. 37, n. 4, p. 411–418, 2005.
- ENERGIA, A. I. de. *Air conditioning use emerges as one of the key drivers of global electricity-demand growth*. 2018. Disponível em: <<https://www.iea.org/news/air-conditioning-use-emerges-as-one-of-the-key-drivers-of-global-electricity-demand-growth>>.
- GAN, G. A parametric study of trombe walls for passive cooling of buildings. *Energy and buildings*, Lausanne: Elsevier Sequoia SA, 1977-, v. 27, n. 1, p. 37–44, 1998.
- HALLDORSSON, J. et al. Experimental and theoretical studies of a solar chimney with uniform heat flux. In: *The 8th International Conference on Air Distribution in Rooms, Copenhagen, Denmark*. [S.l.: s.n.], 2002. p. 597–600.
- IMRAN, A. A.; JALIL, J. M.; AHMED, S. T. Induced flow for ventilation and cooling by a solar chimney. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 78, p. 236–244, 2015.
- INCROPERA, F. P. et al. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 7. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. ISBN 9780470501979.
- JING, H.; CHEN, Z.; LI, A. Experimental study of the prediction of the ventilation flow rate through solar chimney with large gap-to-height ratios. *Building and Environment*, Elsevier, v. 89, p. 150–159, 2015.
- LEE, D.-S. et al. Experimental investigations on solar chimney for optimal heat collection to be utilized in organic rankine cycle. *Applied Energy*, Elsevier, v. 154, p. 651–662, 2015.
- LEE, K. H.; STRAND, R. K. Enhancement of natural ventilation in buildings using a thermal chimney. *Energy and Buildings*, Elsevier, v. 41, n. 6, p. 615–621, 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*, ARCHITECTURAL INSTITUTE OF JAPAN (AIJ), ARCHITECTURAL INSTITUTE OF KOREA . . . , v. 3, n. 2, p. 233–238, 2004.
- LIPING, W.; ANGUI, L. A numerical study of vertical solar chimney for enhancing stack ventilation in buildings. In: *Plea2004-The 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture Eindhoven Netherlands*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 1–5.
- LIPING, W.; ANGUI, L. A numerical study of trombe wall for enhancing stack ventilation in buildings. In: *The 23rd conference on passive and low energy architecture, Geneva, Switzerland*. [S.l.: s.n.], 2006.
- LIU, B. et al. Experimental study of the chimney effect in a solar hybrid double wall. *Solar Energy*, Elsevier, v. 115, p. 1–9, 2015.
- MANCA, O. et al. Numerical investigation of thermal and fluid dynamic behavior of solar chimney building systems. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, v. 49, n. 1, p. 106–116, 2014.
- MATHUR, J. et al. Experimental investigations on solar chimney for room ventilation. *Solar Energy*, Elsevier, v. 80, n. 8, p. 927–935, 2006.
- MATHUR, J.; MATHUR, S. et al. Summer-performance of inclined roof solar chimney for natural ventilation. *Energy and Buildings*, Elsevier, v. 38, n. 10, p. 1156–1163, 2006.
- MIYAZAKI, T.; AKISAWA, A.; KASHIWAGI, T. The effects of solar chimneys on thermal load mitigation of office buildings under the japanese climate. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 31, n. 7, p. 987–1010, 2006.
- MOGHADDAM, E. H.; AMINDELDA, S.; BESHARATIZADEH, A. New approach to natural ventilation in public buildings inspired by iranian’s traditional windcatcher. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 21, p. 42–52, 2011.
- NEVES, L.; RORIZ, M.; SILVA, F. M. da. Modeling a solar chimney for maximum solar irradiation and maximum air flow, for low latitude locations. In: *CONFERENCE OF INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION*. [S.l.: s.n.], 2011. v. 12, p. 13083–889.
- PRASAD, M.; CHANDRA, K. Optimum tilt of solar collector for maximum natural flow. *Energy conversion and management*, Elsevier, v. 30, n. 4, p. 369–379, 1990.
- SAKONIDOU, E. et al. Modeling of the optimum tilt of a solar chimney for maximum air flow. *Solar Energy*, Elsevier, v. 82, n. 1, p. 80–94, 2008.
- SHAKEEL, M. R.; AL-SADAH, J.; MOKHEIMER, E. Analytical and numerical modeling of solar chimney. *Journal of Energy Resources Technology*, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, v. 139, n. 3, 2017.
- SHI, L. et al. Interaction effect of room opening and air inlet on solar chimney performance. *Applied Thermal Engineering*, Elsevier, v. 159, p. 113877, 2019.

- SHI, L.; ZHANG, G. An empirical model to predict the performance of typical solar chimneys considering both room and cavity configurations. *Building and environment*, Elsevier, v. 103, p. 250–261, 2016.
- SHI, L. et al. Determining the influencing factors on the performance of solar chimney in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 88, p. 223–238, 2018.
- SOMSILA, P.; TEEBOONMA, U.; SEEHANAM, W. Investigation of buoyancy air flow inside solar chimney using cfd technique. In: IEEE. *Proceedings of the International Conference on Energy and Sustainable Development: Issues and Strategies (ESD 2010)*. [S.l.], 2010. p. 1–7.
- SPENCER, S. et al. Experimental investigation of a solar chimney natural ventilation system. *Air Distribution in Rooms*, p. 813–818, 2000.
- WOOD, J. *SPN1 Technical Fact Sheet*. 1.2d. ed. [S.l.], 2014.
- WOOD, J. *User Manual for the Sunshine Pyranometer type SPN1*. 4.2. ed. [S.l.], 2019.
- ZHA, X.; ZHANG, J.; QIN, M. Experimental and numerical studies of solar chimney for ventilation in low energy buildings. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 205, p. 1612–1619, 2017.
- ZHAI, X.; DAI, Y.; WANG, R. Experimental investigation on air heating and natural ventilation of a solar air collector. *Energy and Buildings*, Elsevier, v. 37, n. 4, p. 373–381, 2005.

## Apêndices

# A Código 1

{Modelo Matemático de uma Chaminé Solar Inclinada}  
{Dimensionamento da largura S para obter vazão de ar}

V = 0,206 {vazão volumétrica}

W = 1 {profundidade da parede da chaminé} [m]

L = 2 {comprimento da chaminé} [m]

T<sub>i</sub> = 298,15 {Temperatura do ar na entrada da chaminé} [K]

T<sub>a</sub> = T<sub>i</sub> {Temperatura ambiente}

T<sub>m</sub> = (((T<sub>w</sub> + T<sub>g</sub>)/2)+(T<sub>inf</sub>))/2

{Propriedades do ar}

rho<sub>i</sub> = DENSITY(Air;T=T<sub>i</sub>;P=101,325) {massa específica do ar a 25°C}

rho<sub>f</sub> = DENSITY(Air;T=T<sub>inf</sub>;P=101,325) {massa específica do ar na saída da chaminé}

rho<sub>m</sub> = DENSITY(Air;T=T<sub>m</sub>;P=101,325) {massa específica do ar na camada limite}

m = V\*rho<sub>i</sub> {vazão mássica}

C<sub>ar1</sub> = SPECHEAT(Air;T=T<sub>m</sub>) {Capacidade calorífica do ar a uma temp média dentro da chaminé}

beta = 1/T<sub>m</sub> {Coeficiente de expansão volumétrica térmico do ar (-1/rho<sub>i</sub>)\*((rho<sub>f</sub>-rho<sub>i</sub>)/(T<sub>f</sub>-T<sub>i</sub>))}

nu = (VISCOSITY(Air;T=T<sub>i</sub>))/(rho<sub>m</sub>) {Viscosidade cinemática do ar a 25°C}

alpha = k<sub>f</sub>/(rho<sub>m</sub>\*C<sub>ar1</sub>) {Difusividade térmica do ar na camada limite}

k<sub>f</sub> = CONDUCTIVITY(Air;T=T<sub>m</sub>) {Condutividade térmica do ar na camada limite}

{Propriedades de absorção, emissão e transmissão}

a<sub>sw</sub> = 0,8 {Absortividade solar da parede absorvedora}

a<sub>sg</sub> = 0,1 {Absortividade solar da cobertura de vidro alpha + rho + tau = 1}

eps<sub>w</sub> = 0,3 {Emissividade da parede absorvedora}

eps<sub>g</sub> = 0,9 {Emissividade do vidro}

tau<sub>g</sub> = 0,8 {Transmissividade da cobertura de vidro}

a<sub>sky</sub> = 0,3 {Absortividade do céu}

G = Lookup('variaçãoG';TableRun#;1) {Irradiação solar de 100 a 900 W/m<sup>2</sup>}

G<sub>sky</sub> = 185 {Irradiação difusa} [W/m<sup>2</sup>]

A<sub>w</sub> = W\*L {Área superficial da parede absorvedora}

A<sub>g</sub> = W\*L {Área superficial da cobertura de vidro}

Pr = nu/alpha {Número de Prandtl}

Ra<sub>S</sub> = ((grav\*beta\*(((T<sub>w</sub>+T<sub>g</sub>)/2)-T<sub>inf</sub>)\*S<sup>3</sup>)/nu<sup>2</sup>)\*Pr {Número de Rayleigh}

Nus = 0,645\*(Ra<sub>S</sub>\*(S/L))<sup>(1/4)</sup> {Número de Nusselt no canal inclinado}

h<sub>w</sub> = (Nus\*k<sub>f</sub>)/L {Coeficiente de troca de calor por convecção da parede absorvedora}

h<sub>g</sub> = (Nus\*k<sub>f</sub>)/L

grav = 9,8 {Aceleração da gravidade} [m/s<sup>2</sup>]

sigma = sigma# {Constante de Stefan-Boltzmann}

h<sub>rwg</sub> = sigma\*(T<sub>g</sub><sup>2</sup>+T<sub>w</sub><sup>2</sup>)\*(T<sub>g</sub>+T<sub>w</sub>)/((1/eps<sub>g</sub>)+(1/(eps<sub>w</sub>-1)))

h<sub>rs</sub> = sigma\*eps<sub>g</sub>\*(T<sub>g</sub>+T<sub>sky</sub>)\*(T<sub>g</sub><sup>2</sup>+T<sub>sky</sub><sup>2</sup>)\*(T<sub>g</sub>-T<sub>sky</sub>)/(T<sub>g</sub>-T<sub>a</sub>)

T<sub>sky</sub> = 0,0552\*T<sub>a</sub><sup>(1,5)</sup>

(tau<sub>g</sub>\*a<sub>sw</sub>\*G\*A<sub>w</sub>)+(tau<sub>g</sub>\*a<sub>sky</sub>\*G<sub>sky</sub>\*A<sub>w</sub>) = h<sub>w</sub>\*A<sub>w</sub>\*(T<sub>w</sub>-T<sub>inf</sub>)+h<sub>rwg</sub>\*(T<sub>w</sub>-T<sub>g</sub>)\*A<sub>w</sub>

(a<sub>sg</sub>\*G\*A<sub>g</sub>)+(a<sub>sky</sub>\*G<sub>sky</sub>\*A<sub>g</sub>)+h<sub>rwg</sub>\*(T<sub>w</sub>-T<sub>g</sub>)\*A<sub>w</sub> = h<sub>g</sub>\*A<sub>g</sub>\*(T<sub>g</sub>-T<sub>inf</sub>)+h<sub>rs</sub>\*(T<sub>g</sub>-T<sub>a</sub>)\*A<sub>g</sub>

((h<sub>w</sub>\*A<sub>w</sub>\*(T<sub>w</sub>-T<sub>inf</sub>))) + ((h<sub>g</sub>\*A<sub>g</sub>\*(T<sub>g</sub>-T<sub>inf</sub>))) = m\*C<sub>ar1</sub>\*(T<sub>f</sub>-T<sub>i</sub>)

$$T_{inf} = \gamma T_f + (1 - \gamma) T_i$$
$$\gamma = 0,74$$

$$m = (C_d \rho_f A_o / \sqrt{1 + A_r^2}) (\sqrt{2 \text{grav} L (T_{inf} - T_i) / T_i}) \text{ \{vazão mássica\}}$$

$$C_d = 0,57 \text{ \{Coeficiente de descarga\}}$$

$$A_o = W S \text{ \{Área da seção de saída da chaminé\}}$$

$$A_r = 1 \text{ \{razão entre áreas de entrada e saída\}}$$

# B Código 2

{known variables}

W = 0,6 {largura da chaminé} [m]  
S = 0,15 {distância entre cobertura de vidro e parede absorvedora} [m]  
L = 1,6 {comprimento da chaminé} [m]  
T<sub>i</sub> = 298,15 {Temperatura do ar na entrada da chaminé} [K]

a<sub>sw</sub> = 0,2 {Absortividade solar da parede absorvedora}  
a<sub>sg</sub> = 0,1 {Absortividade solar da cobertura de vidro alpha + rho + tau = 1}  
eps<sub>w</sub> = 0,15 {Emissividade da parede absorvedora}  
eps<sub>g</sub> = 0,9 {Emissividade do vidro}  
tau<sub>g</sub> = 0,8 {Transmissividade da cobertura de vidro}  
a<sub>sky</sub> = 0,3 {Absortividade do céu}  
grav = 9,8 {Aceleração da gravidade} [m/s<sup>2</sup>]  
sigma = sigma# {Constante de Stefan-Boltzmann}

{Temporary guess values}

{T<sub>f</sub> = 325 [K]}  
{T<sub>inf</sub> = 310 [K]}  
T<sub>m</sub> = (((T<sub>w</sub> + T<sub>g</sub>)/2)+(T<sub>inf</sub>))/2 [K] {Temperatura média na camada limite}  
{T<sub>w</sub> = 322 [K]}  
{T<sub>g</sub> = 320 [K]}

{Propriedades calculadas}

rho<sub>i</sub> = DENSITY(Air;T=T<sub>i</sub>;P=101325) {massa específica do ar a 25°C}  
rho<sub>f</sub> = DENSITY(Air;T=T<sub>inf</sub>;P=101325) {massa específica do ar na saída da chaminé}  
rho<sub>m</sub> = DENSITY(Air;T=T<sub>m</sub>;P=101325) {massa específica do ar na camada limite}  
C<sub>ar1</sub> = 1007 {Capacidade calorífica do ar a uma temp média dentro da chaminé}  
beta = 1/T<sub>m</sub> {Coeficiente de expansão volumétrica térmico do ar (-1/rho<sub>i</sub>)\*((rho<sub>f</sub>-rho<sub>i</sub>)/(T<sub>f</sub>-T<sub>i</sub>))}  
nu = (VISCOSITY(Air;T=T<sub>i</sub>))/(rho<sub>m</sub>) {Viscosidade cinemática do ar a 25°C}  
k<sub>f</sub> = CONDUCTIVITY(Air;T=T<sub>m</sub>) {Condutividade térmica do ar na camada limite}  
alpha = k<sub>f</sub>/(rho<sub>m</sub>\*C<sub>ar1</sub>) {Difusividade térmica do ar na camada limite}  
Pr = nu/alpha {Número de Prandtl}  
h<sub>w</sub> = (Nus<sup>1</sup>\*k<sub>f</sub>)/L {Coeficiente de troca de calor por convecção da parede absorvedora}  
h<sub>g</sub> = (Nus\*k<sub>f</sub>)/L {Coeficiente de troca de calor por convecção da parede de vidro}  
h<sub>rwg</sub> = sigma\*(T<sub>g</sub><sup>2</sup>+T<sub>w</sub><sup>2</sup>)\*(T<sub>g</sub>+T<sub>w</sub>)/((1/eps<sub>g</sub>)+(1/(eps<sub>w</sub>))-1) {coeficiente de troca de calor por radiação entre a parede absorvedora e o vidro}  
h<sub>rs</sub> = sigma\*eps<sub>g</sub>\*(T<sub>g</sub>+T<sub>sky</sub>)\*(T<sub>g</sub><sup>2</sup>+T<sub>sky</sub><sup>2</sup>)\*(T<sub>g</sub>-T<sub>sky</sub>)/(T<sub>g</sub>-T<sub>a</sub>) {coeficiente de troca de calor por radiação do vidro para o céu}  
h<sub>wind</sub> = 2,8+3\*0,2 {coeficiente de troca de calor por condução pelo vento externo no vidro}

T<sub>a</sub> = T<sub>i</sub> {Temperatura ambiente}  
T<sub>sky</sub> = 0,0552\*T<sub>a</sub><sup>(1,5)</sup>  
gama = 0,74  
T<sub>inf</sub> = gama\*T<sub>f</sub>+(1-gama)\*T<sub>i</sub> {Temperatura do ar no canal}  
A<sub>w</sub> = W\*L {Área superficial da parede absorvedora}  
A<sub>g</sub> = W\*L {Área superficial da cobertura de vidro}

Ra<sub>S</sub> = ABS(((grav\*beta\*(T<sub>g</sub>-T<sub>inf</sub>)\*L<sup>3</sup>)/nu<sup>2</sup>)\*Pr)  
Ra<sub>S1</sub> = ((grav\*beta\*(T<sub>w</sub>-T<sub>inf</sub>)\*L<sup>3</sup>)/nu<sup>2</sup>)\*Pr

$Nus = 0,645 \cdot (ABS(Ra_S) \cdot (S/L))^{1/4}$  {Número de Nusselt no canal inclinado}  
 $Nus1 = 0,645 \cdot (ABS(Ra_{S1}) \cdot (S/L))^{1/4}$  {Número de Nusselt no canal inclinado}

$G = \text{Lookup}('rad1'; \text{TableRun\#}; 1)$  {Irradiação solar direta ao longo do ano}

{Equações de balanço de energia}

$(\tau_g \cdot a_{sw} \cdot G) = h_w \cdot (T_w - T_{inf}) + h_{rwg} \cdot (T_w - T_g)$  {Balanço de calor da parede absorvedora}

$(a_{sg} \cdot G) + h_{rwg} \cdot (T_w - T_g) = h_g \cdot (T_g - T_{inf}) + h_{rs} \cdot (T_g - T_a)$  {Balanço de calor do vidro}

$((h_w \cdot (T_w - T_{inf}))) + ((h_g \cdot (T_g - T_{inf}))) = m \cdot C_{ar1} \cdot (T_f - T_i)$  {Balanço de calor do ar}

$m = (C_d \cdot \rho_f \cdot A_o / \sqrt{1 + A_r^2}) \cdot (\sqrt{2 \cdot \text{grav} \cdot L \cdot ABS(T_{inf} - T_i) / T_i})$  {vazão mássica}

$C_d = 0,57$  {Coeficiente de descarga}

$A_o = W \cdot S$  {Área da seção de saída da chaminé}

$A_r = 1$  {razão entre áreas de entrada e saída}

$V = m / \rho_f$  {vazão de ar na saída da chaminé}

# C Código 3

{known variables}

W = 0,6 {largura da chaminé} [m]  
S = 0,15 {distância entre cobertura de vidro e parede absorvedora} [m]  
L = 1,6 {comprimento da chaminé} [m]  
T\_i = 298,15 {Temperatura do ar na entrada da chaminé} [K]

a\_sw = 0,2 {Absortividade solar da parede absorvedora}  
a\_sg = 0,1 {Absortividade solar da cobertura de vidro  $\alpha + \rho + \tau = 1$ }  
eps\_w = 0,15 {Emissividade da parede absorvedora}  
eps\_g = 0,9 {Emissividade do vidro}  
tau\_g = 0,8 {Transmissividade da cobertura de vidro}  
a\_sky = 0,3 {Absortividade do céu}  
grav = 9,8 {Aceleração da gravidade} [m/s<sup>2</sup>]  
sigma = sigma# {Constante de Stefan-Boltzmann}

{Temporary guess values}

{T\_f = 325 [K]}  
{T\_inf = 310 [K]}  
T\_m = (((T\_w + T\_g)/2)+(T\_inf))/2 [K] {Temperatura média na camada limite}  
{T\_w = 322 [K]}  
T\_g = 320[K]}

{Propriedades calculadas}

rho\_i = DENSITY(Air;T=T\_i;P=101325) {massa específica do ar a 25°C}  
rho\_f = DENSITY(Air;T=T\_inf;P=101325) {massa específica do ar na saída da chaminé}  
rho\_m = DENSITY(Air;T=T\_m;P=101325) {massa específica do ar na camada limite}  
C\_ar1 = 1007 {Capacidade calorífica do ar a uma temp média dentro da chaminé}  
beta = 1/T\_m {Coeficiente de expansão volumétrica térmico do ar  $(-1/\rho_i)*((\rho_f-\rho_i)/(T_f-T_i))$ }  
nu = (VISCOSITY(Air;T=T\_i))/(rho\_m) {Viscosidade cinemática do ar a 25°C}  
k\_f = CONDUCTIVITY(Air;T=T\_m) {Condutividade térmica do ar na camada limite}  
alpha = k\_f/(rho\_m\*C\_ar1){Difusividade térmica do ar na camada limite}  
Pr = nu/alpha {Número de Prandtl}  
h\_w = (Nus\*k\_f)/L {Coeficiente de troca de calor por convecção da parede absorvedora}  
h\_g = (Nus\*k\_f)/L {Coeficiente de troca de calor por convecção da parede de vidro}  
h\_rwg = sigma\*(T\_g^2+T\_w^2)\*(T\_g+T\_w)/((1/eps\_g)+(1/(eps\_w))-1) {coeficiente de troca de calor por radiação entre a parede absorvedora e o vidro}  
h\_rs = sigma\*eps\_g\*(T\_g+T\_sky)\*(T\_g^2+T\_sky^2)\*(T\_g-T\_sky)/(T\_g-T\_a) {coeficiente de troca de calor por radiação do vidro para o céu}  
h\_wind = 2,8+3\*0,2 {coeficiente de troca de calor por condução pelo vento externo no vidro}

T\_a = T\_i {Temperatura ambiente}  
T\_sky = 0,0552\*T\_a^(1,5)  
gama = 0,74  
T\_inf = gama\*T\_f+(1-gama)\*T\_i {Temperatura do ar no canal}  
A\_w = W\*L {Área superficial da parede absorvedora}  
A\_g = W\*L {Área superficial da cobertura de vidro}



$Ra_S = ABS(((grav*beta*(T_g-T_{inf})*L^3)/nu^2)*Pr)$   
 $Ra_{S1} = ((grav*beta*(T_w-T_{inf})*L^3)/nu^2)*Pr$   
 $Nus = 0,645*(ABS(Ra_S)*(S/L))^{(1/4)}$  {Número de Nusselt no canal inclinado}  
 $Nus1 = 0,645*(ABS(Ra_{S1})*(S/L))^{(1/4)}$  {Número de Nusselt no canal inclinado}

$G = Lookup('rad1';TableRun\#;1)$  {Irradiação solar direta ao longo do ano}

{Equações de balanço de energia}

$(tau_g*a_{sw}*G) = h_w*(T_w-T_{inf})+h_{rwg}*(T_w-T_g)$  {Balanço de calor da parede absorvedora}

$(a_{sg}*G)+h_{rwg}*(T_w-T_g) = h_g*(T_g-T_{inf})+h_{rs}*(T_g-T_a)$  {Balanço de calor do vidro}

$((h_w*(T_w-T_{inf}))) + ((h_g*(T_g-T_{inf}))) = m*C_{ar1}*(T_f-T_i)$  {Balanço de calor do ar}

$m = (C_d*rho_f*A_o/sqrt(1+A_r^2))*(sqrt(2*grav*L*SIN(45)*ABS(T_{inf}-T_i)/T_i))$  {vazão mássica}

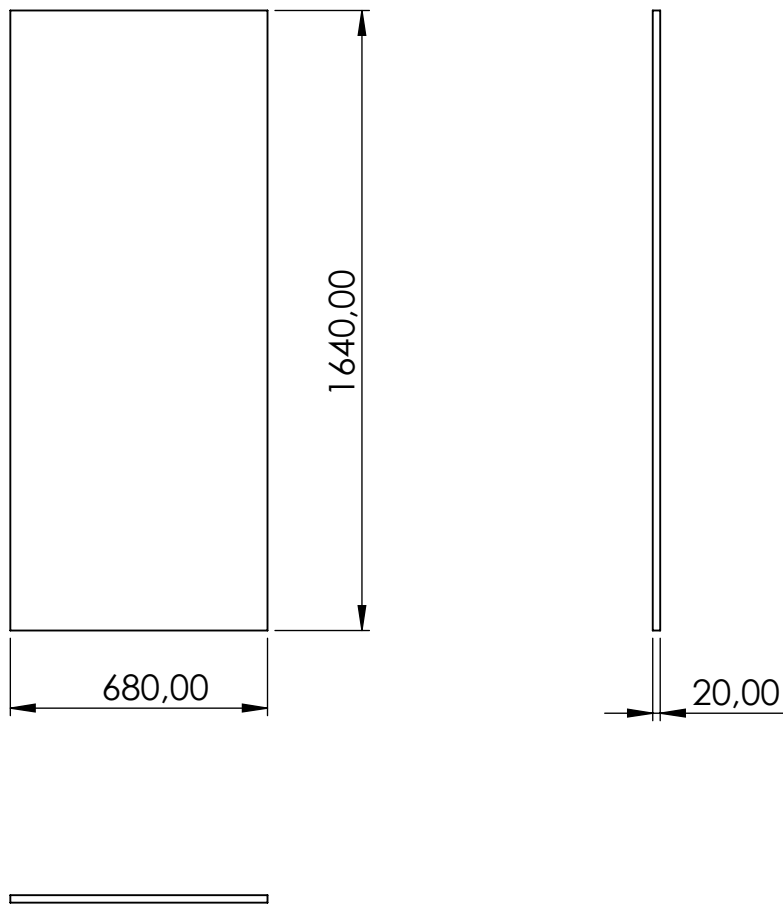
$C_d = 0,57$  {Coeficiente de descarga}

$A_o = W*S$  {Área da seção de saída da chaminé}

$A_r = 1$  {razão entre áreas de entrada e saída}

$V = m/rho_f$  {vazão de ar na saída da chaminé}

# D Desenhos Técnicos



Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	DESCRIÇÃO	QTD.
1	1	Chapa base	1



Faculdade de Tecnologia - FT

Data:

06/04/2021

Desenhista

Vítor Matos Silva

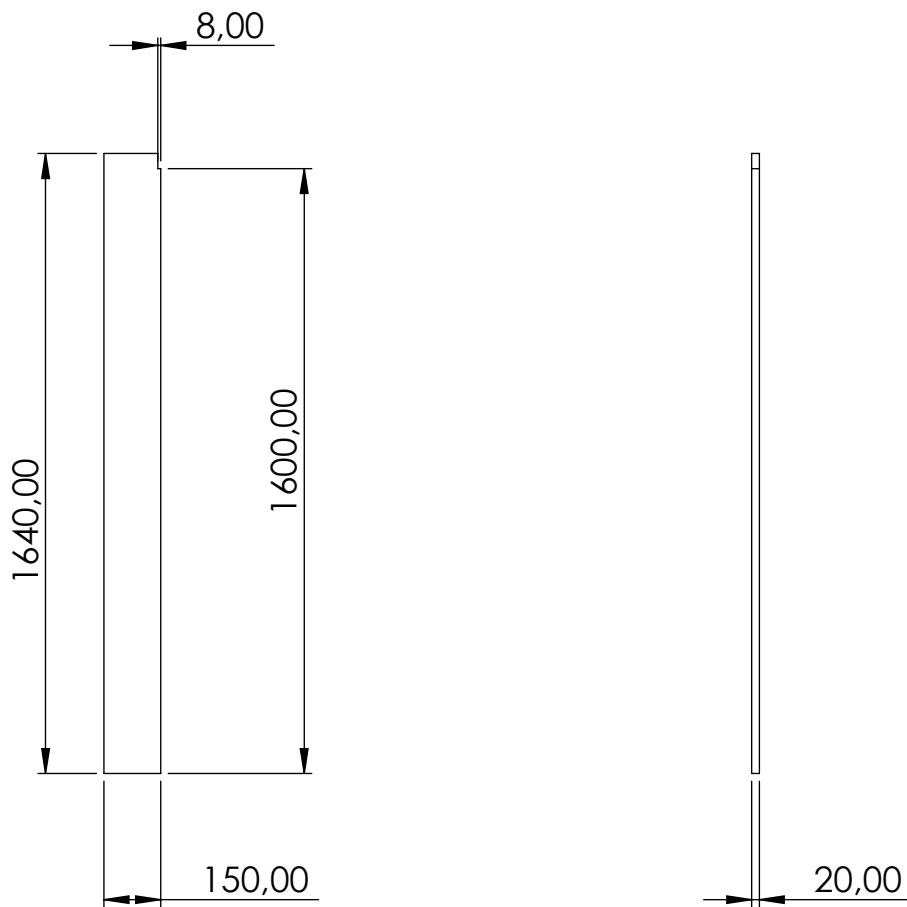
Unidade: mm

Chapa Base


Escala: 1:20

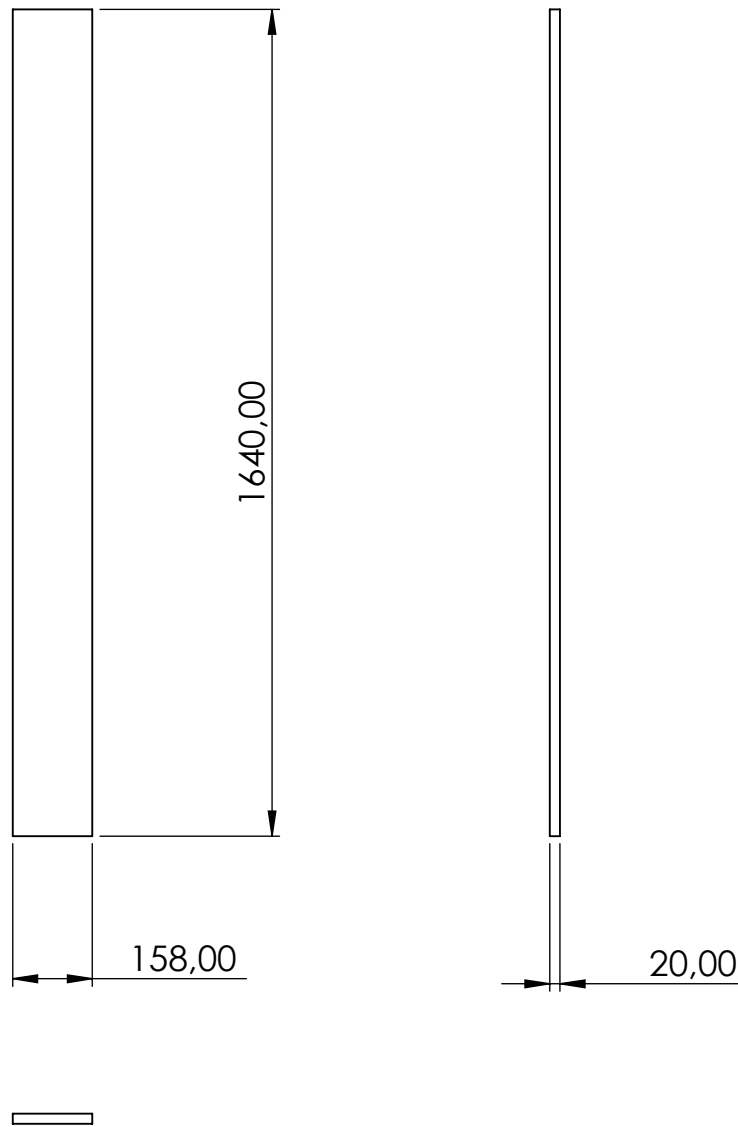
Diedro: Primeiro

Num. de Folha: 1



Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	DESCRIÇÃO	QTD.
1	2	Chapa lateral com cavidade	2

	Faculdade de Tecnologia - FT	Data:
		06/04/2021
Desenhista	Vítor Matos Silva	
Unidade: mm	Chapa lateral com cavidade	Escala: 1:20
Diedro: Primeiro		Num. de Folha: 2



Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	DESCRIÇÃO	QTD.
1	1	Parede lateral	1



Faculdade de Tecnologia - FT

Data:

07/04/2021

Desenhista

Vítor Matos Silva

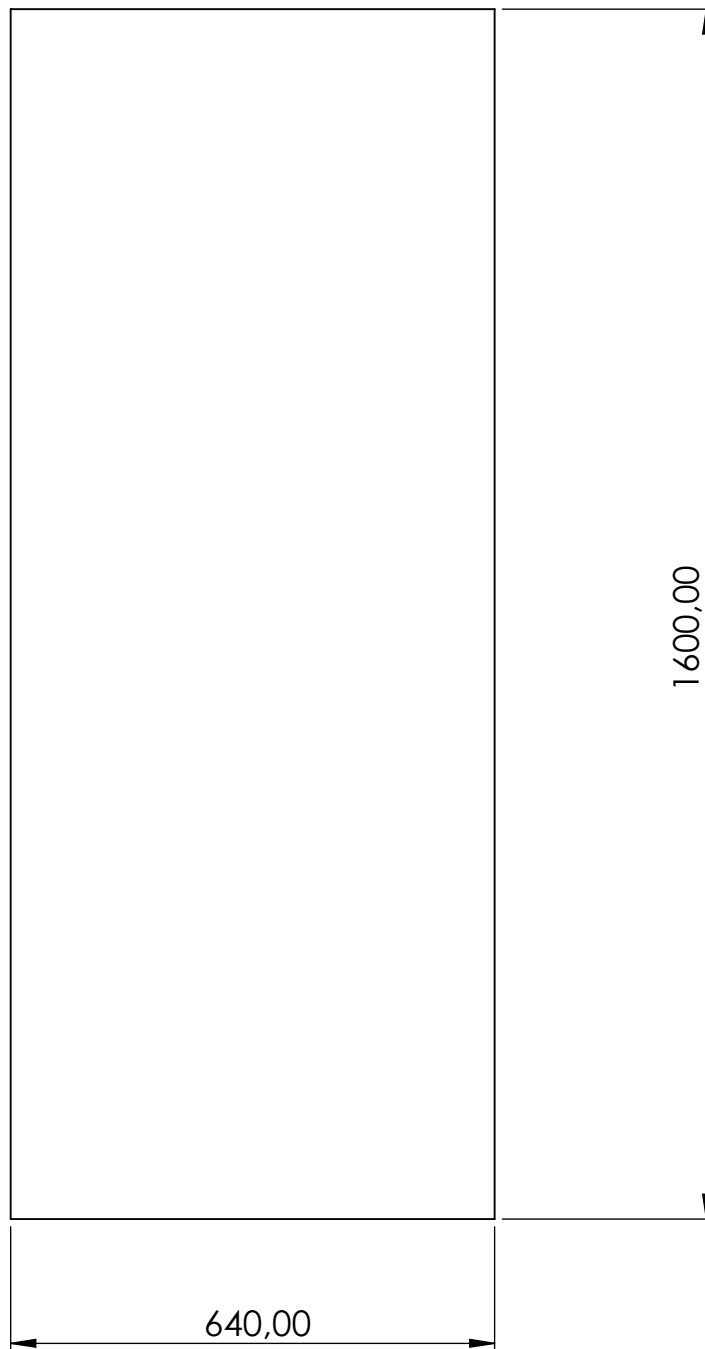
Unidade: mm

Parede lateral


Escala: 1:15

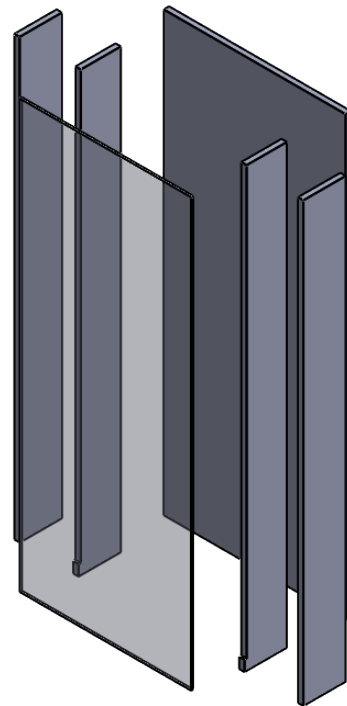
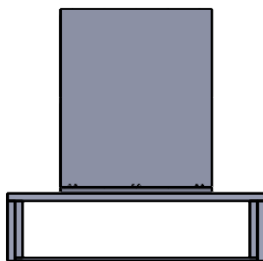
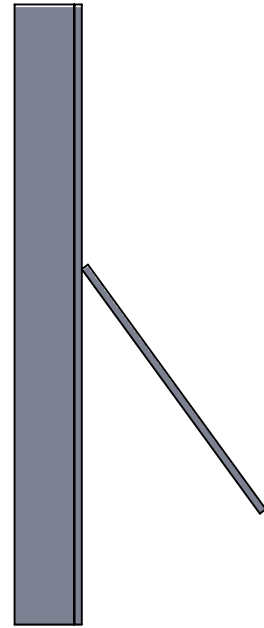
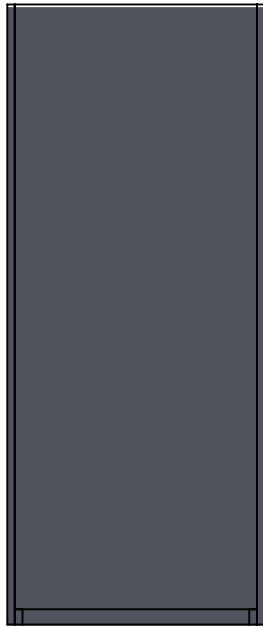
Diedro: Primeiro

Num. de Folha: 3



Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	DESCRIÇÃO	QTD.
1	1	Placa de vidro de 8 mm de espessura	1

	Faculdade de Tecnologia - FT	Data:
		07/04/2021
Desenhista	Vítor Matos Silva	
Unidade: mm	Placa de vidro comum	Escala: 1:10
Diedro: Primeiro		Num. de Folha: 4



Faculdade de Tecnologia - FT

Data:

08/04/2021

Desenhista

Vítor Matos Silva

Unidade: mm

Montagem da chaminé solar e suporte

Escala: 1:20

Diedro: Primeiro

Num. de Folha: 5

# E Links e arquivos

[https://unbbr-my.sharepoint.com/:f/g/personal/150065647\\_aluno\\_unb\\_br/Elcd9yjs6XJFped3WXhxj2gBea9jPLTi95qFSP\\_pED6sjg?e=TV0Ljh](https://unbbr-my.sharepoint.com/:f/g/personal/150065647_aluno_unb_br/Elcd9yjs6XJFped3WXhxj2gBea9jPLTi95qFSP_pED6sjg?e=TV0Ljh)



# F Curvas de calibração dos termopares

Primeiramente, assim como mostra a Figura F.1 os cinco termopares foram fixados na tampa do equipamento de forma que todos ficassem com as pontas próximas umas das outras e também próximas da sonda Pt-100, que foi a termorresistência utilizada como referência.

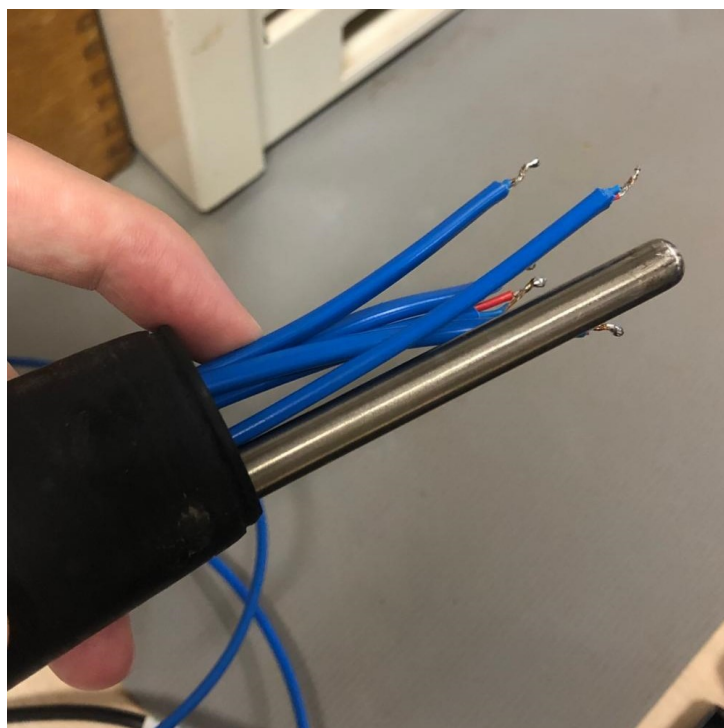


Figura F.1 – Detalhe do encaixe dos termopares e da termorresistência de referência.

Os termopares e a termorresistência foram inseridos no banho termostático com agitador, de forma que todos teoricamente deveriam estar medindo a mesma temperatura. A termorresistência foi conectada a um multímetro digital para que a variação da resistência pudesse ser anotada e posteriormente a temperatura equivalente fosse verificada na tabela da fabricante Omega.

Foram escolhidos cinco valores de temperatura para a calibração dos termopares de acordo com a faixa de valores que esperava-se registrar ao longo das medições na chaminé solar. Assim, a cada ponto de temperatura dentro da faixa de 20°C a 52°C, foi ajustado o valor no equipamento e aguardado alguns minutos até que a leitura da resistência do Pt-100 no multímetro se tornasse estável, garantindo que a temperatura desejada no banho termostático havia sido de fato obtida. Foram realizadas cinco medições em cada um desses pontos, com espaçamento de um minuto entre cada medida. Os resultados das medições se encontram nas Tabelas F.1 e F.2.

Tabela F.1 – Médias das temperaturas nos pontos utilizados para a calibração.

Médias das Temperaturas (°C)					
Temp. de Referência	Termopar nº 1	Termopar nº 2	Termopar nº 3	Termopar nº 4	Termopar nº 5
19,96	19,83	19,87	19,90	19,87	19,89
28,00	27,91	28,00	27,99	27,92	28,01
35,98	35,87	35,93	35,95	35,88	35,88
44,03	43,76	43,82	43,88	43,76	43,81
52,00	51,73	51,77	51,88	51,74	51,75

A partir das medidas registradas nos termopares e da medida da resistência lida no multímetro, obteve-se o erro associado a cada termopar em todos os pontos. Observa-se que o maior erro encontrado foi no termopar nº 1, onde a média das temperaturas teve uma diferença de 0,27 °C do valor real medido na referência.

Tabela F.2 – Erros encontrados nos termopares com relação à temperatura de referência.

Temp. de Referência (°C)	Erro (°C)				
	Termopar nº 1	Termopar nº 2	Termopar nº 3	Termopar nº 4	Termopar nº 5
19,96	-0,13	-0,04	0,06	-0,04	-0,04
28,00	-0,09	-0,09	-0,17	-0,24	-0,09
35,98	-0,11	0,05	0,04	-0,03	-0,03
44,03	-0,26	0,00	0,02	-0,19	0,08
52,00	-0,27	-0,03	0,16	-0,17	-0,05

Os dados coletados foram utilizados para gerar as curvas de calibração dos cinco termopares, que apresentaram um comportamento perfeitamente linear, significando que a temperatura medida no termopar sempre era muito próxima da temperatura de referência. A Figura F.2 mostra a curva de calibração do termopar nº 1, com a equação da reta que prevê os valores reais temperatura de acordo com o medido pelo termopar e também apresenta o valor do coeficiente de determinação  $R^2 = 1$ , que demonstra que a reta obtida se ajusta muito bem aos valores. As Figuras F.3, F.4, F.5, F.6 mostram as demais curvas de calibração.

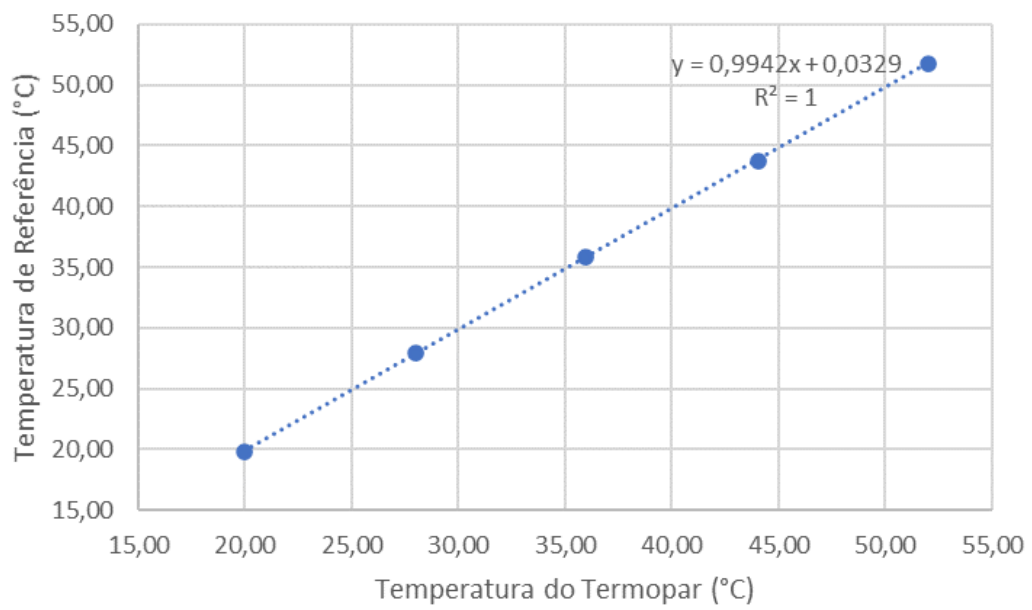


Figura F.2 – Curva de calibração do termopar nº 1.

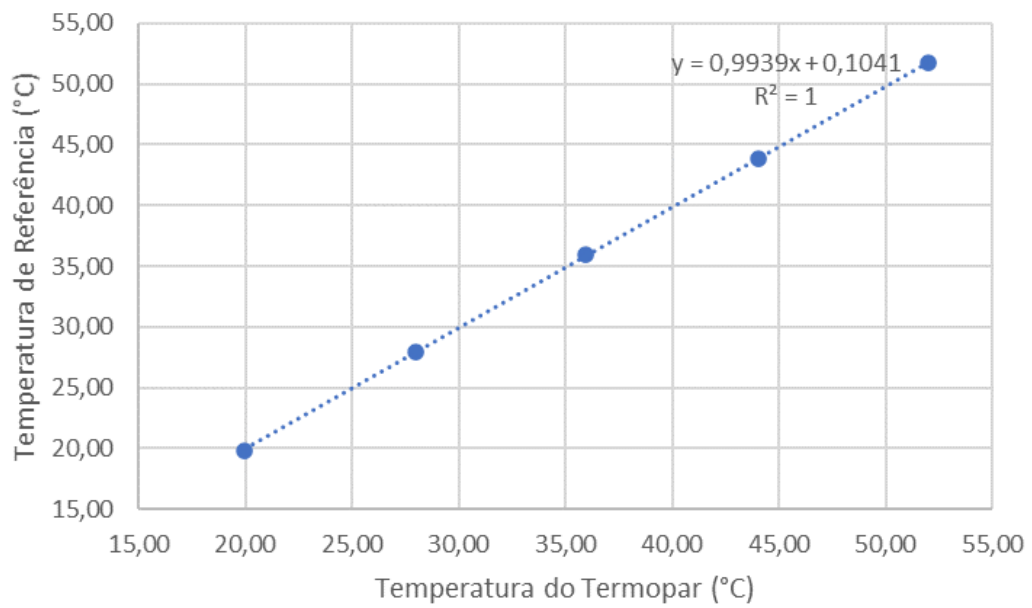


Figura F.3 – Curva de calibração do termopar nº 2.

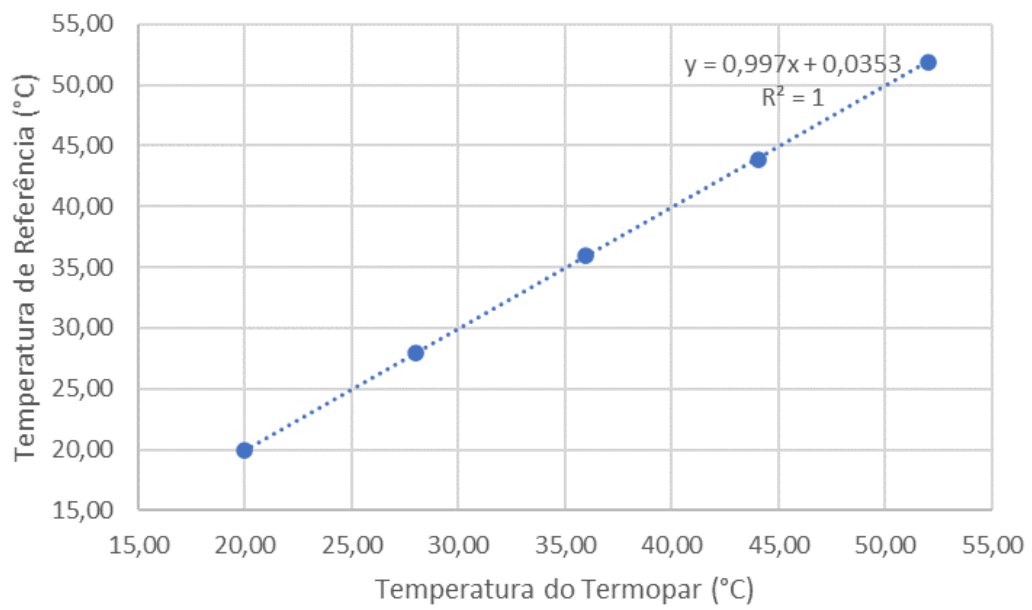


Figura F.4 – Curva de calibração do termopar nº 3.

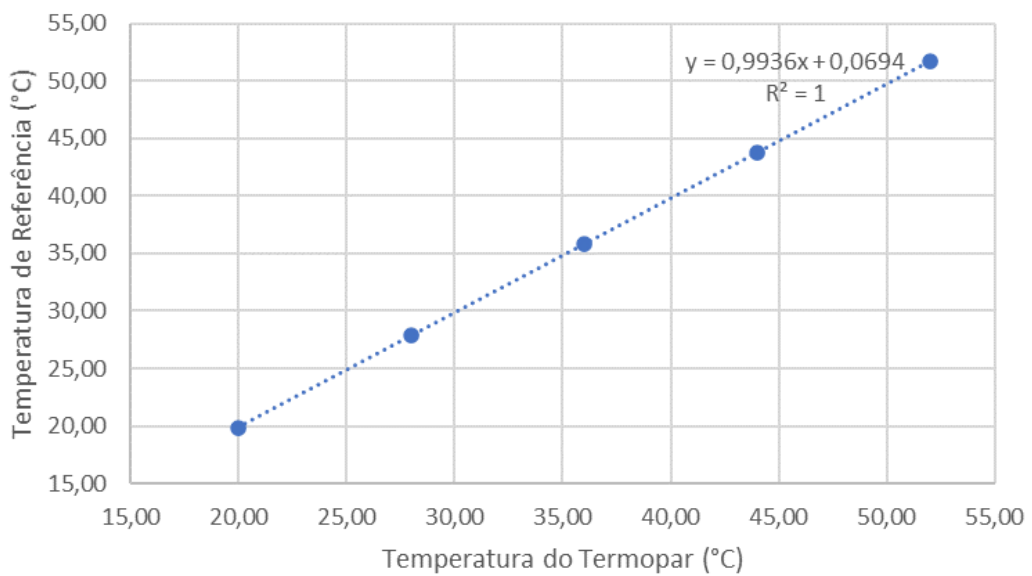


Figura F.5 – Curva de calibração do termopar nº 4.

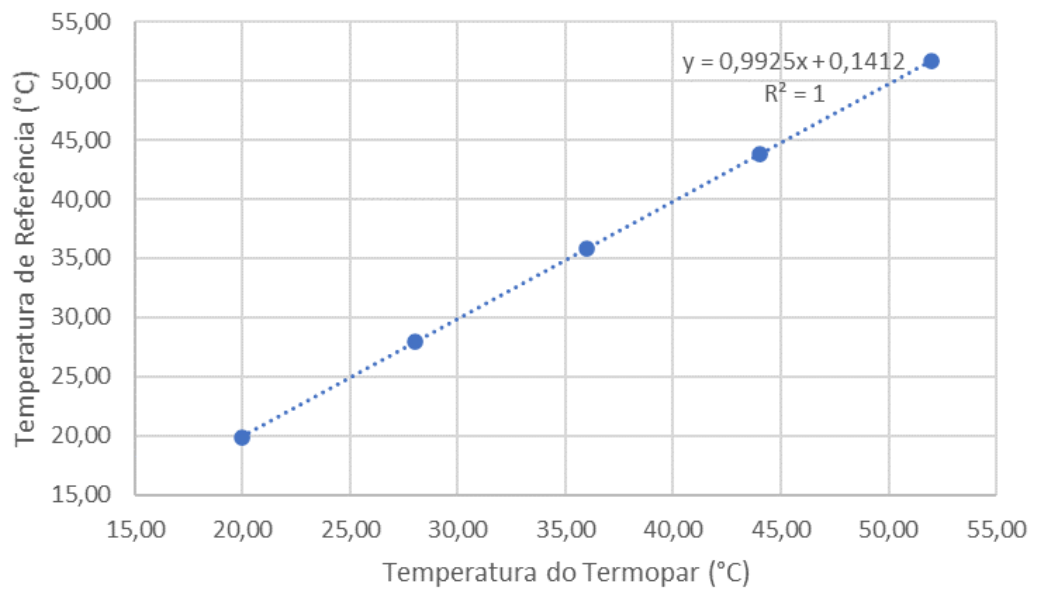


Figura F.6 – Curva de calibração do termopar nº 5.