

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL

DESIGN CONSTRUTAL APLICADO PARA AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA GEOMÉTRICA
NA VAZÃO MÁSSICA DE UMA CHAMINÉ SOLAR DE PAREDE PASSIVA INCLINADA
ANEXA A UM AMBIENTE

por

Marta Rodrigues Leão

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Modelagem Computacional

Rio Grande, Julho, 2021

Marta Rodrigues Leão

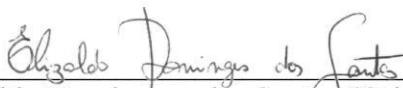
“Design Construtal Aplicado para Avaliação da Influência Geométrica na Vazão Mássica de uma Chaminé Solar de Parede Passiva Inclinada Anexa a um Ambiente”

“Constructal Design Applied for Geometric Influence Evaluation on the Mass Flow Rate of an Inclined Passive Wall Solar Chimney Attached to a Room”

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de concentração: Modelagem Computacional.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos (Orientador – FURG)



Prof. Dr. Emanuel da Silva Diaz Estrada (Coorientador – FURG)



Profa. Dra. Sylvie Lorente (Villanova University)



Profa. Dra. Ruth da Silva Brum (UFPeI)



Prof. Dr. Jefferson Avila Souza (FURG)

Ficha Catalográfica

L437d Leão, Marta Rodrigues.

Design construtal aplicado para avaliação da influência geométrica na vazão mássica de uma chaminé solar de parede passiva inclinada anexa a um ambiente / Marta Rodrigues Leão. – 2021.

68 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Rio Grande/RS, 2021.

Orientador: Dr. Elizaldo Domingues dos Santos.

Coorientador: Dr. Emanuel da Silva Diaz Estrada.

1. Chaminé Solar 2. Estudo Numérico 3. Design Construtal
4. Energia Solar 5. Ventilação Natural I. Santos, Elizaldo Domingues dos II. Estrada, Emanuel da Silva Diaz III. Título.

CDU 004

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, em especial à minha mãe Celonira, meu pai Galdino, minha irmã Bruna, meu cunhado Leandro e minha afilhada Alice por todo amor, incentivo, apoio e compreensão ao longo de todo esse período.

Ao meu orientador Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos por toda disponibilidade prestada na elaboração desse trabalho, além das diversas orientações, conversas, incentivos e pela confiança dedicada à mim.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Emanuel da Silva Diaz Estrada pelas contribuições ao trabalho e pronta disponibilidade sempre que solicitado.

À todos meus amigos e colegas do mestrado, em especial à Tuane e Thiago, pelos momentos divididos juntos e por poder compartilhar todas angústias e alegrias dessa trajetória.

À minha amiga de infância Danielle e às amigas que o mercado de trabalho me proporcionou, Cynthia, Diergrini e Fernanda por acreditarem em mim e pela torcida de sempre.

À Universidade Federal do Rio Grande (FURG) e ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional (PPGMC) pelo apoio e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento da bolsa de estudo.

RESUMO

O presente trabalho visa empregar uma metodologia numérica para análise do escoamento turbulento em uma chaminé solar de parede passiva inclinada conectada a um ambiente (espaço ventilado), avaliando a influência da sua geometria sobre o desempenho do escoamento no ambiente através do método Design Construtal. O funcionamento desse dispositivo se dá a partir da radiação solar que incide na parede inclinada, aquecendo o ar e gerando a movimentação dele no interior da chaminé e consequentemente no ambiente anexo. O escoamento é admitido turbulento, incompressível, com transferência de calor por convecção natural e é analisado no regime transiente em um domínio bidimensional. As equações médias no tempo de conservação de massa, quantidade de movimento e energia são numericamente solucionadas pelo método de volumes finitos utilizando o software Fluent. Para o fechamento da turbulência foi empregada a modelagem clássica (RANS – *Reynolds Averaged Navier Stokes*) com o modelo padrão $k - \epsilon$. É considerado um escoamento de ar com $Pr = 0,7$. Estudos de independência de malha e de passo de tempo foram realizados, bem como a verificação do modelo computacional observando-se uma boa proximidade com resultados apresentados na literatura. Posteriormente, foi realizada a avaliação da influência da geometria da chaminé no comportamento da vazão mássica no ambiente, utilizando o método Design Construtal e submetendo a parede do absorvedor a uma taxa de transferência de calor constante. A área da chaminé e do ambiente são as restrições do problema, que é submetido a variação de três graus de liberdade, sendo eles: o tamanho da abertura de entrada para chaminé pela altura da mesma (H_i/H_a), a base inferior da chaminé pela altura da mesma (W_g/H_a) e a abertura da saída da chaminé pela base inferior da mesma (W_e/W_g). Os resultados mostraram que os graus de liberdade analisados possuem bastante influência no parâmetro de desempenho, confirmando o método Design Construtal como uma excelente ferramenta para avaliação da sensibilidade dos parâmetros geométricos. Também foi possível visualizar a existência de uma dependência entre os graus de liberdade analisados, já que, com exceção de H_i/H_a sobre $(W_g/H_a)_o$, todas as razões geométricas ótimas foram influenciadas por variações no subsequente grau de liberdade investigado. Além disso, dentro do espaço de busca analisado, a configuração geométrica que conduziu a melhor vazão mássica ($\dot{m}_{3m} = 0,1880 \text{ kg/s m}$) obteve um valor 574,3% superior que o atingido no pior caso estudado.

Palavras-chaves: Chaminé Solar, Estudo Numérico, Design Construtal, Energia Solar, Ventilação Natural.

ABSTRACT

The present work aims to employ a numerical methodology for the analysis of turbulent flow in an inclined passive wall solar chimney attached to a room (ventilated space), evaluating the influence of its geometry on the flow performance in the environment through the Construtal Design method. The operation of this device is given from the solar radiation incident on the inclined wall, heating the air and generating its movement inside the chimney and consequently in the attached space. The flow is admitted turbulent, incompressible, with heat transfer by natural convection and it is analyzed in the transient regime in a two dimensional domain. The time-averaged conservation equations of mass, momentum and energy are numerically solved by the finite volume method using the Fluent software. To reproduce de airflow turbulence, the classical modeling (RANS – Reynolds Averaged Navier Stokes) with the standard model $k - \epsilon$ was used. It is considered an airflow with $Pr = 0.7$. A grid and time step independence tests were carried out, as well as the verification of the computational model, observing a good proximity with results presented in the literature. Subsequently, an evaluation of the influence of the chimney geometry on the mass flow behavior in the environment was carried out, using the Construtal Design method and submitting the absorber wall to a constant heat transfer rate. The chimney area and the room area are the problem restriction, which is submitted to a variation of three degrees of freedom, namely: the size of the inlet aperture to the chimney by the chimney height (H_i/H_a), the base air gap width by the chimney height (W_g/H_a) and the exit air gap width by the base air gap width (W_e/W_g). The results showed that the degrees of freedom analyzed have a strong influence on the performance parameter, confirming the Construtal Design method as an excellent tool for evaluating the sensibility of geometric parameters. It was also possible to visualize the existence of a dependence between the analyzed degrees of freedom, since, with the exception of H_i/H_a on $(W_g/H_a)_o$, all the optimal geometric ratios were influenced by variations in the subsequent degree of freedom investigated. Furthermore, within the analyzed search space, the geometric configuration that led to the best mass flow ($\dot{m}_{3m} = 0.1880 \text{ kg/s m}$) obtained a value 574.3% higher than that achieved in the worst case studied.

Keywords: Solar Chimney, Numerical Investigation, Design Constructal, Solar Energy Natural Ventilation.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Princípio de Funcionamento de uma Chaminé Solar Anexa a um Ambiente	14
1.2. Estado da Arte	15
1.3. Objetivos	21
1.3.1. Objetivo Geral.....	21
1.3.2. Objetivos Específicos.....	21
1.4. Delineamento do Trabalho	22
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1. Ambientes Climatizados	23
2.2. Aplicações Práticas de Uso de Chaminés Solares.....	26
2.3. Design Construtal.....	30
3. MODELAGEM MATEMÁTICA	34
3.1. Equações de Conservação	34
3.2. Descrição do Problema	36
3.3. Aplicação do Design Construtal.....	38
4. MODELAGEM NUMÉRICA	42
4.1. Procedimentos Numéricos	42
4.2. Estudo de Independência de Malha	43
4.3. Estudo de Independência de Passo de Tempo.....	44
4.4. Verificação do Modelo Computacional.....	45
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
5.1. Casos Simulados	49
5.2. Efeito dos Parâmetros Geométricos sobre a Vazão Mássica.....	51
6. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE.....	59
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Crescimento do consumo de eletricidade total e para condicionamento de ar no setor residencial (2005 = 100) – (Fonte: Elaboração EPE)	13
Figura 1.2. Modelos esquemáticos de uma (a) chaminé convencional de parede passiva vertical e (b) de uma IPWSC (adaptado e traduzido de fonte: Khanal e Lei (2011) e Khanal e Lei (2015), respectivamente).	15
Figura 1.3. Configuração bidimensional de chaminé solar SCPP (adaptado e traduzido de fonte: Dhahri e Omri (2013)).	18
Figura 1.4. Esquema de ventilação natural realizada pela chaminé solar em um domínio tridimensional utilizado por Abdeen et al. (2019) (adaptado e traduzido).....	19
Figura 1.5. Maquete numérica da sala construída no estudo de Shi et al. (2020) (adaptado e traduzido).	20
Figura 2.1. Faixas aceitáveis de temperatura para ambientes ventilados naturalmente. (Fonte: ANSI/ASHRAE (2013)).	24
Figura 2.2. Indicadores de performance para avaliar sistemas de ventilação passiva (Fonte: adaptado de Zhang (2021))......	25
Figura 2.3. Protótipo de chaminé solar para secagem de frutas construído por Ferreira et al. (2008).	26
Figura 2.4. Chaminés Solares construídas no BRE Building – Inglaterra (Fonte: Projeto EULEB).28	
Figura 2.5. Avaliação de aceitação dos usuários para o BRE Building (Fonte: Projeto EULEB).	28
Figura 2.6. Vista das chaminés solares da escola <i>Lycée Français Charles De Gaulle</i> – Síria (Fonte: Prêmio Aga Khan de Arquitetura ciclo 2011-2013).	29
Figura 2.7. Harlequin 1 – Inglaterra (Fonte: site de arquitetura ArchDaily).	30
Figura 2.8. (a) Onde aeronaves voavam em 1992 e (b) onde irão voar em 2050 (Fonte: Bejan e Lorente (2008)).	31
Figura 2.9. Padrão de fluxo na natureza – lado esquerdo: delta do rio Lena na Sibéria – lado direito: a arquitetura construtiva em árvore que conecta o centro às pontas do perímetro do disco (Fonte: Bejan e Lorente (2008)).	32
Figura 2.10. Fluxograma dos principais passos de aplicação do método Design Construtal. (adaptado de fonte: Fagundes et al., 2019; Magalhães et al., 2020).	33
Figura 3.1. Configuração bidimensional da chaminé solar (IPWSC) anexada a um ambiente.	36
Figura 3.2. Condições de contorno do domínio computacional.	37

Figura 3.3. Valores propostos para os graus de liberdade e procedimento das simulações.	40
Figura 4.1. Malha independente com 50.864 elementos.....	44
Figura 4.2. Campo de intensidade de turbulência (%) – (a) Rajão (2016) regime transiente – (b) Khanal e Lei (2015) regime permanente.....	46
Figura 4.3. Campo de intensidade de turbulência (%) do presente trabalho – (a) Regime transiente – (b) Regime permanente.	46
Figura 4.4. Campo de velocidades (m/s) – (a) Rajão (2016) regime transiente – (b) Presente trabalho regime transiente – (c) Presente trabalho regime permanente.	47
Figura 5.1. Efeito da razão W_e/W_g sobre a vazão mássica na chaminé.	52
Figura 5.2. Campos de velocidades para (a) $(W_e/W_g)_o = 0,6$ e (b) $W_e/W_g = 0,1$ – Análise com H_i/H_a fixo e igual a 0,05 e W_g/H_a fixo e igual a 0,1.....	52
Figura 5.3. Efeito da razão W_e/W_g sobre a vazão mássica para várias razões de W_g/H_a	53
Figura 5.4. Efeito da razão W_g/H_a sobre a vazão mássica uma vez maximizada e correspondente geometria ótima $(W_e/W_g)_o$ com H_i/H_a fixo e igual a 0,05.	54
Figura 5.5. Campos de velocidades para (a) $(W_g/H_a)_o = 0,1$ e $(W_e/W_g)_{2o} = 0,6$ e (b) $W_g/H_a = 0,5$ e $(W_e/W_g)_o = 0,1$ – Análise com H_i/H_a fixo e igual a 0,05.	55
Figura 5.6. Efeito da razão W_g/H_a sobre a vazão mássica uma vez maximizada para três diferentes magnitudes de H_i/H_a	55
Figura 5.7. Efeito da razão W_g/H_a sobre $(W_e/W_g)_o$ para três diferentes magnitudes de H_i/H_a	56
Figura 5.8. Efeito da razão H_i/H_a sobre a vazão mássica e correspondente geometria ótima $(W_e/W_g)_{2o}$	57
Figura 5.9. Efeito da razão H_i/H_a sobre a vazão mássica e correspondente geometria ótima $(W_g/H_a)_o$	57
Figura 5.10. Campos de velocidades para (a) $(H_i/H_a)_o = 0,2$, $(W_g/H_a)_{2o} = 0,1$ e $(W_e/W_g)_{3o} = 1,0$ e (b) $H_i/H_a = 0,05$, $(W_g/H_a)_o = 0,1$ e $(W_e/W_g)_{2o} = 0,6$	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Condições de contorno.	37
Tabela 3.2. Resumo dos dados e considerações admitidas para a verificação do modelo.....	38
Tabela 4.1. Estudo de independência de malha - Critério definido para a independência de malha < 1.0×10^{-2}	44
Tabela 4.2. Estudo de independência de passo de tempo - Critério definido para a independência de passo de tempo < 1.0×10^{-2}	45
Tabela 4.3. Comparativo de resultados entre o presente trabalho, o trabalho de Rajão (2016) e o publicado por Khanal e Lei (2015)	48
Tabela 5.1. Casos simulados para avaliação da influência da geometria da chaminé no comportamento da vazão mássica.	49

LISTA DE SÍMBOLOS

A_t	Área total da chaminé [m ²]
c_p	Calor específico (J/kg K)
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
I	Intensidade de turbulência (%)
H	Altura do ambiente anexo [m]
H_a	Altura da parede do absorvedor [m]
H_i	Abertura de entrada para a chaminé [m]
k	Energia cinética da turbulência [m ² /s ²]
L	Comprimento do ambiente anexo [m]
$\dot{M}$	Variável adimensional relacionada a vazão mássica ($\dot{m}/\rho\alpha$)
$\dot{m}$	Vazão mássica por unidade de comprimento [kg/s m]
p	Pressão [Pa]
Pr	Número de Prandtl (ν/α)
q'	Taxa de transferência de calor por unidade de comprimento [W/m]
q''	Fluxo de calor [W/m ²]
Ra_{Ha}	Número de Rayleigh ($Ra_{Ha} = (g\beta q'' H_a^4)/(\nu\alpha\kappa)$)
t	Tempo [s]
T	Temperatura [K]
u	Velocidade na direção x [m/s]
v	Velocidade na direção y [m/s]
v_e	Velocidade na saída da chaminé [m/s]
W_e	Abertura da saída da chaminé [m]
W_g	Base da chaminé [m]
W_i	Altura da janela de entrada [m]

W_t Espessura da parede do absorvedor [m]

x Coordenada horizontal

y Coordenada vertical

Símbolos gregos

α Difusividade térmica [m²/s]

β Coeficiente de expansão térmica [1/K]

δ_{ij} Delta de Kronecker

ε Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta [m²/s³]

κ Condutividade térmica do ar [W/m K]

μ Viscosidade dinâmica [kg/m s]

μ_t Viscosidade turbulenta [kg/m s]

ν Viscosidade cinemática [m²/s]

ν_t Viscosidade cinemática turbulenta [m²/s]

ρ Massa específica do fluido [kg/m³]

Sub índices

— Variáveis médias no tempo

i Componente i

j Componente j

m Uma vez maximizado

2m Duas vezes maximizado

3m Três vezes maximizado

o Uma vez otimizado

2o Duas vezes otimizado

3o Três vezes otimizado

LISTA DE ABREVIATURAS

BRE	<i>Building Research Establishment</i>
CDS	<i>Central Differencing Scheme</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
EPE	Empresa de pesquisa energética
EULEB	<i>European High Quality Low Energy Buildings</i>
FDS	<i>Fire Dynamics Simulator</i>
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IPWSC	<i>Inclined Passive Wall Solar Chimney</i>
MVF	Método de Volumes Finitos
ONU	Organização das Nações Unidas
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
Procel	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
Projeteee	Projetando Edificações Energicamente Eficientes
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>
SCPP	<i>Solar Chimney Power Plant</i>
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations</i>
UDS	<i>Upstream Differencing Scheme</i>

1. INTRODUÇÃO

O aquecimento global é um tema bastante difundido e é de conhecimento de todos que as temperaturas no planeta vêm aumentando a cada ano. As décadas de 1990 e 2000 foram as mais quentes dos últimos 1.000 anos, conforme site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (2019). De acordo com o mesmo site, as projeções do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas - IPCC indicam que nos próximos 100 anos poderá haver um aumento da temperatura média global entre 1,8°C e 4,0°C.

Segundo a Nota Técnica EPE 030/2018, o aumento das cargas de condicionadores de ar pode elevar não apenas as necessidades gerais de energia, mas também a necessidade de geração e distribuição para atender a demanda nos horários de pico, adicionado maior impacto sobre o sistema energético nacional. Além disso, o aumento da demanda por ar condicionado pode estar intimamente relacionado com o aumento da poluição, incluindo emissões de gases do efeito estufa. Conforme a plataforma Projeteee¹, o setor de edificações responde atualmente por mais de 40% do total da eletricidade consumida, gerando grandes impactos ambientais e um maior gasto para o consumidor.

Agregado a isso, a preocupação com uma edificação sustentável até poucos anos atrás era praticamente nula. De modo geral, a maioria dos edifícios residenciais são projetados e construídos considerando apenas questões econômicas e funcionais, sem uma abrangente consciência das implicações ambientais e de consumo de energia (Abdeen et al., 2019). Gradativamente, isso vem sendo mudado no mundo, através de legislações e de uma consciência maior de engenheiros e arquitetos na hora de projetar residências e edifícios.

No Brasil, a evidência dessa mudança, embora ainda que lenta, é a etiqueta PBE Edifica, a qual foi desenvolvida como parte do Programa Brasileiro de Etiquetagem. Ela é concedida na fase de projeto e após a construção do edifício e tem a missão de incentivar a conservação e o uso eficiente dos recursos naturais (água, luz, ventilação etc.) nas edificações brasileiras, reduzindo desperdícios e impactos ambientais. Essa etiqueta é uma parceria entre a Eletrobrás (via Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel)) e o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) e foi lançada em 2009 para prédios comerciais, de serviços e públicos e em 2010 ganhou uma atualização de uma versão para residências, apartamentos e edifícios

¹ **Projeteee – Projetando Edificações Energeticamente Eficientes**, primeira plataforma nacional que agrupa soluções para um projeto de edifício eficiente, com intuito de dar continuidade ao trabalho desenvolvido pelo PROCEL/Eletrobrás e a Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

multifamiliares. Para edifícios da administração pública federal direta, autárquica e fundacional, a etiquetagem é obrigatória desde agosto de 2014.

Segundo a Nota Técnica EPE 030/2018, entre 2005 e 2017, o consumo de energia elétrica do setor residencial passou de 83 TWh para 134 TWh, crescimento de 61% no período. Tal crescimento foi fortemente influenciado pela elevação do uso de aparelhos de ar-condicionado, como mostrado na Fig. 1.1. Estima-se que o consumo de energia elétrica por condicionadores de ar no setor residencial tenha aumentado cerca de 237% nos últimos 12 anos, atingindo 18,7 TWh em 2017.

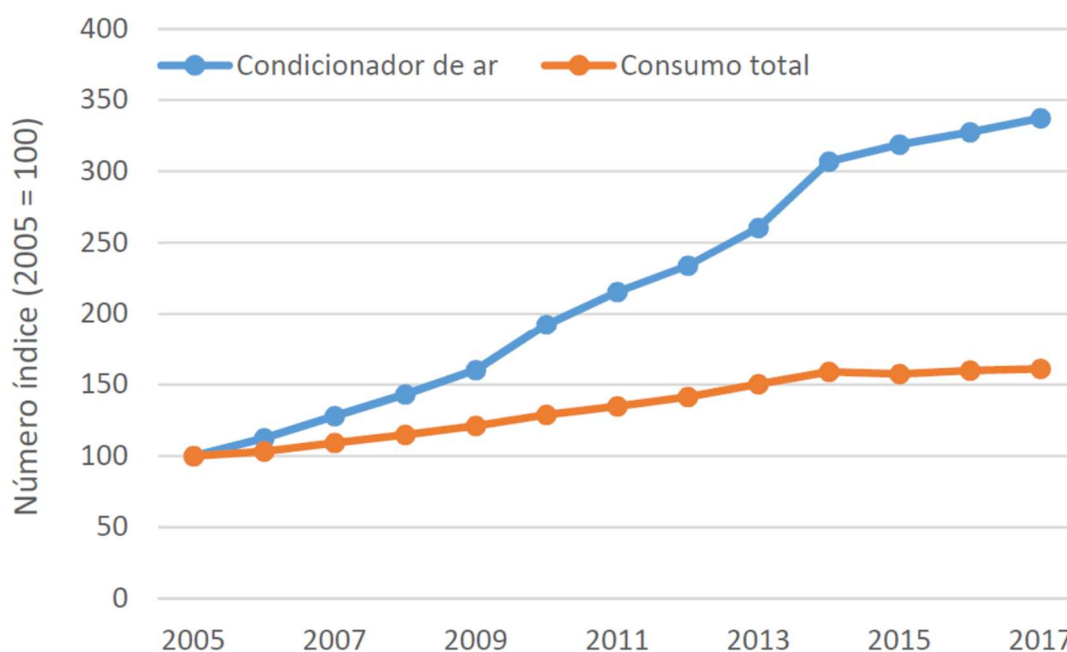


Figura 1.1. Crescimento do consumo de eletricidade total e para condicionamento de ar no setor residencial (2005 = 100) – (Fonte: Elaboração EPE)

Portanto, em busca da redução desses números e consequentemente menos gasto para o consumidor, um dos aspectos considerados em uma edificação sustentável, está a procura por ambientes ventilados naturalmente. Segundo Neves e Roriz (2012), a ventilação natural é uma estratégia importante para o resfriamento passivo de edificações. Em ambientes fechados, as temperaturas internas frequentemente ultrapassam as externas, em decorrência das fontes internas de calor e do aquecimento da envoltória por absorção da radiação solar. Nessas situações, a ventilação natural pode contribuir para o resfriamento do ambiente, substituindo o ar aquecido interno pelo ar mais fresco externo.

A ventilação natural pode ocorrer através da ação direta dos ventos, do efeito chaminé ou da combinação de ambos. Em áreas urbanizadas, a velocidade do vento é sensivelmente reduzida pelos obstáculos locais, tornando o efeito chaminé uma alternativa de projeto mais viável, pois independe

dos ventos (Neves e Roriz, 2012). Assim sendo, as chaminés solares podem proporcionar uma melhoria do movimento do ar em edifícios ventilados naturalmente, utilizando energia solar que é uma fonte renovável e limpa (Abdeen et al., 2019). Além disso, conforme mencionado na EPE 030/2018, o projeto e a correta operação energética do edifício são os principais pilares para o futuro energético.

Destaca-se aqui também a aderência do presente trabalho aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável para os quais a Organização das Nações Unidas – ONU está contribuindo a fim de que se possa atingir a Agenda 2030 no Brasil. Esses objetivos são um apelo global à ação para acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que as pessoas, em todos os lugares, possam desfrutar de paz e de prosperidade. São um total de 17 objetivos, sendo este trabalho mais aderente ao objetivo de número 11 intitulado Cidades e Comunidades Sustentáveis, o qual busca tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis. Essas informações foram retiradas do site oficial da ONU.

1.1. Princípio de Funcionamento de uma Chaminé Solar Anexa a um Ambiente

Para entender o funcionamento de uma chaminé solar é preciso inicialmente conhecer os conceitos de convecção e radiação térmica. De acordo com Bejan (2013), convecção é o estudo dos processos de transporte de calor efetuados pelo escoamento de fluidos sobre superfícies e segundo Howell et al. (2010), radiação térmica é a energia que é transmitida entre os elementos distantes sem exigir um meio entre eles. Também é preciso entender a configuração da chaminé solar que é composta por uma parede de vidro, uma parede absorvedora (normalmente pintada de escuro) e possui uma entrada e saída (boca da chaminé) para controle do escoamento do ar. Além disso, o dispositivo encontra-se anexo a um ambiente que contém uma abertura (janela) permitindo a entrada do ar externo (Khanal e Lei, 2011; Shi et al., 2020).

Dessa forma, o funcionamento da chaminé solar realiza-se através da radiação solar que atravessa a parede de vidro e atinge a parede absorvedora, que conforme o nome já diz, absorve grande quantidade da energia radiante incidente. Consequentemente o ar presente no ambiente, mais frio e portanto mais denso, exerce pressão positiva sobre a entrada da chaminé e o ar mais quente que se encontra no interior da mesma, por tornar-se menos denso, exerce baixa pressão e tende a subir, saindo para a atmosfera pela abertura superior da chaminé, criando correntes de convecção (Khanal e Lei, 2015). Nesse caso a convecção é denominada livre ou natural, que segundo Bejan (2013) é quando o escoamento do fluido é induzido por forças de empuxo

devido à presença de aceleração gravitacional e variações de massa específica de uma camada do fluido para outra.

Segundo Oliveira (2017) as chaminés solares são dispositivos que proporcionam melhorias na ventilação natural e possuem benefícios relacionados ao potencial de aumentar as renovações de ar e o conforto térmico em edificações, permitindo que se o ambiente estiver a uma temperatura amena em virtude da circulação de ar o usuário possa manter o condicionador de ar desligado por mais tempo. Além disso, esses dispositivos não geram ruídos, possuem um baixo custo operacional e não necessitam de energia elétrica (Asadi et al., 2016).

As chaminés solares anexas a um ambiente podem ser de dois tipos: (1) chaminé convencional de parede passiva vertical e (2) chaminé solar de parede passiva inclinada IPWSC (do inglês: *inclined passive wall solar chimney*), podendo ser visualizadas na Fig. 1.2. Essa última, objeto de estudo do presente trabalho, foi proposta por Khanal e Lei (2012) como um novo conceito de chaminé solar. A diferença da IPWSC para a chaminé solar convencional está na articulação presente da base da parede de vidro, permitindo assim que a parede admita diferentes ângulos de inclinação. Os detalhes desse estudo estão apresentados na sequência.

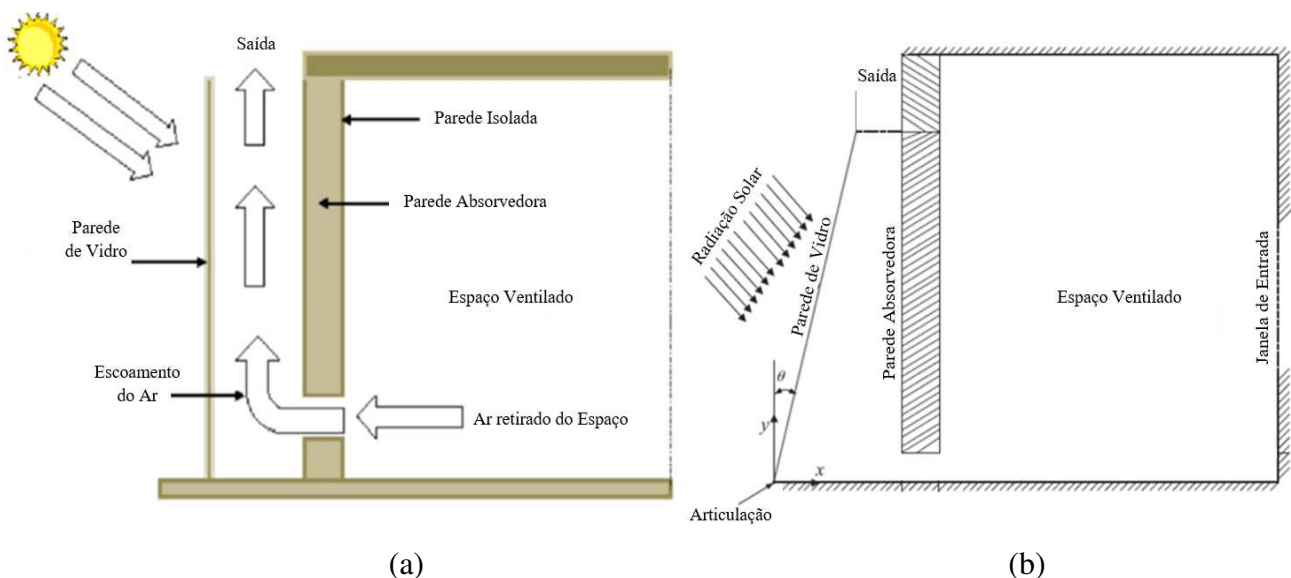


Figura 1.2. Modelos esquemáticos de uma (a) chaminé convencional de parede passiva vertical e (b) de uma IPWSC (adaptado e traduzido de fonte: Khanal e Lei (2011) e Khanal e Lei (2015), respectivamente).

1.2. Estado da Arte

Diversos estudos referentes a chaminés solares vêm sendo realizados ao longo dos anos, mais precisamente a partir da década de 90, a fim de encontrar uma maneira de melhorar a vazão mássica de ar no ambiente conectado à chaminé, bem como proporcionar um adequado nível de conforto

térmico aos usuários. Khanal e Lei (2011) apresentaram uma visão geral das pesquisas que vem sendo realizadas desde então, onde puderam comprovar o uso das chaminés solares como uma excelente estratégia de ventilação passiva para o ganho de ventilação natural e para prover conforto térmico no ambiente. Nesse artigo, os autores também mostram que os pesquisadores costumavam confiar mais em investigações experimentais, porém há uma tendência de utilização de métodos numéricos cada vez mais frequentemente, visto que há uma flexibilidade nos programas, que usam a técnica CFD (do inglês: *Computational Fluid Dynamics*), que permitem várias modelagens de geometria. Por fim, os autores mencionam que apesar das pesquisas contínuas sobre o tema, há alegações contraditórias apresentadas na literatura, indicando que as chaminés solares ainda não são completamente entendidas e necessitam de futuras pesquisas.

Neves e Roriz (2012) desenvolveram previsões teóricas a fim de apresentar e discutir procedimentos estimativos do potencial de uso de chaminés solares para edificações de baixa altura. Para isso utilizaram um modelo matemático e de simulação computacional e realizaram um processo de calibração, utilizando como referência os resultados do monitoramento experimental de uma célula de teste construída na cidade de São Carlos - SP. Os autores concluíram que os modelos teóricos têm potencial de aplicação na avaliação do desempenho de chaminés solares, especialmente o modelo de simulação, em que foram observadas diferenças inferiores a 20% entre resultados medidos e calculados.

Um escoamento reverso foi observado por Khanal e Lei (2012) na saída da chaminé solar convencional de parede vertical quando a espessura da camada limite térmica é menor que a largura da saída de ar da chaminé, tendo como consequência a redução da vazão mássica. Como solução para suprimir este escoamento reverso e aumentar a vazão mássica e consequentemente atingir uma melhor performance na ventilação do ambiente, os autores propuseram um novo conceito de chaminé solar, nomeada chaminé solar de parede passiva inclinada (IPWSC). Para isso, o escoamento no interior da chaminé foi investigado através de um procedimento numérico apoiado por um experimento de visualização do escoamento.

A IPWSC foi experimentalmente estudada por Khanal e Lei (2014), onde sua eficácia foi averiguada através da aplicação de fluxo de calor de 100 a 500 W/m² em um absorvedor de altura igual a 0,7 m, base inferior fixa em 0,1 m e variação de inclinação de 0 a 6°. Os resultados experimentais são sustentados por visualizações de escoamento com cortina de fumaça e radiografias. Nesse estudo, os autores conseguiram identificar que a velocidade do escoamento é fortemente afetada pelo ângulo de inclinação da parede, enquanto que o campo de temperaturas se mostrou insensível a essa variação angular. Também visualizaram um comportamento não usual para os dados

de temperatura na saída da chaminé, tendo como causa a presença de um escoamento reverso ou uma transição para a turbulência, sugerindo investigações futuras para solucionar esse problema. Além disso, demonstraram que a IPWSC apresenta significativas melhoras na taxa de ventilação em comparação com as chaminés convencionais, já que a taxa de escoamento de ar aumenta conforme aumenta o ângulo da parede, alcançando um valor máximo numa certa inclinação. Esse incremento na vazão de ar é atribuído à redução do escoamento reverso que aparece na saída da chaminé.

Uma investigação numérica do escoamento turbulento com convecção natural utilizando também o novo conceito de chaminé solar, a IPWSC, foi realizada por Khanal e Lei (2015), que comprovaram eficiência deste modelo de chaminé no ganho de ventilação natural com alturas maiores que 1 m para a parede do absorvedor. Além disso, o estudo mostrou que o modelo de chaminé sem o ambiente anexo, que é normalmente adotado em estudos de chaminés solares, superestima a vazão mássica se comparado com o modelo de chaminé com o ambiente anexo e recomendam a adoção deste último modelo para determinar a performance pelo fato de ser o mais próximo da realidade, já que as chaminés sempre farão parte do envoltório de uma edificação. O estudo também mostrou que para diferentes fluxos de calor o ângulo de inclinação de 4° é o que melhor ventila o ambiente.

Rajão (2016) realizou um estudo onde comparou a metodologia numérica desenvolvida através do software Fluent com os resultados obtidos por Khanal e Lei (2015) e encontrou uma boa concordância nos valores, recomendando o método para futuras alterações geométricas do dispositivo estudado. O trabalho também avaliou através do método Design Construtal o efeito da razão geométrica W_e/W_g (razão entre abertura de saída da chaminé e a base inferior da chaminé) sobre a vazão mássica obtida no ambiente a ser ventilado e na chaminé solar, considerando o grau de liberdade W_e/H_a (razão entre abertura de saída da chaminé e a altura da parede do absorvedor) e o fluxo de calor constantes, obtendo-se a vazão maximizada de 0,28 kg/s para $(W_e/W_g)_o = 1,0$, sendo 71,6% maior do que o obtido para o caso com pior desempenho, $W_e/W_g = 0,1$. Uma análise também foi realizada considerando uma taxa de transferência de calor constante e o comportamento se manteve semelhante ao modelo no qual foi aplicado um fluxo de calor constante, ou seja, a vazão mássica se manteve maximizada quando $(W_e/W_g)_o = 1,0$.

Viera et al (2017) também fez uso do método Design Construtal, porém para avaliação numérica de um diferente conceito de chaminé solar denominado usina de chaminé solar SCPP (do inglês: *solar chimney power plant*), a qual possibilita transformar energia solar em eletricidade. Os autores avaliaram a influência de alguns parâmetros geométricos na potência da chaminé solar, submetendo a geometria a três restrições: área do coletor, área da turbina e área da chaminé e levando em conta três graus de liberdade, sendo eles R/H (razão entre o raio do coletor e sua altura de entrada),

R_1/H_2 (razão entre raio e altura da chaminé) e H_1/H (razão entre altura da base do coletor e sua altura de entrada), que foi considerado constante e igual a 10,0. Os resultados mostraram que os parâmetros geométricos do coletor e da chaminé devem ser avaliados de forma combinada, além de os mesmos apresentarem uma forte influência sobre a potência disponível. Também foi notada uma grande sensibilidade da temperatura do solo sobre a potência disponível e os efeitos geométricos.

A Figura 1.3 ilustra como ocorre o princípio de funcionamento de uma chaminé solar SCPP através dos seguintes passos: 1 – incidência da radiação solar sobre o material que transmite energia radiante do coletor; 2 – incidência da energia radiante sobre o solo e mudança no comprimento de onda da onda eletromagnética incidente; 3 – retenção da energia radiante entre o solo e o coletor; 4 – aquecimento do solo; 5 – aquecimento do ar sobre o solo movimentando o mesmo em direção a uma turbina eólica e a saída da chaminé, que está a uma pressão mais baixa (convecção natural); 6 – sucção de nova massa de ar frio através da entrada do coletor devido a pressão de sucção causada pelo empuxo na região do solo; 7 – passagem do escoamento sobre uma turbina eólica convertendo energia do vento em energia mecânica e, posteriormente, elétrica.

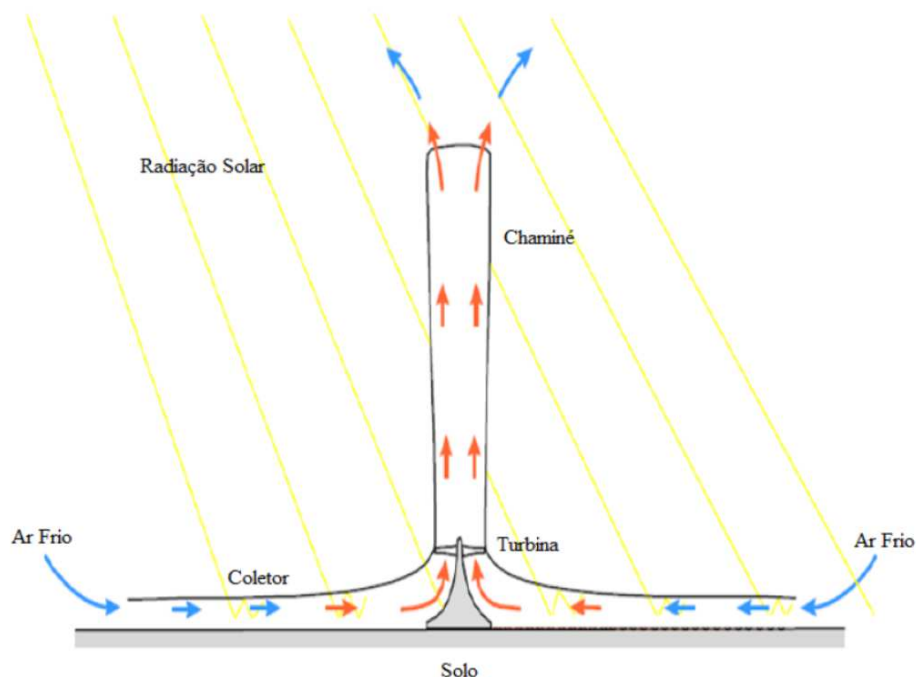


Figura 1.3. Configuração bidimensional de chaminé solar SCPP (adaptado e traduzido de fonte: Dhahri e Omri (2013)).

Um estudo realizado no inverno no Egito, Serageldin et al. (2018), propõe uma otimização da chaminé solar acoplada a um trocador de calor solo-ar a fim de aquecer o ambiente interno. Os resultados encontrados mostraram que o ângulo de inclinação ideal está no intervalo de 30 a 35°, a altura no intervalo de 1,94 a 1,97 m, a largura entre 0,92 e 0,97 m e a abertura do ar entre 0,19 e 0,23

m. Também realizou análises de sensibilidade onde identificou que o diâmetro do tubo do trocador solo-ar é o parâmetro de maior influência, seguido pela altura da chaminé e altura e posição do tubo do trocador.

Abdeen et al. (2019), realizou um estudo experimental e numérico na estação quente também no Egito com o objetivo de ganho de conforto térmico no ambiente anexo, para uma configuração conforme ilustração da Fig. 1.4. Os autores encontraram como melhor configuração uma chaminé solar de 1,85 m de altura, 2,65 m de largura, ângulo de inclinação de 75° e abertura da entrada do ar de 0,28 m. Além disso, observou, através de análises de sensibilidade, que a largura da chaminé é o parâmetro de maior influência e a altura da mesma possui um efeito negligenciável. Também, comprovou a eficácia da configuração encontrada aplicando valores médios de radiação solar de 500, 750 e 850 W/m², obtendo 0,28, 0,47 e 0,52 m/s de velocidade do ar no ambiente interno, o que garante o ganho de conforto térmico para os ocupantes.

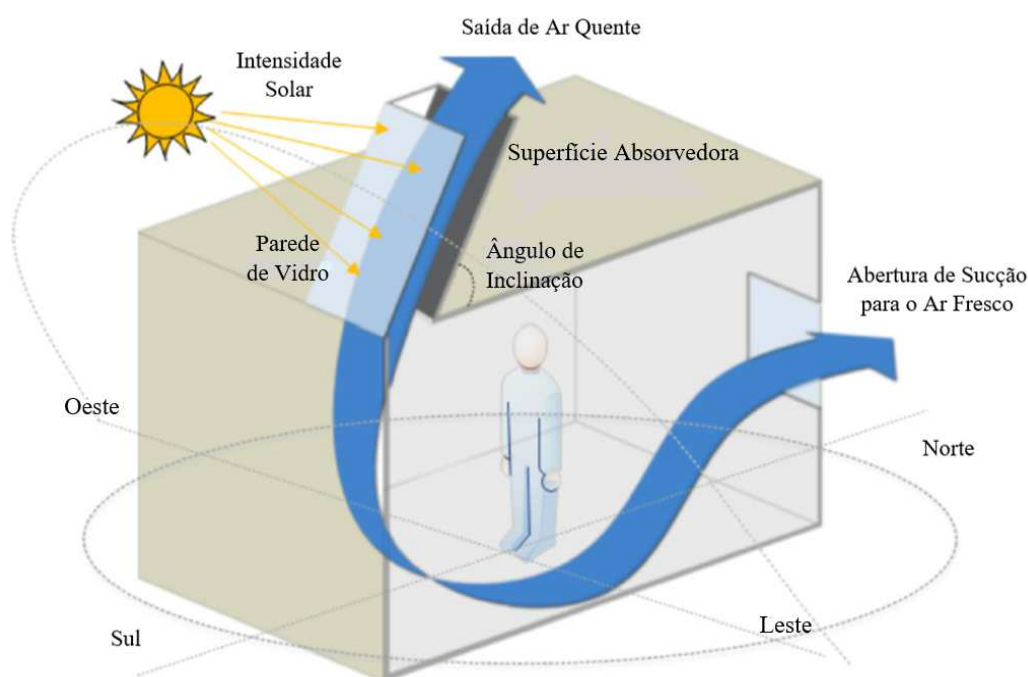


Figura 1.4. Esquema de ventilação natural realizada pela chaminé solar em um domínio tridimensional utilizado por Abdeen et al. (2019) (adaptado e traduzido).

Uma chaminé solar de duplo propósito para ventilação e geração de energia foi analisada por Layeni et al. (2020). O principal objetivo do estudo foi determinar a viabilidade do sistema proposto face a velocidade do escoamento de ar dentro da sala para ventilação adequada e dentro da chaminé solar para a velocidade necessária para alimentar uma turbina eólica de pequeno porte. As simulações foram realizadas no Fluent em um domínio de análise bidimensional (sala com 16 m² e uma chaminé

em forma de L com alturas variando de 5 a 9 m e vão de 0,5 a 1,0 m). Os autores observaram um aumento na vazão mássica de 5,70 kg/s para 9,12 kg/s na altura da chaminé de 5 m e 9 m, respectivamente, com um fluxo de calor de 400 W/m². As potências por unidade de área obtidas para esse mesmo fluxo de calor para as alturas de 5 m e 9 m foram de 32,8 W/m² e 85,2 W/m², respectivamente. Os resultados apresentados auxiliam no layout e no estabelecimento dos fundamentos de um sistema de chaminé solar usado para fins combinados de ventilação passiva e geração de energia em um edifício.

Um estudo apresentando o primeiro projeto mundial de chaminé solar para um edifício real, considerando a economia de energia e a segurança contra incêndios foi realizado por Shi et al. (2020). A maquete utilizada no estudo foi construída em um software denominado Simulador de Dinâmica de Fogo – FDS (do inglês: *fire dynamics simulator*) e está apresentada na Fig 1.5. Os autores investigaram fatores de projeto típicos em ambas as funções por uma ferramenta numérica depois de validada por experimentos. Dentre as várias conclusões desse estudo, uma delas é que os vãos de cavidades obtidos em pesquisas anteriores não são aplicáveis quando uma chaminé solar é adotada para um grande espaço. Considerando os modos de ventilação natural e exaustão de fumaça e o intervalo investigado de 0,1 m a 1,6 m, o vão ótimo para a cavidade é de 1,2 m. Os autores também concluíram que a chaminé solar pode ser adotada para ambas as funções com 7,42 renovações de ar por hora de ventilação natural em condições normais e extensão de pelo menos 6,52 vezes do tempo de saída seguro disponível para ocupantes em condições típicas de incêndio.

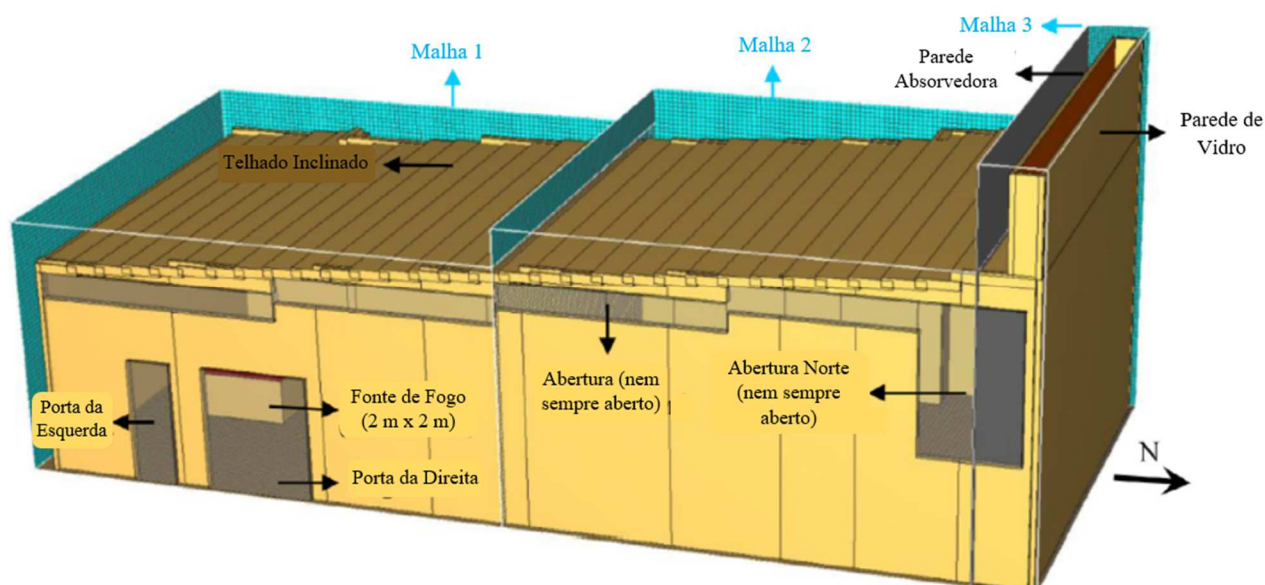


Figura 1.5. Maquete numérica da sala construída no estudo de Shi et al. (2020) (adaptado e traduzido).

Um trabalho mais recente realizado por Zhang et al. (2021) apresentou que há uma extensa literatura evidenciando a chaminé solar como uma excelente estratégia de ventilação passiva usada para aumentar a ventilação natural e fornecer conforto térmico. Nesse estudo os autores abordaram desde uma listagem de fatores que influenciam na performance de uma chaminé solar, principais indicadores para avaliar seu desempenho, até a diversidade de sistema passivos que podem vir a ser combinados com uma chaminé solar. Além disso, potenciais tendências e desafios do uso das chaminés solares são apresentados, como por exemplo o desenvolvimento de pesquisas com aplicação de chaminés solares em espaços com mais de um ambiente ou em edifícios de vários andares.

Apesar das várias investigações e pesquisas sobre chaminés solares presentes na literatura, a grande maioria em busca de otimização da geometria para ganhos de vazão mássica e conforto térmico, ainda há poucos estudos que tratem a respeito da IPWSC, especialmente buscando por uma investigação geométrica através da aplicação do método de Design Construtal e analisando mais de um grau de liberdade para o problema. Dessa forma o presente trabalho pretende apresentar um estudo numérico sobre a influência de determinados parâmetros geométricos sobre o comportamento do escoamento no ambiente anexo, de forma a encontrar a máxima vazão mássica.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar numericamente a influência da configuração geométrica, com até 3 graus de liberdade, sobre o desempenho de uma IPWSC anexa a um ambiente aplicando o método Design Construtal.

1.3.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos que pretendem ser alcançados com esse estudo são:

- Desenvolver modelagem matemática e numérica para representar a chaminé IPWSC anexa a um ambiente e verificar com os resultados apresentados na literatura;
- Avaliar o efeito da razão W_e/W_g (razão entre abertura da saída da chaminé e a base inferior da mesma) sobre a vazão mássica ($\dot{m}$) no ambiente;
- Avaliar o efeito da razão W_g/H_a (razão entre base inferior da chaminé e altura da mesma) sobre a vazão mássica uma vez maximizada ($\dot{m}_m$) e a razão $(W_e/W_g)_o$ uma vez otimizada, $(W_e/W_g)_o$;
- Avaliar os efeitos das razões $(W_e/W_g)_{2o}$ e $(W_g/H_a)_o$ para diferentes valores de H_i/H_a .

1.4. Delineamento do Trabalho

O texto está delineado em seis capítulos, de maneira que esse primeiro capítulo abordou a motivação para o estudo, os objetivos, o princípio de funcionamento das chaminés solares e o estado da arte dos trabalhos realizados até o momento referente ao tema. O segundo capítulo é dedicado à fundamentação teórica, ou seja, a base para elaboração deste trabalho, explicando um pouco de ambientes climatizados, ilustrando algumas aplicações práticas de chaminés solares e apresentando a fundamentação e aplicabilidade do método Design Construtal.

Na sequência, o capítulo três é destinado à modelagem matemática, onde serão apresentados as equações governantes, o software e método que serão utilizados para resolução do modelo físico. Nesse capítulo também é descrito o problema a ser estudado, condições de contorno admitidas e a aplicação do Design Construtal, informando o indicador de performance, as restrições do problema e os graus de liberdade que serão utilizados. O capítulo quatro apresenta os procedimentos numéricos adotados, a verificação do modelo computacional e os estudos dos testes de independência de malha e de passo de tempo.

Os resultados e discussões são apresentados no capítulo cinco, onde é avaliado o efeito dos parâmetros geométricos sobre a vazão mássica na chaminé solar. E por fim, o capítulo seis destina-se às conclusões apresentando qual a melhor configuração geométrica da chaminé que atenda o objetivo da pesquisa, além de incluir propostas de continuidade desse estudo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Ambientes Climatizados

Segundo Marè (2010), apesar da capacidade de tolerância e adaptação do ser humano, as edificações, tanto comerciais quanto residenciais, devem proporcionar qualidade do ambiente interno durante sua vida útil, com o uso racional dos recursos naturais, de modo a preservar a saúde, o bem estar e o bom desempenho de seus usuários em suas diversas atividades. A qualidade do ambiente interno está associada a diversos fatores como conforto térmico, conforto lumínico, conforto acústico, qualidade do ar interior, ergonomia, estética e segurança (Spengler e Chen, 2000). Segundo a ANSI/ASHRAE 55 (2013), conforto térmico é um estado de espírito que reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve a pessoa. Se o balanço de todas as trocas de calor a que está submetido o corpo for nulo e a temperatura da pele e o suor estiverem dentro de certos limites, pode-se dizer que o homem sente conforto térmico.

O método utilizado pela ANSI/ASHRAE 55 (2013) para avaliar o conforto térmico em ambientes ventilados naturalmente onde os ocupantes possuem uma gama maior de oportunidades adaptativas, interagindo com o ambiente em resposta às suas sensações e preferências térmicas está apresentado na Fig. 2.1. O gráfico apresenta no eixo y a temperatura operativa do ambiente interno e no eixo x a temperatura média do ar no ambiente externo. Quando essas duas variáveis se encontram na faixa do centro (cor cinza), significa que 90% das pessoas estão em condições de conforto; quando esse encontro se dá nas faixas extremas (cor azul), indica uma condição na qual 80% dos ocupantes está em conforto. Para fazer a avaliação de conforto através desse gráfico não é necessário considerar o nível de vestimenta, nem os valores de umidade e velocidade do ar (ANSI/ASHRAE, 2013; Gaviria, 2012).

No Brasil não existem normas específicas para a avaliação de conforto térmico, se restringindo à Norma Regulamentadora NR 17 – Ergonomia (NR 17, 1990), e à parte 2 da NBR 16401 – Instalações de ar-condicionado – sistemas centrais e unitários (ABNT, 2008), mais restrita a ambientes climatizados artificialmente e com rígido controle de velocidade e umidade relativa do ar. Em um estudo mais recente, Lamberts et al. (2013) elaboraram uma proposta para uma nova norma de conforto térmico brasileira com base no texto proposto pela ANSI/ASHRAE 55 (2013), incluindo a avaliação de conforto térmico em ambientes ventilados naturalmente. Este documento já foi editado e incorporado à parte 2 da NBR 16401 (versão 2021) e atualmente aguarda a abertura para consulta pública e posterior publicação.

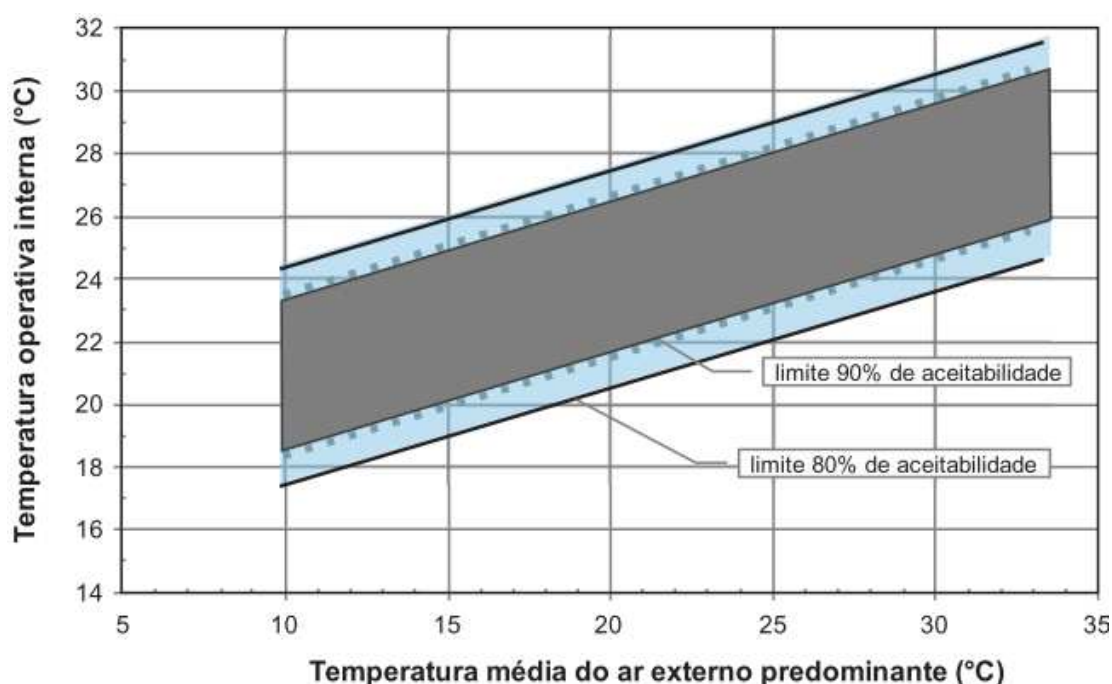


Figura 2.1. Faixas aceitáveis de temperatura para ambientes ventilados naturalmente. (Fonte: ANSI/ASHRAE (2013)).

De acordo com a nova proposta da NBR 16401 (versão 2021), como existem grandes variações fisiológicas e psicológicas entre as pessoas, é muito difícil satisfazer a todos em um mesmo ambiente. Por esse motivo, pode-se afirmar que as condições ambientais que resultam em conforto térmico não são as mesmas para todos. Em seu estudo, Lamberts et al. (2013) menciona que com base na ampla variedade de condições climáticas encontradas no Brasil, as diferenças em termos de aceitação térmica não são surpreendentes. Estudos anteriores tentaram compreender os limites de temperatura que os ocupantes considerariam aceitáveis em edifícios com ventilação natural. Como esperado, existe uma variação significativa em termos de temperaturas aceitáveis. Por exemplo, no Sul do Brasil, a aceitabilidade pode ser encontrada na faixa de 14°C a 24°C (Lazarotto e Santos, 2007) enquanto no Nordeste esses valores podem ser facilmente estendidos de 24,5°C a 32°C sem comprometer o conforto térmico dos ocupantes (Araújo, 1996).

A forma como o corpo humano se comporta diante de situações climáticas tem uma forte interferência no bem-estar das pessoas. De acordo com Camargo e Furlan (2011), condições térmicas ambientais desfavoráveis que ocasionam situações de estresse térmico influenciam no desempenho das atividades humanas e, em certos casos, geram grandes tensões no trabalho, pois podem causar, além do desconforto, fadiga, sonolência, risco de acidentes e ainda sérios danos à saúde. Sabendo disso, é imprescindível que qualquer projeto seja otimizado para a climatização de ambientes e esteja pronto para receber as pessoas de maneira agradável, tanto em espaços comerciais quanto em

residências. Um ambiente pode ser climatizado de várias maneiras, podendo ser através do uso de equipamentos, tecnologias e métodos construtivos desde a concepção do projeto até adequações em ambientes já construídos. Como exemplos pode-se citar as soluções mais comuns, como os condicionadores de ar, ventiladores, pisos aquecidos, estufas, lareiras, utilização de brises nas construções, etc até soluções sustentáveis como construção de telhados verdes e a utilização de chaminés solares (Gaviria, 2012; Marè, 2010; plataforma Projeteer).

As chaminés solares, tema do estudo em questão, são um sistema de ventilação passiva e que fazem uso da radiação solar para gerar movimento do ar no ambiente, ou seja, gerar ventilação natural e consequentemente aumentar a qualidade do ar e o conforto térmico (Gaviria, 2012). De acordo com Spengler e Chen (2000), comparados aos sistemas de ventilação mecânica, os sistemas de ventilação natural consomem pouca energia, requerem pouca manutenção, possuem baixos custos iniciais e são ecologicamente corretos. Zhang (2021), apresenta conforme mostrado na Fig. 2.2, parâmetros de controle usados para avaliar o desempenho dos sistemas de ventilação passiva. Segundo sua pesquisa, existem dois parâmetros principais usados para avaliar e caracterizar a eficiência dos sistemas de ventilação passiva das perspectivas do comportamento do escoamento: eficiência da troca de ar e eficácia da ventilação. Dentro do parâmetro eficiência da troca de ar está a medida da vazão mássica, grandeza que será monitorada nesse trabalho, onde será possível investigar a quantidade de ar que atravessa a chaminé por unidade de tempo.

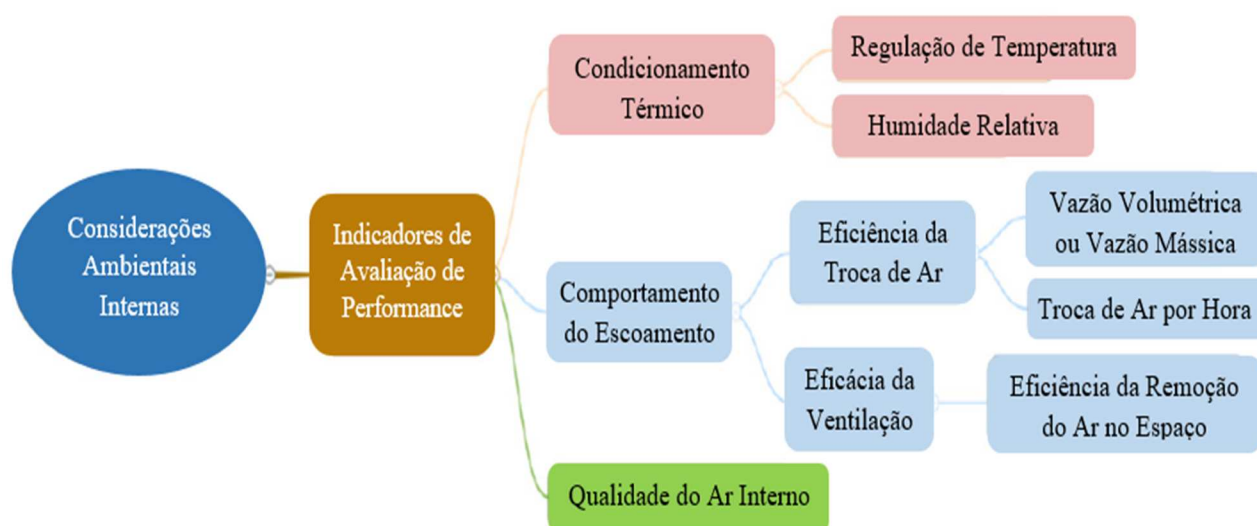


Figura 2.2. Indicadores de performance para avaliar sistemas de ventilação passiva (Fonte: adaptado de Zhang (2021)).

2.2. Aplicações Práticas de Uso de Chaminés Solares

Existem vários tipos de chaminés solares destinadas a diversas finalidades, desde a utilização para secagem de grãos, frutas e madeiras, para transformação da energia solar em eletricidade e para melhora da ventilação e conforto térmico em ambientes construídos (Ferreira et al., 2008; Chaga et al., 2013; Vieira et al., 2017; Kiwam et al., 2018; Khanal e Lei, 2015). No Brasil, Chaga et al. (2013) e Ferreira et al. (2008) apresentaram pesquisas onde estudaram a viabilidade da utilização da chaminé solar para secagem de grãos de café e frutas, respectivamente. O primeiro autor fez a construção de seu protótipo no estado do Espírito Santo e o segundo no estado de Minas Gerais e ambos autores concluíram que a chaminé solar é um dispositivo tecnicamente viável para a secagem de alimentos, principalmente grãos. Na Figura 2.3 pode ser visto o protótipo que foi construído por Ferreira et al. (2008).

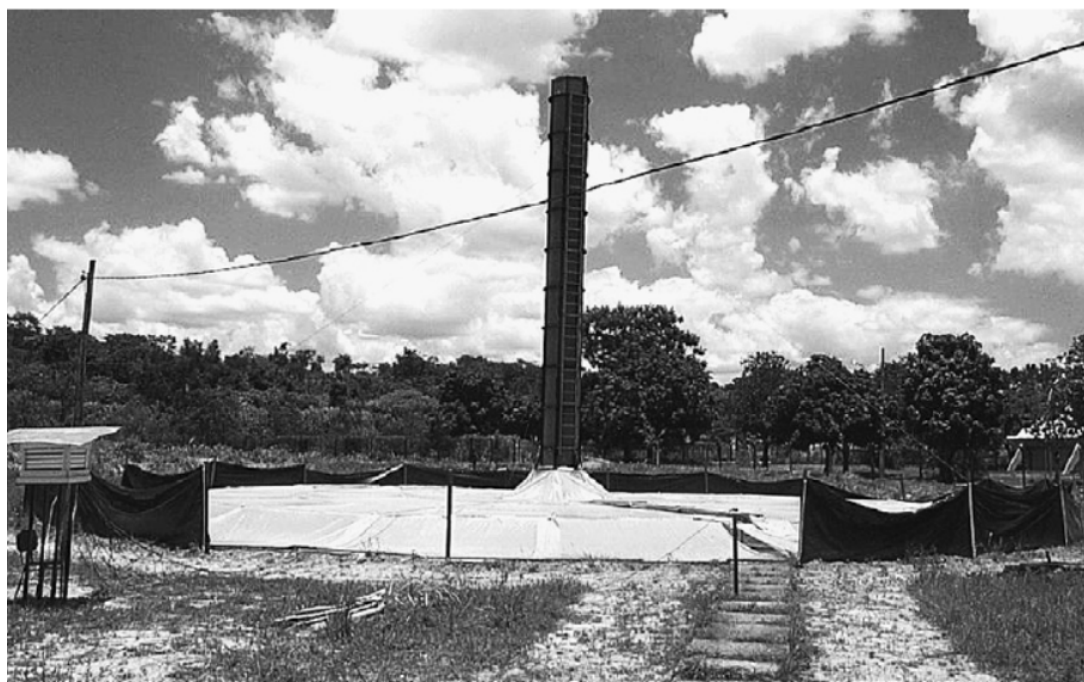


Figura 2.3. Protótipo de chaminé solar para secagem de frutas construído por Ferreira et al. (2008).

A chaminé solar com a finalidade de transformar energia solar em eletricidade é denominada de usina de chaminé solar SCPP e é composta por três elementos essenciais, sendo eles: o coletor, a chaminé e as turbinas. Diversos estudos têm sido feitos com o objetivo de maximizar a potência da chaminé, como o de Vieira et al. (2017) já mencionado no capítulo anterior, onde o autor utiliza o método Design Construtal e identifica a forte influência dos parâmetros geométricos do coletor e da chaminé sobre a potência disponível. Já Kiwam et al. (2018) introduziu uma nova perspectiva para a usina de chaminé solar, estudando sua capacidade de produzir água destilada de uma área aberta no

coletor simultaneamente com a produção de energia elétrica. O autor concluiu que o novo sistema proposto melhorou significativamente a eficiência diária, além de ser economicamente mais viável, já que para o mesmo custo inicial, o sistema proposto pode produzir água destilada e eletricidade enquanto que o sistema convencional só pode produzir eletricidade.

Por fim e como foco do trabalho em questão estão as chaminés solares anexas a ambientes construídos com a finalidade de proporcionar qualidade do ambiente interno, com o ganho de ventilação natural, gerando conforto térmico e melhorando a qualidade do ar. Como engenheiros e arquitetos é importante avaliar a viabilidade da utilização desse dispositivo em edifícios reais, estejam eles já construídos ou em fase de projeto. De acordo com Gaviria (2012), algumas estratégias de condicionamento podem criar complicações quando integradas em um edifício real, devido à necessidade de se fazer mudanças significativas na configuração do espaço. No caso dos edifícios que utilizam chaminés, é necessário considerar sua presença desde as primeiras etapas do projeto, sendo que elas têm um grande protagonismo na aparência final do prédio. A seguir serão apresentados três exemplos de edifícios que utilizam o recurso de chaminés solares para manter seus ambientes adequadamente climatizados.

O primeiro deles apresentado na Fig. 2.4 é o *Building Research Establishment*, conhecido como BRE Building, construído na cidade de Watford na Inglaterra no ano de 1996. Trata-se de um centro de ciência da construção que abriga escritórios e também é sede de conferências. O edifício possui 3 andares e foi construído em uma área de 2.932 m² aproximadamente, tendo 2.040 m² de área bruta e 1.470 m² de área útil. De acordo com a avaliação de aceitação dos usuários, apresentada na Fig. 2.5, o prédio possui uma boa pontuação em termos de imagem, design, conforto e atendimento às necessidades dos ocupantes, sendo a qualidade do ar o maior problema tanto no inverno quanto no verão. As informações foram retiradas do projeto "EULEB - Edifícios europeus de baixa energia e alta qualidade" (do inglês: *European High Quality Low Energy Buildings*), que fornece informações sobre edifícios públicos não residenciais de alta qualidade e baixa energia existentes em toda a Europa.

A segunda edificação que faz uso de chaminés solares é a *Lycée Français Charles De Gaulle*, que são instalações escolares com sua construção concluída no ano de 2008 na cidade de Damasco, na Síria, possuindo área construída de 4.995 m² e 10.000 m² de área total de terreno. Os prédios sírios, mostrados na Fig. 2.6, são tipicamente estruturas de dois andares compostos por duas salas de aula, uma chaminé solar própria e um pátio, que permite acesso a um pequeno, exuberante e protegido jardim. O jardim cria o microclima, alimentando o ar fresco do sistema de ventilação através de tubos de PVC, feitos para circular por meio da corrente ascendente criada pelas chaminés solares. Esse

conjunto de prédios escolares foi indicado para o Prêmio Aga Khan de Arquitetura no ciclo 2011-2013, sendo as informações acima retiradas no site oficial dessa premiação.



Figura 2.4. Chaminés Solares construídas no BRE Building – Inglaterra (Fonte: Projeto EULEB).

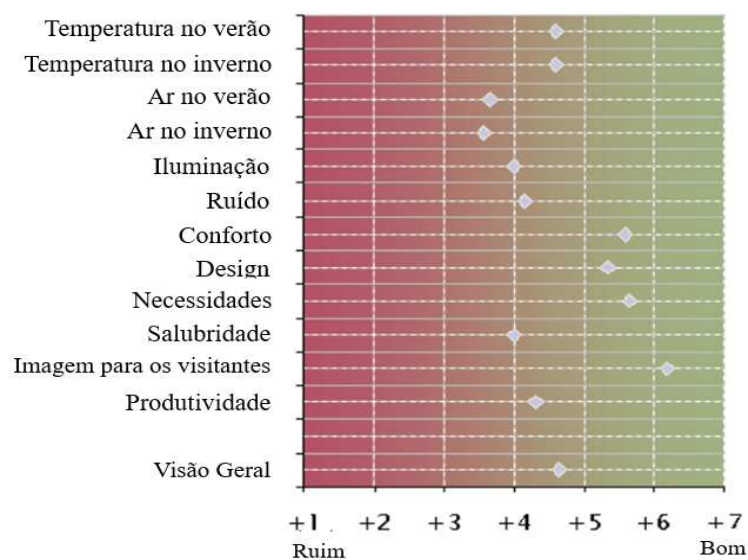


Figura 2.5. Avaliação de aceitação dos usuários para o BRE Building (Fonte: Projeto EULEB).



Figura 2.6. Vista das chaminés solares da escola *Lycée Français Charles De Gaulle* – Síria (Fonte: Prêmio Aga Khan de Arquitetura ciclo 2011-2013).

As chaminés solares também estão presentes no edifício denominado Harlequin 1 construído entre os anos de 2008 e 2010 em Londres na Inglaterra, conforme mostrado na Fig. 2.7. O prédio abriga a nova sede da *British Sky Broadcasting* – BSkyB, uma rede de TV britânica, fundada pela radiodifusão entre a *British Satellite Broadcasting* e a *Sky Television* que transmite seu conteúdo para todo o Reino Unido e Irlanda. Ele contém instalações de gravação, pós-produção e transmissão da *Sky* e o departamento de notícias de esportes. O edifício Harlequin 1 define uma referência internacional para a arquitetura sustentável em ambientes de radiodifusão. As gigantes chaminés de ventilação natural dos estúdios de gravação são reveladas no exterior. O Harlequin 1 captura cada recurso natural viável no terreno, e radicalmente minimiza o consumo de energia por toda parte. Há oito estúdios naturalmente ventilados, escritórios para 1370 pessoas, e salas de dados livres de refrigeração para mais de 400 servidores. As informações apresentadas foram retiradas do site de arquitetura ArchDaily.



Figura 2.7. Harlequin 1 – Inglaterra (Fonte: site de arquitetura ArchDaily).

2.3. Design Construtal

No ano de 1996, Adrian Bejan, professor romeno-americano, desenvolveu a Teoria Construtal após se questionar se os designs que surgiam na natureza seriam mesmo obra do acaso ou se existiria um princípio físico por detrás deles. Então criou um novo entendimento dos fenômenos evolutivos e a singularidade da natureza, oferecendo uma nova teoria para a história da Terra e sobre o que significa estar vivo (Bejan e Zane, 2012). De acordo com Bejan e Lorente (2008), a geração da configuração dos sistemas de fluxo/escoamento é vista como um fenômeno físico, e o princípio que resume sua ocorrência universal na natureza é determinístico. Dessa forma, de acordo com os mesmos autores, a Teoria Construtal rejeita as ideias da filosofia natural clássica de que as coisas aconteciam na natureza ao acaso, de forma aleatória.

A Teoria Construtal é a visão mental de que a geração das estruturas de fluxo/escoamento vistas em toda parte na natureza (bacias hidrográficas, pulmões, circulação atmosférica, tecidos vascularizados etc.) pode ser fundamentada com base em um princípio evolutivo de maximização do acesso ao fluxo/escoamento no tempo (Bejan e Lorente, 2008). Esse princípio é a Lei Construtal, que afirma que “Para um sistema de dimensões finitas continuar existindo (viver), sua configuração deve evoluir de modo que facilite o acesso das correntes que fluem/escoam através dele” (Bejan, 2000;

Bejan e Lorente, 2008). Portanto, todo sistema vivo na Teoria Construtal é um sistema que possui algum fluxo/escoamento, sendo necessário entender para cada caso o que é preciso para facilitar as correntes, ou seja, o que preciso para manter o sistema existindo (Bejan, 2016).

A Lei Construtal faz muito mais que explicar os designs vistos na natureza, ela articula uma lei que pode ser usada para entender porque designs emergem e para prever como eles evoluirão no futuro (Bejan e Zane, 2012). Todas as estruturas na natureza estão em constante mudança e movimento em busca do propósito de se manterem vivas, ou seja, buscando sempre a melhor disposição para manter o fluxo/escoamento acontecendo e, portanto, existindo. Uma das estruturas que podem ser explicadas através da Lei Construtal são as estruturas em forma de árvore, que estão por toda parte nos sistemas de fluxo/escoamento vistos na natureza (Bejan e Zane, 2012). Exemplos da aplicação desse princípio físico, tanto para previsão de um design futuro quanto como estruturas de fluxo em forma de árvore, estão apresentados nas Figs. 2.8 e 2.9, respectivamente.

Segundo Bejan (2016), de acordo com a Lei Construtal a vida é um movimento que evolui livremente, nas esferas animada e inanimada. Vivas estão todas as configurações e ritmos de fluxo/escoamento que mudam livremente de maneira a oferecer maior acesso ao movimento. Quando o movimento deixa de existir, a vida acaba. Quando o movimento não tem a liberdade para mudar e encontrar maior acesso, a vida acaba.

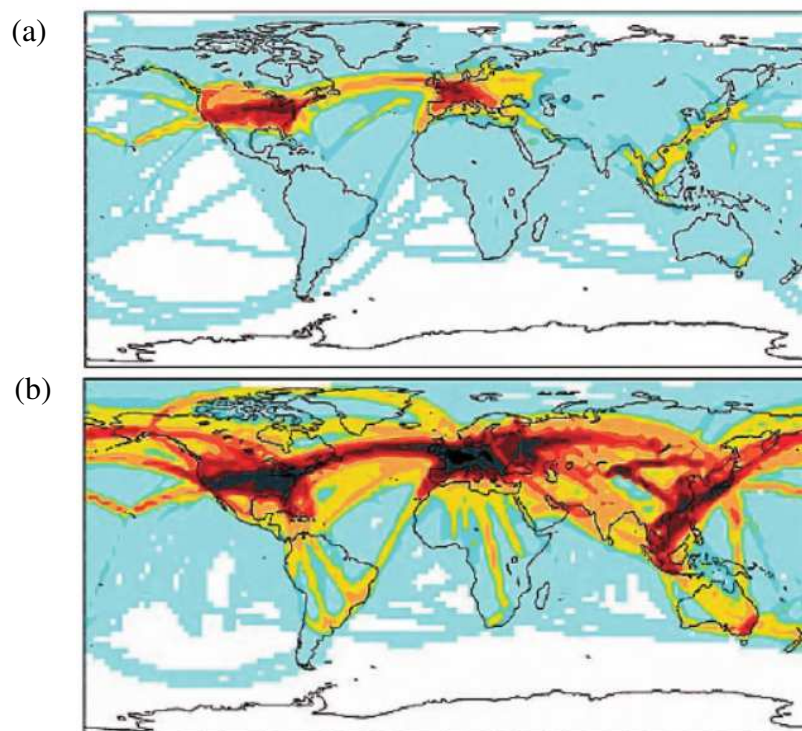


Figura 2.8. (a) Onde aeronaves voavam em 1992 e (b) onde irão voar em 2050 (Fonte: Bejan e Lorente (2008)).

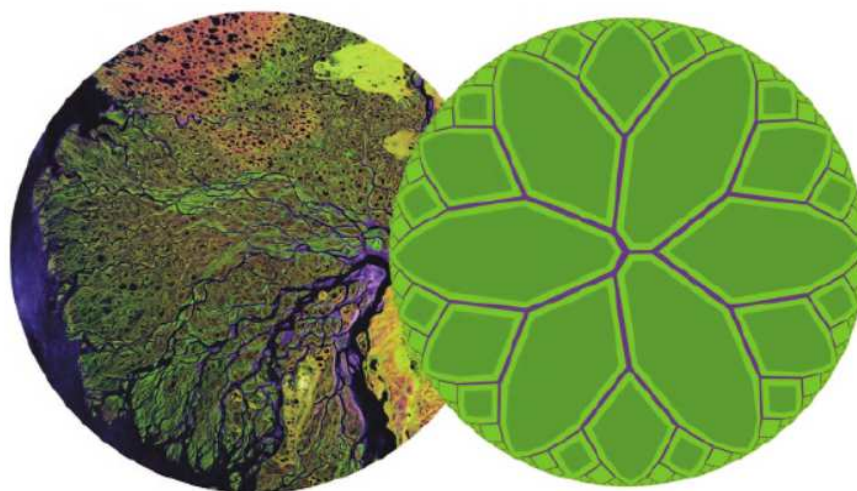


Figura 2.9. Padrão de fluxo na natureza – lado esquerdo: delta do rio Lena na Sibéria – lado direito: a arquitetura construtiva em árvore que conecta o centro às pontas do perímetro do disco (Fonte: Bejan e Lorente (2008)).

Dessa forma, os projetos e sistemas em engenharia podem se beneficiar da Lei Construtal de maneira que se faça com que os mesmos evoluam de acordo com esse princípio físico, aplicando então o método Design Construtal. Para aplicação desse método, recentes estudos (Fagundes et al., 2019; Magalhães et al., 2020) apresentaram um fluxograma das principais etapas do processo, onde os dois primeiros passos são definir o sistema e identificar o escoamento, em seguida entender o propósito do sistema, ou seja, detectar o seu parâmetro de desempenho. Na sequência é preciso identificar as restrições e os graus de liberdade para mudança da geometria e por fim selecionar como o problema será solucionado (métodos numéricos, analíticos) e calcular o parâmetro de desempenho, obtendo as geometrias que permitem o melhor desempenho do sistema. A Figura 2.7 apresenta um fluxograma adaptado para o presente estudo com base nos trabalhos desses autores.

A Lei Construtal é revolucionária porque é uma lei da física – não apenas da biologia, hidrologia, geologia, geofísica ou engenharia. Ela governa qualquer sistema, a qualquer tempo, em qualquer lugar, abrangendo fenômenos inanimados (rios e raios), animados (árvores, animais) e fenômenos de engenharia (tecnologia), bem como os fluxos/escoamentos em evolução de construções sociais como conhecimento, idioma e cultura. Todos designs crescem e evoluem de acordo com a mesma lei (Bejan e Zane, 2012). A Teoria Construtal possui uma vasta aplicabilidade e estudos em diversas áreas de conhecimento vem sendo desenvolvidos utilizando essa teoria, como exemplo se pode citar projetos de avaliação de cavidades em corpos sólidos para resfriamento de dispositivos eletrônicos (Vianna et al., 2018; Hajmohammadi., 2017; Gonzales et al., 2015), projetos na área de hemodinâmica (Dutra et al., 2020), projetos de design de rotas de evacuação (Lui et al., 2013),

projetos de dispositivo conversor de energia das ondas do mar (Martins et al., 2018; Gomes et al., 2018; Lima et al., 2017), projetos de estruturas em engenharia (Troina et al., 2020; Lima et al., 2020; Silveira et al., 2017; Correia et al., 2013), entre outros.

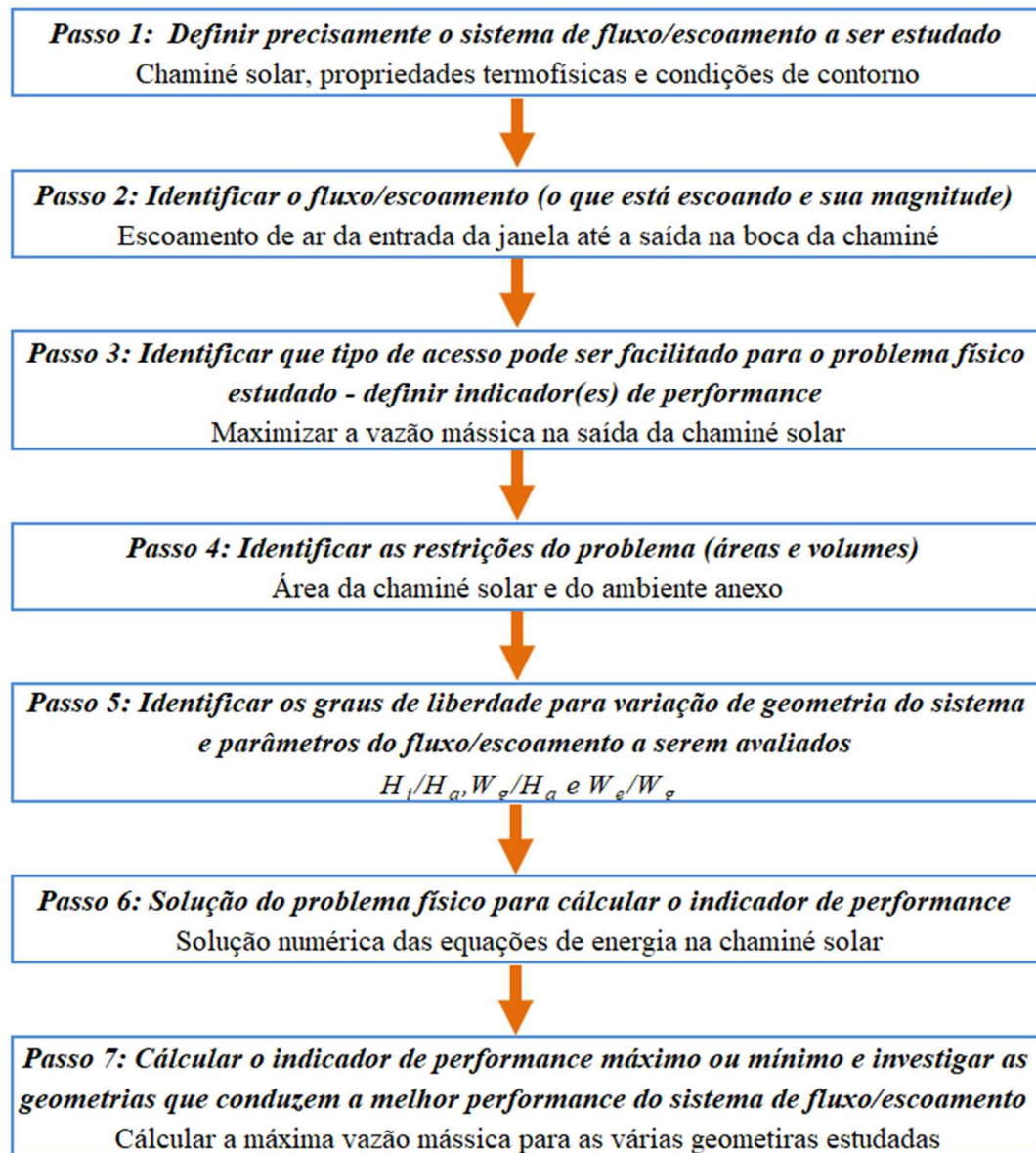


Figura 2.10. Fluxograma dos principais passos de aplicação do método Design Construtal.
(adaptado de fonte: Fagundes et al., 2019; Magalhães et al., 2020).

No presente trabalho o método do Design Construtal será utilizado para avaliação de uma chaminé solar de parede passiva inclinada anexa a um ambiente construído de maneira que seja possível fazer a investigação do efeito das razões geométricas sobre a vazão mássica, sendo esse o parâmetro de desempenho a ser avaliado ao longo das simulações. A aplicação do método será melhor explicada no capítulo a seguir.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA

3.1. Equações de Conservação

Para a solução do modelo matemático são assumidas as mesmas hipóteses simplificativas adotadas por Khanal e Lei (2015): o escoamento é admitido como sendo incompressível e turbulento, regime transiente, em um domínio bidimensional, sem radiação térmica e as propriedades termo físicas são mantidas constantes, exceto a massa específica. A variação desta propriedade é realizada de acordo com a aproximação de Boussinesq, onde a força de campo varia como uma função do campo de temperaturas, pois essa variação é que induz o movimento do fluido, ou seja, está sendo considerado um caso de convecção natural neste problema. Para o tratamento da turbulência, é considerada a modelagem clássica da turbulência, onde uma média temporal é aplicada em todo o domínio. O modelo padrão de turbulência $k-\varepsilon$, será o adotado para reproduzir a turbulência do ar na chaminé. Dessa forma, as equações governantes médias no tempo a serem resolvidas para o presente problema assumem a seguinte forma (Bejan, 2013):

Equação da conservação da massa:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

Equação da conservação da quantidade de movimento em x :

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right] = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) \quad (3.2)$$

Equação da conservação da quantidade de movimento em y :

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right] = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) + \rho g \beta (T - T_0) \quad (3.3)$$

Equação da conservação de energia:

$$\left[\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \right] = (\alpha + \alpha_t) \left(\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial y^2} \right) \quad (3.4)$$

As equações da viscosidade e difusividade térmica turbulentas são dadas por (Launder and Spalding, 1972):

$$\mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (3.5)$$

$$\alpha_t = \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \quad (3.6)$$

Nas Eqs. (3.1) a (3.6), $(\bar{\cdot})$ representa o operador média temporal, x e y representam as coordenadas horizontal e vertical, respectivamente; $\bar{u}$ é a velocidade média na direção x (m/s); $\bar{v}$ é a velocidade média na direção y (m/s); ρ é a massa específica do fluido (kg/m³); t é o tempo (s); p é a pressão (Pa); μ é a viscosidade dinâmica (kg/m s); μ_t é a viscosidade turbulenta (kg/m s); g é a aceleração da gravidade (m/s²) na direção y ; β coeficiente de expansão térmica (1/K); T é a temperatura (K); α é a difusividade térmica (m²/s) dada por $\kappa/\rho c_p$; κ é condutividade térmica do ar (W/m K); c_p é o calor específico (J/kg K); α_t é a difusividade térmica turbulenta (m²/s); C_μ é uma constante com valor empírico de 0,09; ε é a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta (m²/s³); k é a energia cinética turbulenta (m²/s²); Pr_t é o número de Prandtl turbulento dado por ν_t/α_t e ν_t é a viscosidade cinemática turbulenta dada por μ_t/ρ (m²/s).

As equações para o transporte de energia cinética turbulenta k e a taxa de dissipação de energia turbulenta (modelo k - ε), são dadas por:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}k)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}k)}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} [G_k + G_b] - \varepsilon \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}\varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}\varepsilon)}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\rho k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.8)$$

Nas Eqs. (3.7) e (3.8), G_b e G_k representam a produção de energia cinética turbulenta devido ao empuxo e aos gradientes médios de velocidade, respectivamente e são calculados da seguinte forma:

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} \quad (3.9)$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (3.10)$$

Além das variáveis já apresentadas anteriormente, nas Eqs. (3.7) a (3.10), δ_{ij} é o delta de Kronecker; $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ e $C_{3\varepsilon}$ são constantes com valores empíricos de 1,44, 1,92 e 0,09, respectivamente e σ_k e σ_ε são os números de Prandtl turbulento para k e ε com valores empíricos de 1,0 e 1,3, respectivamente.

3.2. Descrição do Problema

A configuração do sistema é apresentada na Fig. 3.1, onde tem-se uma IPWSC, composta por uma parede de vidro inclinada e uma parede absorvedora, estando anexa a um ambiente (espaço ventilado). Admite-se H_a a altura da parede do absorvedor, W_t a espessura da parede do absorvedor, W_i a altura da janela de entrada, H_i o tamanho da abertura de entrada para a chaminé, H e L a altura e o comprimento, respectivamente, do espaço ventilado, W_e a abertura de saída da chaminé e W_g a base inferior da chaminé. A radiação solar atravessa a parede de vidro e atinge a parede absorvedora, que conforme o nome já diz, absorve grande quantidade da energia radiante incidente, e consequentemente o ar que se encontra no interior da chaminé é aquecido, se tornando mais leve e saindo para a atmosfera pela abertura superior da chaminé. Esse processo no interior da IPWSC gera um escoamento de ar no espaço anexo, fazendo com que o ar externo entre no ambiente pela janela, mantendo uma circulação de ar no ambiente anexo.

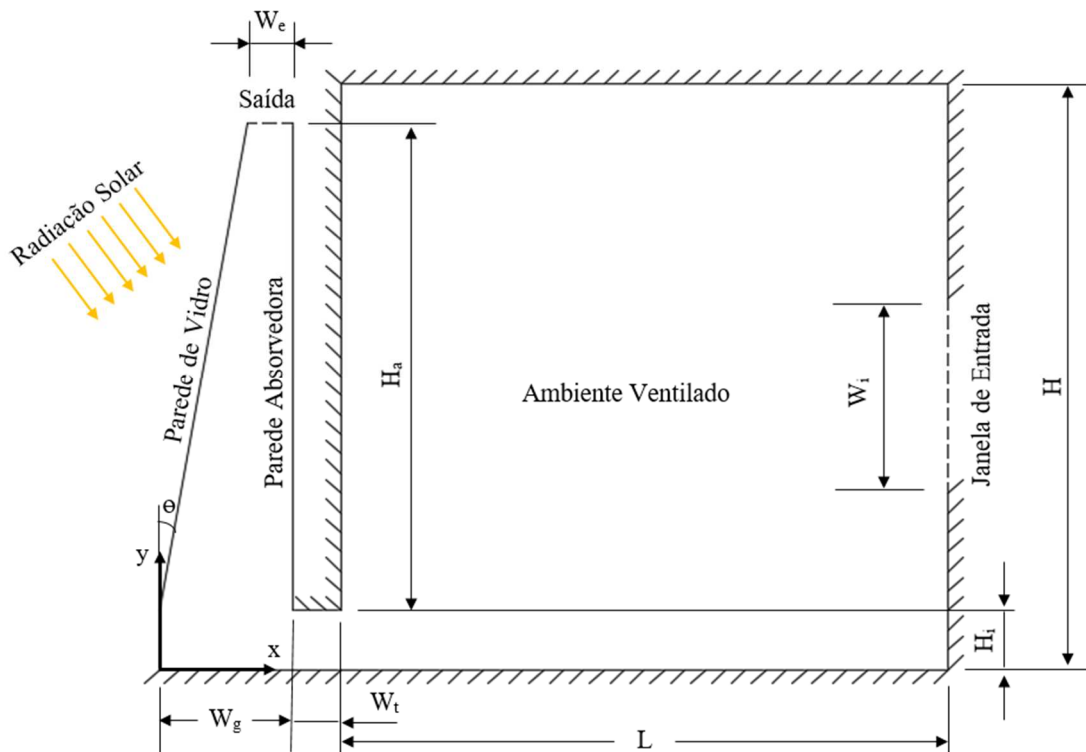


Figura 3.1. Configuração bidimensional da chaminé solar (IPWSC) anexada a um ambiente.

Foram consideradas as seguintes condições de contorno para o domínio computacional (Khanal e Lei, 2012): as paredes assumiram uma condição de não deslizamento e um perfil adiabático, exceto a parede do absorvedor que é submetida a taxa de transferência de calor por unidade de comprimento na direção normal ao plano x-y constante e igual a 3000 W/m. Para a entrada do ambiente (janela) e saída (boca da chaminé) a pressão manométrica é admitida igual a zero e a temperatura de 300 K (27° C). As propriedades de turbulência na janela de entrada são especificadas pela intensidade de turbulência de 3% e pela escala de comprimento turbulenta igual a 0,0876 m. Além disso, as condições de contorno para energia cinética turbulenta e para taxa de dissipação foram mantidas no valor padrão do Fluent iguais a 1 m²/s² e 1 m²/s³, respectivamente. Na Tabela 3.1 estão discriminadas as condições de contorno conforme inseridas no software Fluent e na Fig. 3.2 as mesmas estão apresentadas para um melhor entendimento do problema.

Tabela 3.1. Condições de contorno.

Local	Condição de Contorno
Janela de Entrada	$P = 0 \text{ atm}$, $T = 300 \text{ K}$ e $I = 3\%$
Saída	$P = 0 \text{ atm}$ e $T = 300 \text{ K}$
Parede Absorvedora	Taxa de Transferência de Calor Constante
Demais Paredes	Wall: $u = v = 0 \text{ m/s}$ (Não deslizamento e impermeabilidade) Isolado Termicamente: $q'' = 0 \text{ W/m}^2$

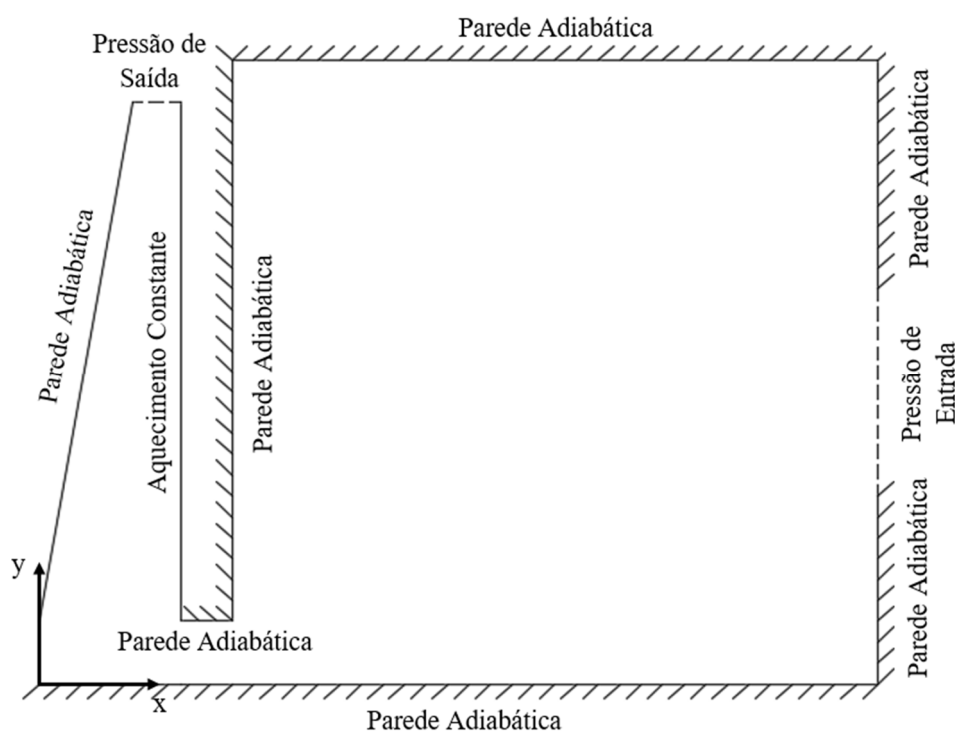


Figura 3.2. Condições de contorno do domínio computacional.

Para a verificação do modelo foi utilizado $Pr = 0,7$, $Ra_{Ha} = 1,36 \times 10^{14}$ que corresponde a um fluxo de calor de 1000 W/m^2 . As simulações foram realizadas com a configuração que reproduziu uma maior vazão mássica e consequentemente uma melhor ventilação no ambiente, de acordo com o estudo de Khanal e Lei (2015). Os seguintes parâmetros foram considerados para a verificação do modelo: uma chaminé solar de parede passiva com uma inclinação de 4° com a vertical, altura do absorvedor constante e igual a $2,5 \text{ m}$ e as razões de $H_a/W_g = 6,25$; $H/H_a = 1,20$; $H_a/W_i = 2,5$ e $L/W_i = 12,5$. A Tabela 3.2 apresenta um resumo das considerações admitidas e dos dados que foram utilizados nas simulações, estabelecidos para a temperatura de referência $T_\infty = 300 \text{ K}$.

Tabela 3.2. Resumo dos dados e considerações admitidas para a verificação do modelo

Fluido de trabalho	Ar
Pr	0,7
Ra_{Ha}	$1,36 \times 10^{14}$
Regime do Escoamento	Transiente
Modelo de turbulência	$k - \varepsilon$
c_p	1007 J/kg K
α	$2,249 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
ρ	$1,1614 \text{ kg/m}^3$ (Boussinesq)
β	$0,0033 \text{ K}^{-1}$
κ	$0,0263 \text{ W/m K}$
μ	$1,85 \times 10^{-5} \text{ kg/m s}$

Para o restante do presente estudo os mesmos dados e condições de contorno serão utilizados, com exceção: (1) do número de Rayleigh, que irá variar de acordo com a altura da chaminé e do fluxo de calor aplicado, já que será utilizada uma taxa de calor constante; e (2) dos parâmetros geométricos, que terão uma diversidade de valores devido a aplicação do Design Construtal, sendo esse o tema a ser explicado na sequência.

3.3. Aplicação do Design Construtal

A aplicação do método Design Construtal se dará para fazer a avaliação da influência da geometria da chaminé no comportamento da vazão mássica no ambiente, submetendo a parede do absorvedor a uma taxa de transferência de calor constante. O problema tem como restrições a área do ambiente ventilado que é constante e igual a $9,00 \text{ m}^2$ e a área da chaminé que é constante e igual a $0,94 \text{ m}^2$. A área do ambiente anexo é fixa com $L = H = 3,0 \text{ m}$ e a área da chaminé é calculada por:

$$A_t = \left(\frac{W_e + W_g}{2} \right) H_a + (W_g \cdot H_i) \quad (3.11)$$

Conforme pode-se observar existem 4 variáveis e uma equação, sendo, portanto necessário a criação de três graus de liberdade, que serão obtidos através da manipulação dessa equação, obtendo-se o sistema apresentado a seguir:

$$H_a = \left(\frac{2A_t}{\left[\left(\frac{W_e}{W_g} + 1 \right) + 2 \frac{H_i}{H_a} \right] \cdot \frac{W_g}{H_a}} \right)^{1/2} \quad (3.12)$$

$$W_g = \left(\frac{W_g}{H_a} \right) H_a \quad (3.13)$$

$$H_i = \left(\frac{H_i}{H_a} \right) H_a \quad (3.14)$$

$$W_e = \left(\frac{W_e}{W_g} \right) W_g \quad (3.15)$$

Dessa forma, as Eqs. (3.12) a (3.15) irão gerar as geometrias utilizadas no modelo numérico, sendo que os graus de liberdade admitirão os seguintes valores: H_i/H_a igual a 0,05, 0,1 e 0,2; W_g/H_a igual a 0,1, 0,3 e 0,5; e W_e/W_g variando de 0,1 a 1,0, com o incremento de 0,1. A Figura 3.3 apresenta de forma esquemática parte dos valores propostos e o procedimento das simulações para o presente estudo, sendo realizadas um total de 90 simulações numéricas para a obtenção dos resultados.

Conforme mencionado anteriormente, os valores do número de Rayleigh variam conforme as variações de altura da chaminé e fluxo de calor aplicado na parede, visto que é utilizada uma taxa de calor constante. Para o caso desse trabalho, o número de Rayleigh assumiu um valor mínimo de $2,02 \times 10^{13}$ e máximo de $6,39 \times 10^{14}$. Para determinação do fluxo de calor e número de Rayleigh foram utilizadas as seguintes expressões (Incropera, 2008):

$$q'' = \frac{q'}{H_a} \quad (3.16)$$

$$Ra_{Ha} = \frac{g\beta q'' H_a^4}{\nu\alpha\kappa} \quad (3.17)$$

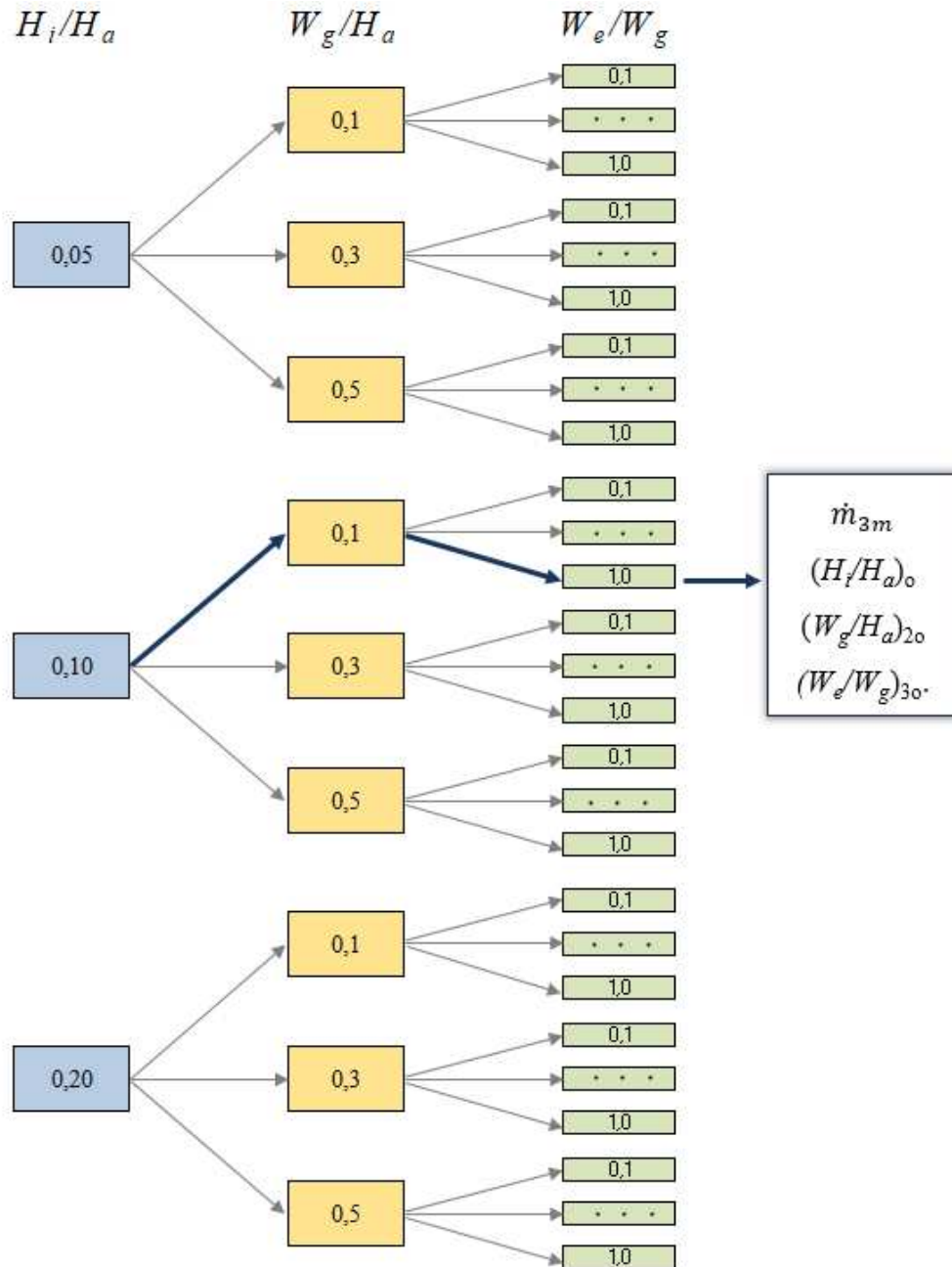


Figura 3.3. Valores propostos para os graus de liberdade e procedimento das simulações.

Então, no primeiro passo, os graus de liberdade H_i/H_a e W_g/H_a são mantidos fixos enquanto a razão W_e/W_g é variada. A maior magnitude obtida para a vazão mássica é a vazão mássica uma vez maximizada, $\dot{m}_m$ e a razão W_e/W_g uma vez otimizada, $(W_e/W_g)_o$. No segundo passo, o primeiro passo é repetido para diferentes magnitudes de W_g/H_a . A maior magnitude da vazão mássica é a vazão

mássica duas vezes maximizada, $\dot{m}_{2m}$, e as geometrias ótimas correspondentes são W_g/H_a uma vez otimizada, $(W_g/H_a)_o$, e a razão W_e/W_g duas vezes otimizada, $(W_e/W_g)_{2o}$. No terceiro passo, o segundo passo é repetido para os outros valores mencionados de H_i/H_a . A maior magnitude da vazão mássica é a vazão mássica três vezes maximizada, $\dot{m}_{3m}$, e as geometrias ótimas correspondentes são H_i/H_a uma vez otimizada, $(H_i/H_a)_o$, W_g/H_a duas vezes otimizada, $(W_g/H_a)_{2o}$, e a razão W_e/W_g três vezes otimizada, $(W_e/W_g)_{3o}$.

Dessa forma é possível fazer a investigação do efeito das razões geométricas sobre a vazão mássica no ambiente. E embora seja mencionado o termo “geometrias ótimas”, não está sendo considerada a aplicação de nenhuma técnica de otimização, visto que os graus de liberdade não varrem um grande número de possibilidades de geometrias dentro do espaço de busca.

4. MODELAGEM NUMÉRICA

4.1. Procedimentos Numéricos

Um problema pode ser analisado através de métodos analíticos, numéricos ou por experimentação em laboratório, sendo que este último trata da configuração real e possui altíssimo custo, além de muitas vezes não poder ser realizado por questões de segurança ou pela dificuldade de reprodução das condições reais. Os métodos analíticos e numéricos formam a classe dos métodos teóricos, pois ambos objetivam resolver as equações diferenciais que formam o modelo matemático. Os métodos analíticos são aplicados, normalmente, a geometrias simples e condições de contorno também simples e uma de suas principais aplicações é na validação de casos limites de modelos numéricos e auxiliar no desenvolvimento de métodos numéricos mais robustos. Os métodos numéricos, por sua vez, praticamente não apresentam restrições, podendo resolver problemas complexos com condições de contorno gerais, definidos em geometrias também complexas e apresentando resultados com uma rapidez muito grande. Além disso, as ferramentas de CFD começam a ser integradas com outras ferramentas numéricas, criando um ambiente de trabalho interativo, em que se chega ao projeto final do equipamento através de computadores (Maliska, 2004).

As equações mencionadas no primeiro tópico desse capítulo serão solucionadas numericamente pelo método de volumes finitos (MVF) com o uso do software Fluent (Patankar, 1980; Versteeg e Malalasekera, 2007; ANSYS, 2011). De acordo com Maliska (2004), quando não é possível a solução analítica, e decide-se fazer uma aproximação numérica da equação diferencial, aceita-se ter a solução para um número discreto de pontos, com um determinado erro, esperando que, quanto maior for esse número de pontos, mais perto da solução exata será a solução aproximada (ou numérica) obtida. Um método analítico com habilidade de resolver tais equações geraria a solução em uma forma fechada, e seria possível, então, calcular os valores das variáveis dependentes em nível infinitesimal, isto é, para um número infinito de pontos.

O método de volumes finitos é construído a partir da divisão do domínio de integração das equações em volumes de controles, de forma que para cada célula exista um ponto nodal ou nó. Assim, todo método que, para obter equações aproximadas, satisfaz a conservação de propriedade em nível de volumes elementares é um Método de Volumes Finitos (MVF) (Maliska, 2004). Existem duas maneiras de se obter as equações aproximadas no método dos volumes finitos. A primeira é a realização de balanços da propriedade em questão nos volumes elementares, ou volumes finitos, e a segunda é integrar sobre o volume elementar, no espaço e no tempo, as equações na forma conservativa (Maliska, 2004).

Para a solução transiente, foram empregados 1.000 passos de tempo onde cada passo de tempo foi de $\Delta t = 0,01$ s. Para a convergência, é assumido um número máximo de iterações de 300 iterações para cada passo de tempo. Os termos advectivos das equações de quantidade de movimento, energia e turbulência foram determinados utilizando a função de interpolação UDS (*Upstream Differencing Scheme - Upwind*) de segunda ordem e os termos difusivos foram determinados utilizando o método de diferenças centrais CDS (*Central Differencing Scheme*) (Khanal e Lei, 2015; Rajão, 2016).

Em todas as simulações foi adotado o método SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*) para o acoplamento pressão velocidade. Para reprodução da turbulência do ar na chaminé, foi adotada a modelagem RANS (do inglês: *Reynolds Averaged Navier-Stokes*), onde para resolver o problema do fechamento da turbulência é empregado o modelo a duas equações diferenciais $k - \varepsilon$ (Launder e Spalding, 1972).

As simulações foram consideradas convergidas quando os resíduos para massa, velocidades, energia e para as equações do modelo de turbulência entre duas iterações consecutivas foram menores do que 10^{-6} , 10^{-6} , 10^{-8} e 10^{-6} , respectivamente. Além disso, fatores de sub-relaxação de 0,7 foram impostos nas equações de conservação.

4.2. Estudo de Independência de Malha

No artigo de Khanal e Lei (2015) um estudo de independência de malha foi realizado utilizando duas malhas estruturadas e não uniformes, criadas com elementos quadrilaterais bidimensionais, com 25.650 e 42.510 volumes. O parâmetro no estudo da malha independente foi a vazão mássica na saída da chaminé, visto ser este o parâmetro de interesse que quantifica a efetividade do sistema. A diferença entre as duas malhas foi inferior a 2%, sendo então a malha mais grosseira a escolhida, já que apresenta um resultado satisfatório e requer um menor esforço computacional. No presente trabalho foi realizado um teste de independência de malha, a fim de realizar uma comparação com o estudo mencionado. Respeitando as especificações de geometria utilizadas pelos autores e citadas no capítulo anterior, o software GMSH foi utilizado para geração de 8 malhas com refinamentos diferentes, conforme apresentado na Tab. 4.1.

O critério de que a variação da vazão mássica entre as malhas seja inferior a 1% foi o estabelecido para determinação da malha independente, onde pode-se considerar a malha com 42.482 elementos ser a independente. Entretanto, a malha com 50.864 elementos, embora exija um esforço computacional maior, será a admitida como independente para fins de continuidade desse estudo, uma vez que, conforme será demonstrado no decorrer deste capítulo, esta malha é a que apresentou uma aproximação mais satisfatória em comparação com os resultados obtidos por Khanal e Lei

(2015). Além disso, pelo fato de ter ocorrido um aumento no resíduo a partir dessa malha, para atendimento do critério definido, a mesma foi escolhida como malha independente. A Figura 4.1 apresenta a malha independente e que será utilizada nas demais simulações com a aplicação do Design Construtal.

Tabela 4.1. Estudo de independência de malha - Critério definido para a independência de malha $< 1.0 \times 10^{-2}$.

Número de Elementos	$\dot{m}$ (outlet)	$ (\dot{m}^j - \dot{m}^{j+1}) / \dot{m}^j $
7.213	0,1677918	$5,27 \times 10^{-2}$
14.182	0,1589552	$8,49 \times 10^{-2}$
29.561	0,1454553	$1,15 \times 10^{-2}$
35.232	0,1437806	$1,75 \times 10^{-2}$
42.482	0,1412623	$6,02 \times 10^{-3}$
50.864	0,1404116	$8,81 \times 10^{-3}$
59.512	0,1391742	$6,26 \times 10^{-3}$
68.247	0,1383036	

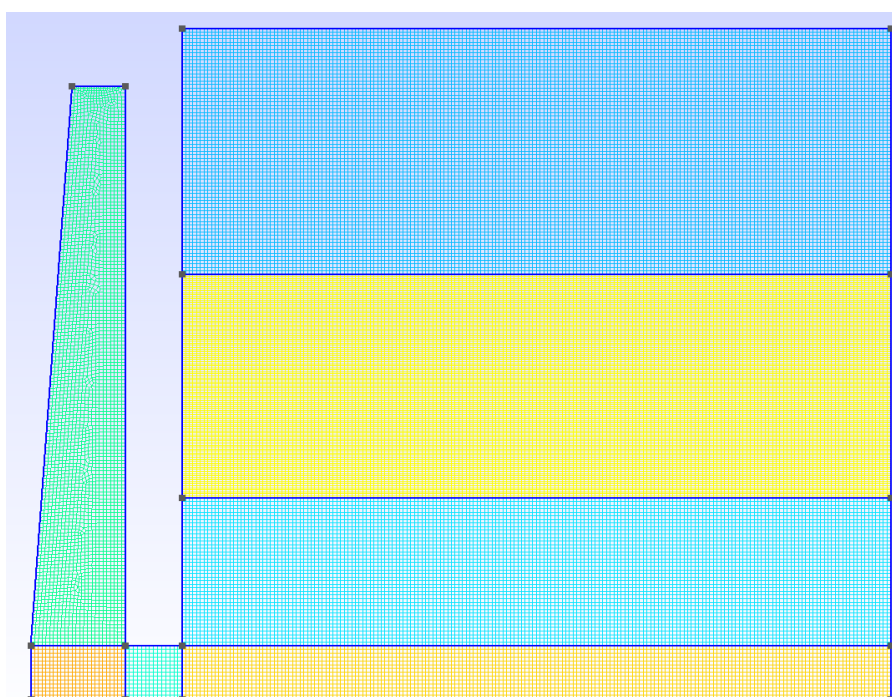


Figura 4.1. Malha independente com 50.864 elementos.

4.3. Estudo de Independência de Passo de Tempo

Além da independência de malha foi também realizado um estudo de independência de passo de tempo, a fim de avaliar se o passo de tempo de 0,01 s utilizado na malha independente obtida anteriormente é adequado. Esse passo de tempo mencionado, de 0,01 s, foi utilizado com 1000 intervalos de tempo, ou seja, apresentando os resultados para um tempo físico de 10 s de

funcionamento da chaminé solar. Portanto para simulações com diferentes passos de tempo (Δt) são utilizados intervalos de tempo diferentes de maneira a se obter os resultados sempre referentes a 10 s de tempo físico. Os resultados adquiridos nesse estudo estão apresentados na Tab. 4.2, onde foi utilizado o mesmo critério da variação da vazão mássica entre os diferentes Δt ser inferior a 1%. Pode-se inferir que o passo de tempo, adotado até então, satisfaz o critério estabelecido.

Tabela 4.2. Estudo de independência de passo de tempo - Critério definido para a independência de passo de tempo $< 1.0 \times 10^{-2}$.

Intervalo de Tempo	Δt (s)	$\dot{m}$ (outlet)	$ (\dot{m}^j - \dot{m}^{j+1}) / \dot{m}^j $
10	1,0000	0,1877974	$2,65 \times 10^{-1}$
100	0,1000	0,1380868	$1,68 \times 10^{-2}$
1.000	0,0100	0,1404116	$1,21 \times 10^{-3}$
10.000	0,0010	0,1405815	$7,05 \times 10^{-5}$
100.000	0,0001	0,1405716	

Portanto, após esse estudo, será mantido o intervalo de tempo de 0,01 s e 1000 intervalos de tempo nas simulações referentes à aplicação do Design Construtal que serão desenvolvidas no decorrer desse trabalho.

4.4. Verificação do Modelo Computacional

Para a verificação do modelo computacional foram analisados os resultados obtidos da simulação com a malha e passo de tempo independentes informados anteriormente para o tempo físico de $t = 10$ s. Esses resultados exigiram em torno de 8 h de tempo de processamento para solução de cada caso em um computador com dois processadores Intel dual-core i7-4960X 3,60 GHz e 32 GB de RAM. Os dados analisados foram o comportamento da vazão mássica, a velocidade e intensidade de turbulência em uma IPWSC anexa a um ambiente, composta por uma parede de vidro inclinada, uma parede absorvedora, uma entrada (janela) e uma saída (boca da chaminé).

A geometria da chaminé foi desenhada conforme parâmetros mencionados no capítulo 3 e o ângulo de 4° foi o utilizado visto ter sido este a produzir a melhor vazão mássica no sistema no estudo realizado por Khanal e Lei (2015). Utilizando as condições de contorno informadas no capítulo anterior, foi imposto um fluxo de calor constante e igual a 1000 W/m^2 na parede absorvedora, o qual corresponde ao número de Rayleigh igual a $1,36 \times 10^{14}$ e utilizado o passo de tempo de 0,01 s.

Khanal e Lei (2015) realizaram suas simulações no regime permanente, enquanto que Rajão (2016) no regime transiente, visto que seus resultados no regime permanente não obtiveram aproximações com o estudo do primeiro autor. Portanto, para verificação do modelo computacional desse estudo, foram realizadas simulações no regime permanente e transiente e em seguida realizada

uma comparação qualitativa e quantitativa dos resultados. A Figura 4.2 apresenta o campo de intensidade de turbulência de Rajão (2016) e de Khanal e Lei (2015) e a Fig. 4.3 do presente estudo nos dois regimes mencionados, sendo as simulações realizadas com a malha independente já apresentada. Qualitativamente há uma boa concordância entre os estudos dos referidos autores e o presente trabalho para os respectivos regimes de escoamento.

O perfil do campo de velocidades é apresentado apenas no trabalho de Rajão (2016) e portanto a Fig. 4.4(a) apresenta o campo de velocidades encontrado pelo autor mencionado e a Fig. 4.4(b) e 4.4(c) o perfil encontrado no estudo em questão nos regimes permanente e transiente. Novamente, houve uma boa concordância nos perfis de velocidades quando comparado o presente trabalho no regime transiente com o resultado obtido por Rajão (2016).

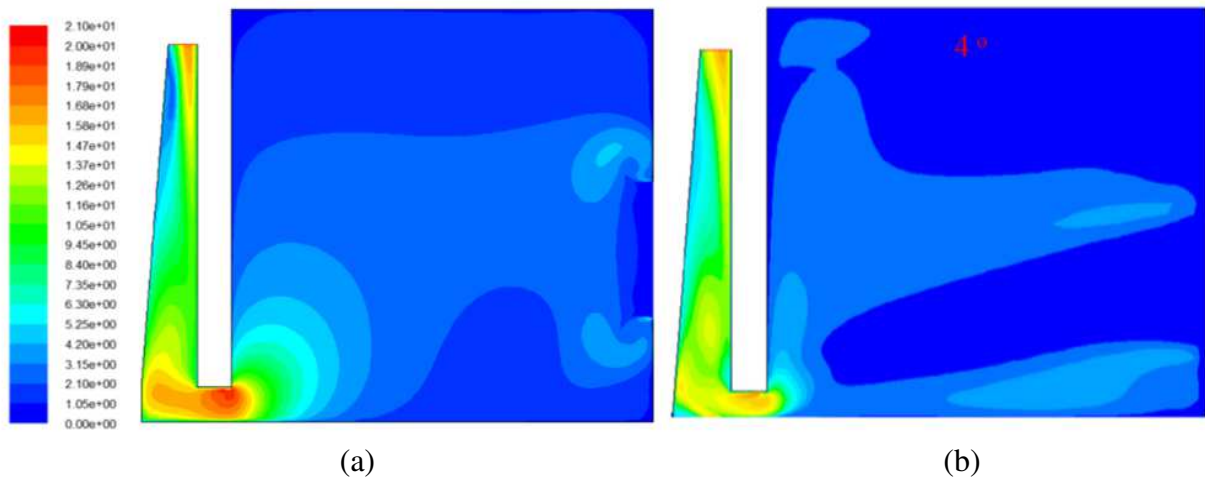


Figura 4.2. Campo de intensidade de turbulência (%) – (a) Rajão (2016) regime transiente – (b) Khanal e Lei (2015) regime permanente.

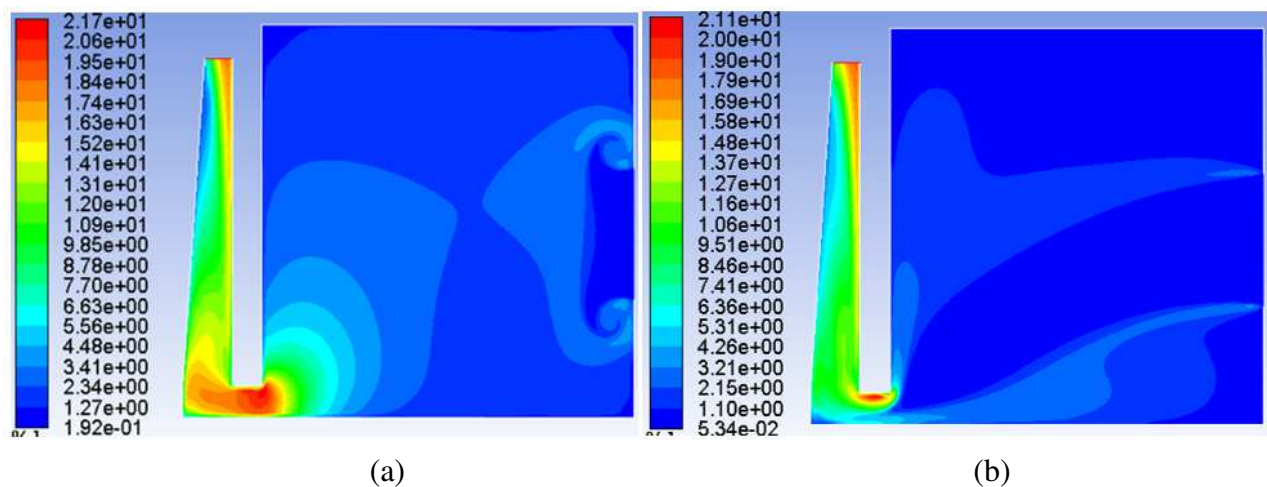


Figura 4.3. Campo de intensidade de turbulência (%) do presente trabalho – (a) Regime transiente – (b) Regime permanente.

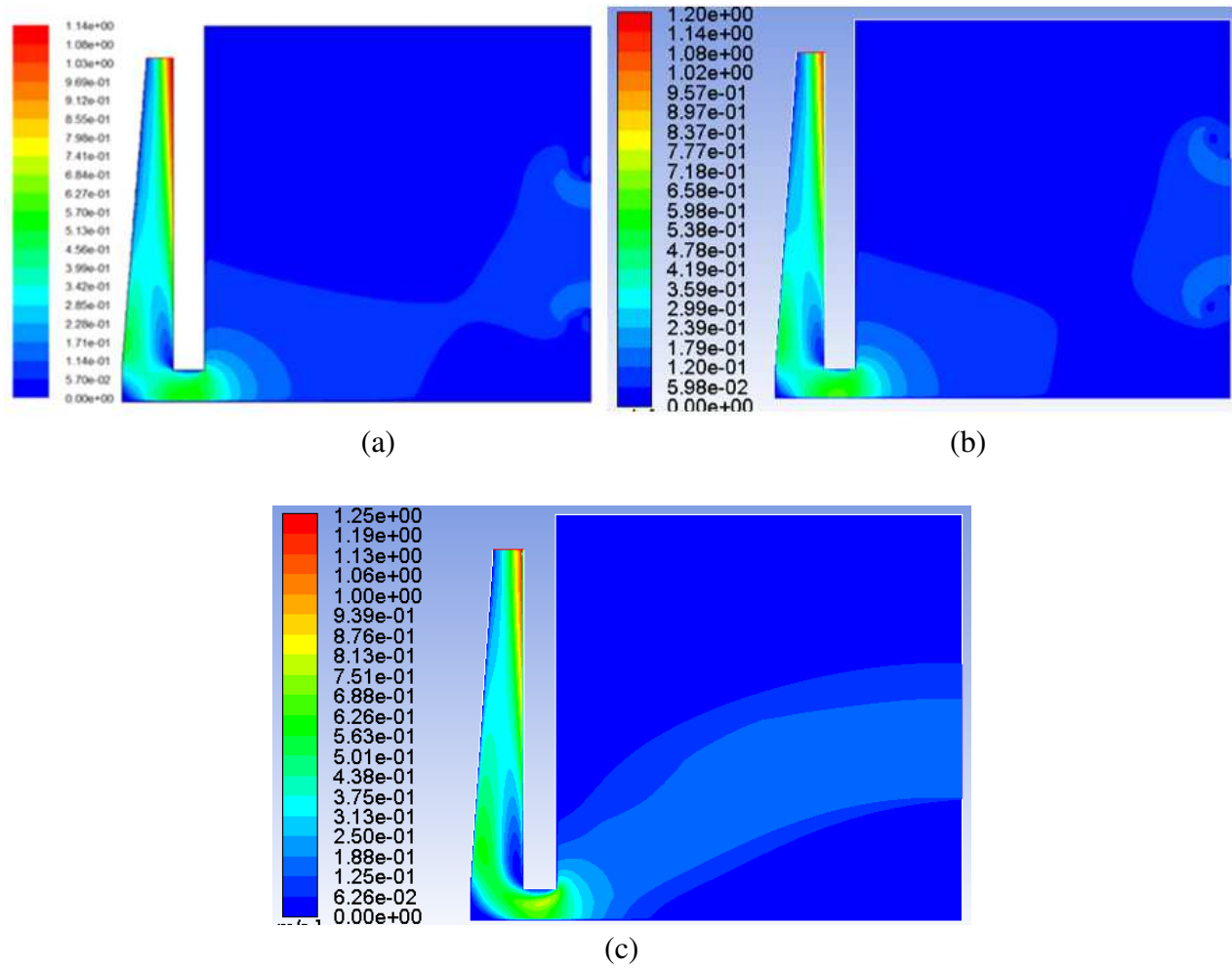


Figura 4.4. Campo de velocidades (m/s) – (a) Rajão (2016) regime transiente – (b) Presente trabalho regime transiente – (c) Presente trabalho regime permanente.

Outro dado analisado que é importante para avaliação da eficiência do sistema é a vazão mássica na saída da chaminé, sendo esta calculada pela multiplicação da massa específica (kg/m^3), da abertura de saída da chaminé (m) e da média das velocidades médias na saída da chaminé (m/s), conforme a seguinte expressão (Khanal e Lei, 2015):

$$\dot{m} = \rho v_e \bar{v}_e \quad (4.1)$$

No trabalho de Khanal e Lei (2015) é apresentada uma variável adimensional $\dot{M}$, para avaliação comparativa de desempenho da chaminé solar, dada por:

$$\dot{M} = \frac{\dot{m}}{\rho \alpha} \quad (4.2)$$

No estudo publicado por Khanal e Lei (2015), o valor de $\dot{M}$ ótimo de 5100 é alcançado com um fluxo de calor constante de 1000 W/m^2 com uma inclinação angular de 4° com a vertical. Com

esse dado e as Eqs. (4.1) e (4.2) é possível encontrar a vazão mássica e a velocidade média na saída da chaminé. Por sua vez, com as simulações realizadas nesse trabalho é possível obter a vazão mássica e a velocidade média na saída da chaminé e portanto calcular o valor do adimensional $\dot{M}$ a fim de possibilitar a comparação dos resultados. Rajão (2016) também fornece os dados obtidos em seu estudo. Então, um resumo comparativo do presente trabalho com o dos autores mencionados encontra-se na Tab. 4.3.

Tabela 4.3. Comparativo de resultados entre o presente trabalho, o trabalho de Rajão (2016) e o publicado por Khanal e Lei (2015)

Estudos	Ra_H	$\dot{M}$	$\dot{m}$ (kg/s m)	$\bar{v}_e$ (m/s)
Khanal e Lei (2015)	$1,36 \times 10^{14}$	5100,0	0,1332	0,510
Rajão (2016)	$1,36 \times 10^{14}$	5084,8	0,1328	0,560
Presente trabalho (Regime Permanente)	$1,36 \times 10^{14}$	5926,3	0,1548	0,593
Presente trabalho (Regime Transiente)	$1,36 \times 10^{14}$	5375,7	0,1404	0,538

Comparando os resultados do presente trabalho no regime transiente com os outros dois estudos publicados é possível verificar que há uma proximidade nos valores encontrados (Tab. 4.3). A variável adimensional $\dot{M}$ apresentou uma diferença de 275,7 para Khanal e Lei (2015) e de 290,9 para Rajão (2016), ou seja, uma diferença de 5,4% e 5,7%, respectivamente. Já com relação à velocidade média na saída da chaminé, a diferença percentual foi de 5,5% quando comparado com o trabalho de Khanal e Lei (2015) e de 3,9% quando comparado com Rajão (2016).

Já a mesma comparação realizada com os resultados obtidos no regime permanente para o presente trabalho apresentaram diferenças superiores a 16% tanto para a variável adimensional $\dot{M}$ quanto para a velocidade média. Portanto, com base nas comparações realizadas, o modelo no regime permanente foi descartado para seguimento desse estudo e o modelo no regime transiente foi verificado e será empregado para avaliar a influência da geometria da chaminé solar no desempenho do escoamento no ambiente anexo através do método do Design Construtal.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Casos Simulados

Conforme mencionado nos capítulos anteriores, o método do Design Construtal será utilizado para avaliar a influência da geometria da chaminé solar no comportamento da vazão mássica no ambiente, submetendo a parede do absorvedor a uma taxa de transferência de calor constante $q' = 3000 \text{ W/m}$. As áreas da chaminé e do ambiente anexo são as restrições do problema e assumem os valores constantes e igual a $0,94 \text{ m}^2$ e $9,00 \text{ m}^2$, respectivamente. São admitidos como graus de liberdade H_i/H_a , W_g/H_a e W_e/W_g e utilizadas as equações apresentadas no capítulo 3. Com esses dados é possível realizar os cálculos dos parâmetros geométricos que serão utilizados em cada simulação, conforme apresentado na Tab. 5.1. Ao todo foram realizadas 90 simulações numéricas para a obtenção dos resultados.

Na Tab. 5.1 também estão apresentados os valores do fluxo de calor q'' que serão aplicados na parede do absorvedor a cada caso, já que para manter a taxa de transferência de calor q' constante, esse fluxo assumirá valores diferentes conforme a variação de altura da chaminé. Os valores do número de Rayleigh também estão planilhados, visto que variam conforme altura da chaminé e fluxo de calor aplicado na parede.

Tabela 5.1. Casos simulados para avaliação da influência da geometria da chaminé no comportamento da vazão mássica.

H_i/H_a	W_g/H_a	W_e/W_g	H_a (m)	W_g (m)	W_e (m)	H_i (m)	q'' (W/m ²)	Ra_{Ha}
0,05	0,1	0,1	3,96	0,40	0,04	0,20	757,9	$6,39 \times 10^{14}$
0,05	0,1	0,2	3,80	0,38	0,08	0,19	788,9	$5,67 \times 10^{14}$
0,05	0,1	0,3	3,66	0,37	0,11	0,18	818,7	$5,07 \times 10^{14}$
0,05	0,1	0,4	3,54	0,35	0,14	0,18	847,4	$4,57 \times 10^{14}$
0,05	0,1	0,5	3,43	0,34	0,17	0,17	875,2	$4,15 \times 10^{14}$
0,05	0,1	0,6	3,33	0,33	0,20	0,17	902,1	$3,79 \times 10^{14}$
0,05	0,1	0,7	3,23	0,32	0,23	0,16	928,3	$3,48 \times 10^{14}$
0,05	0,1	0,8	3,15	0,31	0,25	0,16	953,7	$3,21 \times 10^{14}$
0,05	0,1	0,9	3,07	0,31	0,28	0,15	978,5	$2,97 \times 10^{14}$
0,05	0,1	1,0	2,99	0,30	0,30	0,15	1002,7	$2,76 \times 10^{14}$
0,05	0,3	0,1	2,29	0,69	0,07	0,11	1312,8	$1,23 \times 10^{14}$
0,05	0,3	0,2	2,20	0,66	0,13	0,11	1366,4	$1,09 \times 10^{14}$
0,05	0,3	0,3	2,12	0,63	0,19	0,11	1418,0	$9,76 \times 10^{13}$
0,05	0,3	0,4	2,04	0,61	0,25	0,10	1467,7	$8,80 \times 10^{13}$
0,05	0,3	0,5	1,98	0,59	0,30	0,10	1515,9	$7,99 \times 10^{13}$
0,05	0,3	0,6	1,92	0,58	0,35	0,10	1562,5	$7,30 \times 10^{13}$
0,05	0,3	0,7	1,87	0,56	0,39	0,09	1607,8	$6,70 \times 10^{13}$
0,05	0,3	0,8	1,82	0,54	0,44	0,09	1651,9	$6,17 \times 10^{13}$

Continuação da Tabela 5.1

0,05	0,3	0,9	1,77	0,53	0,48	0,09	1694,8	$5,72 \times 10^{13}$
0,05	0,3	1,0	1,73	0,52	0,52	0,09	1736,7	$5,31 \times 10^{13}$
0,05	0,5	0,1	1,77	0,89	0,09	0,09	1694,8	$5,72 \times 10^{13}$
0,05	0,5	0,2	1,70	0,85	0,17	0,09	1764,0	$5,07 \times 10^{13}$
0,05	0,5	0,3	1,64	0,82	0,25	0,08	1830,6	$4,54 \times 10^{13}$
0,05	0,5	0,4	1,58	0,79	0,32	0,08	1894,8	$4,09 \times 10^{13}$
0,05	0,5	0,5	1,53	0,77	0,38	0,08	1957,0	$3,71 \times 10^{13}$
0,05	0,5	0,6	1,49	0,74	0,45	0,07	2017,2	$3,39 \times 10^{13}$
0,05	0,5	0,7	1,45	0,72	0,51	0,07	2075,7	$3,11 \times 10^{13}$
0,05	0,5	0,8	1,41	0,70	0,56	0,07	2132,6	$2,87 \times 10^{13}$
0,05	0,5	0,9	1,37	0,69	0,62	0,07	2188,0	$2,66 \times 10^{13}$
0,05	0,5	1,0	1,34	0,67	0,67	0,07	2242,0	$2,47 \times 10^{13}$
0,1	0,1	0,1	3,80	0,38	0,04	0,38	788,9	$5,67 \times 10^{14}$
0,1	0,1	0,2	3,66	0,37	0,07	0,37	818,7	$5,07 \times 10^{14}$
0,1	0,1	0,3	3,54	0,35	0,11	0,35	847,4	$4,57 \times 10^{14}$
0,1	0,1	0,4	3,43	0,34	0,14	0,34	875,2	$4,15 \times 10^{14}$
0,1	0,1	0,5	3,33	0,33	0,17	0,33	902,1	$3,79 \times 10^{14}$
0,1	0,1	0,6	3,23	0,32	0,19	0,32	928,3	$3,48 \times 10^{14}$
0,1	0,1	0,7	3,15	0,31	0,22	0,31	953,7	$3,21 \times 10^{14}$
0,1	0,1	0,8	3,07	0,31	0,25	0,31	978,5	$2,97 \times 10^{14}$
0,1	0,1	0,9	2,99	0,30	0,27	0,30	1002,7	$2,76 \times 10^{14}$
0,1	0,1	1,0	2,92	0,29	0,29	0,29	1026,3	$2,57 \times 10^{14}$
0,1	0,3	0,1	2,20	0,66	0,07	0,22	1366,4	$1,09 \times 10^{14}$
0,1	0,3	0,2	2,12	0,63	0,13	0,21	1418,0	$9,76 \times 10^{13}$
0,1	0,3	0,3	2,04	0,61	0,18	0,20	1467,7	$8,80 \times 10^{13}$
0,1	0,3	0,4	1,98	0,59	0,24	0,20	1515,9	$7,99 \times 10^{13}$
0,1	0,3	0,5	1,92	0,58	0,29	0,19	1562,5	$7,30 \times 10^{13}$
0,1	0,3	0,6	1,87	0,56	0,34	0,19	1607,8	$6,70 \times 10^{13}$
0,1	0,3	0,7	1,82	0,54	0,38	0,18	1651,9	$6,17 \times 10^{13}$
0,1	0,3	0,8	1,77	0,53	0,42	0,18	1694,8	$5,72 \times 10^{13}$
0,1	0,3	0,9	1,73	0,52	0,47	0,17	1736,7	$5,31 \times 10^{13}$
0,1	0,3	1,0	1,69	0,51	0,51	0,17	1777,5	$4,96 \times 10^{13}$
0,1	0,5	0,1	1,70	0,85	0,09	0,17	1764,0	$5,07 \times 10^{13}$
0,1	0,5	0,2	1,64	0,82	0,16	0,16	1830,6	$4,54 \times 10^{13}$
0,1	0,5	0,3	1,58	0,79	0,24	0,16	1894,8	$4,09 \times 10^{13}$
0,1	0,5	0,4	1,53	0,77	0,31	0,15	1957,0	$3,71 \times 10^{13}$
0,1	0,5	0,5	1,49	0,74	0,37	0,15	2017,2	$3,39 \times 10^{13}$
0,1	0,5	0,6	1,45	0,72	0,43	0,14	2075,7	$3,11 \times 10^{13}$
0,1	0,5	0,7	1,41	0,70	0,49	0,14	2132,6	$2,87 \times 10^{13}$
0,1	0,5	0,8	1,37	0,69	0,55	0,14	2188,0	$2,66 \times 10^{13}$
0,1	0,5	0,9	1,34	0,67	0,60	0,13	2242,0	$2,47 \times 10^{13}$
0,1	0,5	1,0	1,31	0,65	0,65	0,13	2294,8	$2,30 \times 10^{13}$
0,2	0,1	0,1	3,54	0,35	0,04	0,71	847,4	$4,57 \times 10^{14}$
0,2	0,1	0,2	3,43	0,34	0,07	0,69	875,2	$4,15 \times 10^{14}$
0,2	0,1	0,3	3,33	0,33	0,10	0,67	902,1	$3,79 \times 10^{14}$
0,2	0,1	0,4	3,23	0,32	0,13	0,65	928,3	$3,48 \times 10^{14}$

Continuação da Tabela 5.1

0,2	0,1	0,5	3,15	0,31	0,16	0,63	953,7	$3,21 \times 10^{14}$
0,2	0,1	0,6	3,07	0,31	0,18	0,61	978,5	$2,97 \times 10^{14}$
0,2	0,1	0,7	2,99	0,30	0,21	0,60	1002,7	$2,76 \times 10^{14}$
0,2	0,1	0,8	2,92	0,29	0,23	0,58	1026,3	$2,57 \times 10^{14}$
0,2	0,1	0,9	2,86	0,29	0,26	0,57	1049,3	$2,41 \times 10^{14}$
0,2	0,1	1,0	2,80	0,28	0,28	0,56	1071,9	$2,26 \times 10^{14}$
0,2	0,3	0,1	2,04	0,61	0,06	0,41	1467,7	$8,80 \times 10^{13}$
0,2	0,3	0,2	1,98	0,59	0,12	0,40	1515,9	$7,99 \times 10^{13}$
0,2	0,3	0,3	1,92	0,58	0,17	0,38	1562,5	$7,30 \times 10^{13}$
0,2	0,3	0,4	1,87	0,56	0,22	0,37	1607,8	$6,70 \times 10^{13}$
0,2	0,3	0,5	1,82	0,54	0,27	0,36	1651,9	$6,17 \times 10^{13}$
0,2	0,3	0,6	1,77	0,53	0,32	0,35	1694,8	$5,72 \times 10^{13}$
0,2	0,3	0,7	1,73	0,52	0,36	0,35	1736,7	$5,31 \times 10^{13}$
0,2	0,3	0,8	1,69	0,51	0,41	0,34	1777,5	$4,96 \times 10^{13}$
0,2	0,3	0,9	1,65	0,50	0,45	0,33	1817,5	$4,64 \times 10^{13}$
0,2	0,3	1,0	1,62	0,48	0,48	0,32	1856,6	$4,35 \times 10^{13}$
0,2	0,5	0,1	1,58	0,79	0,08	0,32	1894,8	$4,09 \times 10^{13}$
0,2	0,5	0,2	1,53	0,77	0,15	0,31	1957,0	$3,71 \times 10^{13}$
0,2	0,5	0,3	1,49	0,74	0,22	0,30	2017,2	$3,39 \times 10^{13}$
0,2	0,5	0,4	1,45	0,72	0,29	0,29	2075,7	$3,11 \times 10^{13}$
0,2	0,5	0,5	1,41	0,70	0,35	0,28	2132,6	$2,87 \times 10^{13}$
0,2	0,5	0,6	1,37	0,69	0,41	0,27	2188,0	$2,66 \times 10^{13}$
0,2	0,5	0,7	1,34	0,67	0,47	0,27	2242,0	$2,47 \times 10^{13}$
0,2	0,5	0,8	1,31	0,65	0,52	0,26	2294,8	$2,30 \times 10^{13}$
0,2	0,5	0,9	1,28	0,64	0,58	0,26	2346,3	$2,15 \times 10^{13}$
0,2	0,5	1,0	1,25	0,63	0,63	0,25	2396,8	$2,02 \times 10^{13}$

5.2. Efeito dos Parâmetros Geométricos sobre a Vazão Mássica

Em um primeiro momento é feita a análise do efeito da razão W_e/W_g sobre a vazão mássica na chaminé. Para isso os graus de liberdade H_i/H_a e W_g/H_a são mantidos fixos e iguais a 0,05 e 0,1, respectivamente, enquanto a razão W_e/W_g é variada. A Fig. 5.1 apresenta os resultados obtidos com as simulações, sendo possível visualizar o comportamento da vazão mássica conforme há a variação de W_e/W_g .

É possível notar que há um aumento na vazão mássica até uma determinada razão W_e/W_g e após esse ponto seu valor diminui de maneira suave, apresentando quase uma estabilidade. A vazão mássica uma vez maximizada $\dot{m}_m$ foi de 0,1556 kg/s m, atingida com $(W_e/W_g)_0$ de 0,6. Esse valor foi 82,5% maior que o valor obtido em seu pior desempenho com a razão $W_e/W_g = 0,1$, a qual impõe uma grande restrição na saída da chaminé. Importante mencionar que essa razão está sendo apresentada apenas para uma comparação teórica, visto ser uma geometria inviável de ser construída no âmbito prático.

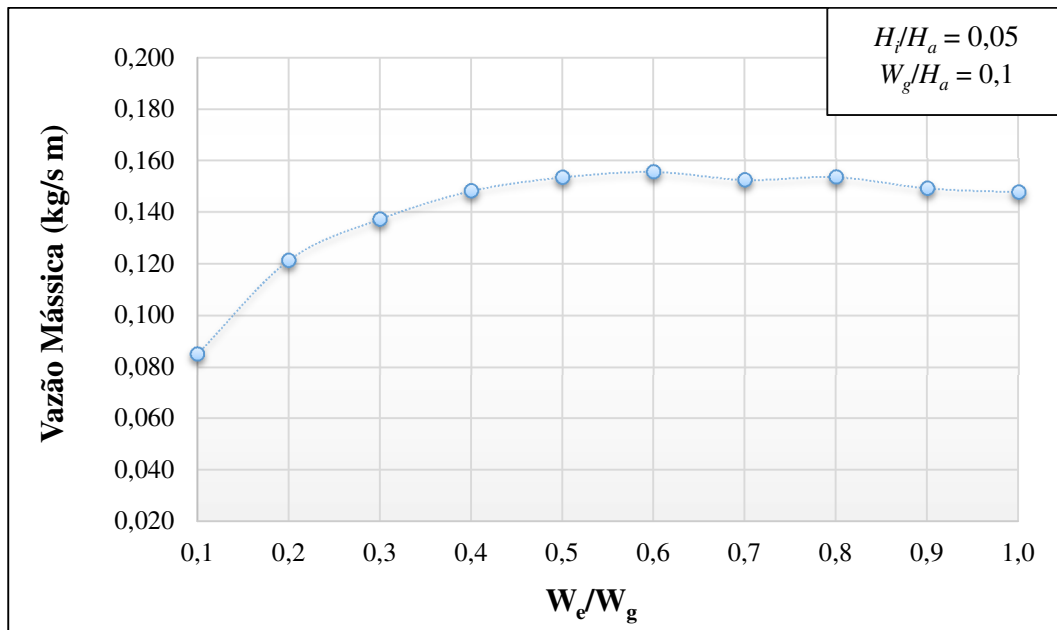


Figura 5.1. Efeito da razão W_e/W_g sobre a vazão mássica na chaminé.

Os campos de velocidades para o melhor e o pior desempenho da chaminé conforme o efeito da razão W_e/W_g , ou seja, para $(W_e/W_g)_o = 0,6$ e $W_e/W_g = 0,1$, estão apresentados na Fig. 5.2. Avaliando os campos percebe-se que no seu melhor desempenho a velocidade média na saída da chaminé foi menor quando comparado ao pior desempenho. Entretanto a velocidade média no interior do ambiente apresenta um resultado mais satisfatório para o melhor desempenho da IPWSC, pois, como pode ser visualizado na Fig. 5.2 (b), não há movimento no escoamento na geometria de pior desempenho.

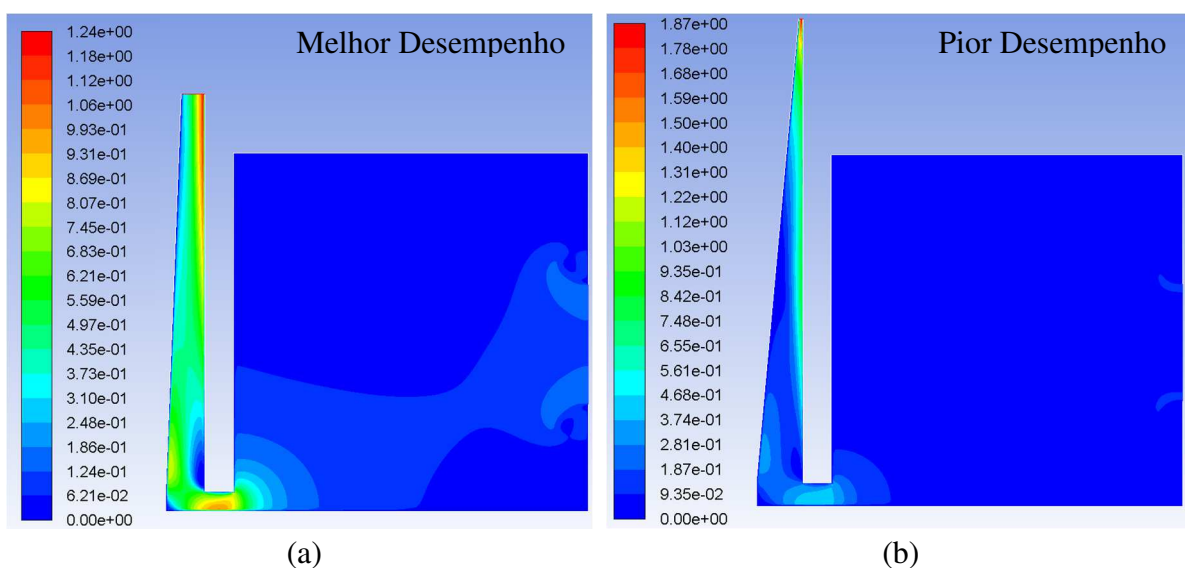


Figura 5.2. Campos de velocidades para (a) $(W_e/W_g)_o = 0,6$ e (b) $W_e/W_g = 0,1$ – Análise com H_i/H_a fixo e igual a 0,05 e W_g/H_a fixo e igual a 0,1.

A próxima análise consiste em seguir com a razão H_i/H_a fixa e igual a 0,05 e variar a razão W_g/H_a para avaliar o efeito de W_e/W_g sobre a vazão mássica para diferentes razões de W_g/H_a . Ou seja, identificar como essa variação de W_g/H_a influencia o efeito da razão W_e/W_g sobre a vazão mássica. Com isso é possível avaliar a tendência no comportamento do efeito de W_e/W_g sobre o parâmetro de desempenho. Pode ser observado na Fig. 5.3 que para $W_g/H_a = 0,1$ a vazão mássica assume seu maior valor quando $W_e/W_g = 0,6$, ou seja, com a saída da chaminé medindo de 60% da medida de sua base. Já para W_g/H_a de 0,3 e 0,5 o comportamento é o oposto e os maiores valores de vazão mássica são encontrados quando a boca da chaminé é mais estreita, ou seja, com valores de W_e/W_g de 0,2 e 0,1, respectivamente. Esse comportamento é um demonstrativo que a variação do grau de liberdade W_g/H_a afeta o comportamento do efeito de outra razão W_e/W_g sobre o indicador de performance.

Outra percepção importante, feita a partir da Fig. 5.3, é que os melhores valores para o parâmetro de desempenho são atingidos na razão $(W_g/H_a)_o = 0,1$, obtendo-se o valor de $\dot{m}_m = 0,1556 \text{ kg/s m}$ para $(W_e/W_g)_{2o} = 0,6$. Esse valor é 67% maior que o maior valor de vazão encontrado quando são aplicadas as razões W_g/H_a de 0,3 e 0,5, que alcança apenas $0,0932 \text{ kg/s m}$. Também é possível ressaltar que a pior vazão mássica obtida foi com as razões $W_g/H_a = 0,05$ e $W_e/W_g = 1,0$, atingindo o valor de $\dot{m}_m = 0,0279 \text{ kg/s m}$. Ou seja, no seu melhor desempenho a chaminé solar foi 457,7% superior quando comparada ao pior valor do indicador de performance.

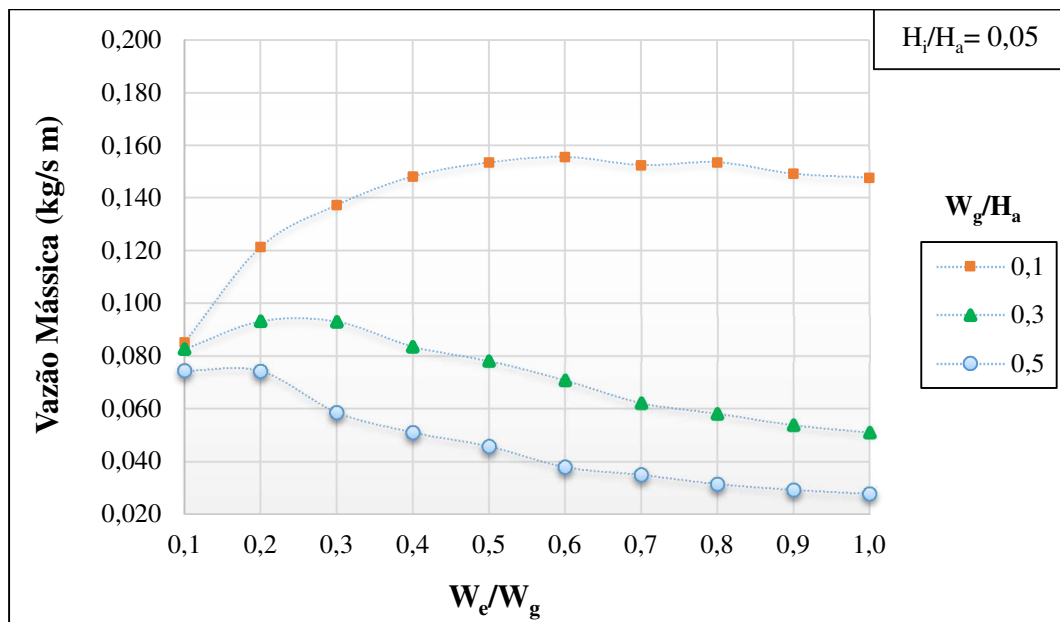


Figura 5.3. Efeito da razão W_e/W_g sobre a vazão mássica para várias razões de W_g/H_a .

Na Figura 5.4 estão compilados os resultados ótimos obtidos na Fig. 5.3, sendo apresentado o efeito da razão W_g/H_a sobre a vazão mássica uma vez maximizada ($\dot{m}_m$) e sua correspondente geometria uma vez otimizada, $(W_e/W_g)_o$. Conforme já mencionado, à medida que a razão W_g/H_a

aumenta, a vazão mássica uma vez maximizada diminui, sendo a vazão mássica duas vezes maximizada ($\dot{m}_{2m}$) obtida para a menor razão de $(W_g/H_a)_o = 0,1$, ou seja, 109% maior que o valor obtido na razão $W_g/H_a = 0,5$. Dessa forma, é possível concluir que a razão W_g/H_a também possui uma sensibilidade importante sobre a vazão mássica uma vez maximizada. É importante salientar que possivelmente para valores menores de W_g/H_a seja possível encontrar melhores valores de vazão mássica, porém isso implicaria em alturas maiores de chaminé solar, sendo necessário avaliar a viabilidade de uma possível concepção em escala real.

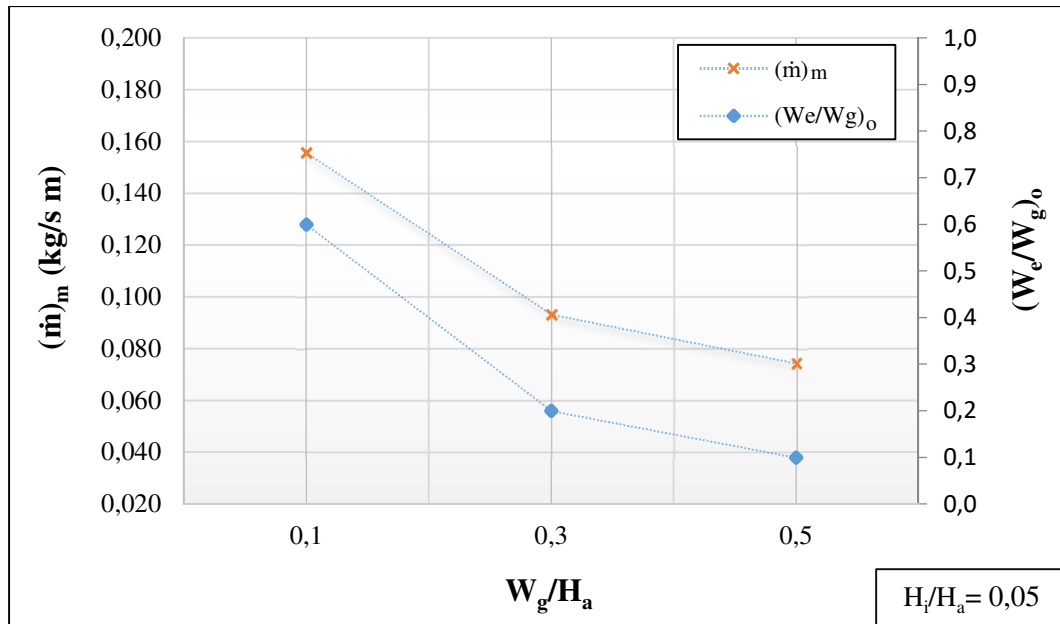


Figura 5.4. Efeito da razão W_g/H_a sobre a vazão mássica uma vez maximizada e correspondente geometria ótima $(W_e/W_g)_o$ com H_i/H_a fixo e igual a 0,05.

Os campos de velocidades para o melhor desempenho da chaminé solar ($(W_g/H_a)_o = 0,1$ e $(W_e/W_g)_{2o} = 0,6$) e na situação de menor vazão mássica obtida ($W_g/H_a = 0,5$ e $(W_e/W_g)_o = 0,1$) estão ilustrados na Fig. 5.5. Analisando as imagens, é possível perceber que a configuração de chaminé encontrada para a vazão mássica duas vezes maximizada ($\dot{m}_{2m}$), apresenta um maior valor de velocidade média na saída da chaminé e também um melhor desempenho para o escoamento no ambiente anexo quando comparado a configuração de pior desempenho da chaminé.

A última avaliação foi realizada através da análise dos efeitos das razões W_e/W_g e W_g/H_a para diferentes valores de H_i/H_a , adotando, além de 0,05, os valores de 0,1 e 0,2 para esse grau de liberdade. Avaliando inicialmente o efeito da razão W_g/H_a sobre a vazão mássica uma vez maximizada para as três diferentes magnitudes de H_i/H_a (Fig. 5.6), pode-se perceber que a vazão mássica segue obtendo seu melhor valor na razão de $W_g/H_a = 0,1$. Além disso, o parâmetro de desempenho apresenta um aumento do seu valor conforme aumento da razão H_i/H_a , ou seja, a variação dessa razão possui

sensibilidade tanto sobre a vazão mássica uma vez maximizada quanto sobre o efeito da razão W_g/H_a sobre o indicador de performance.

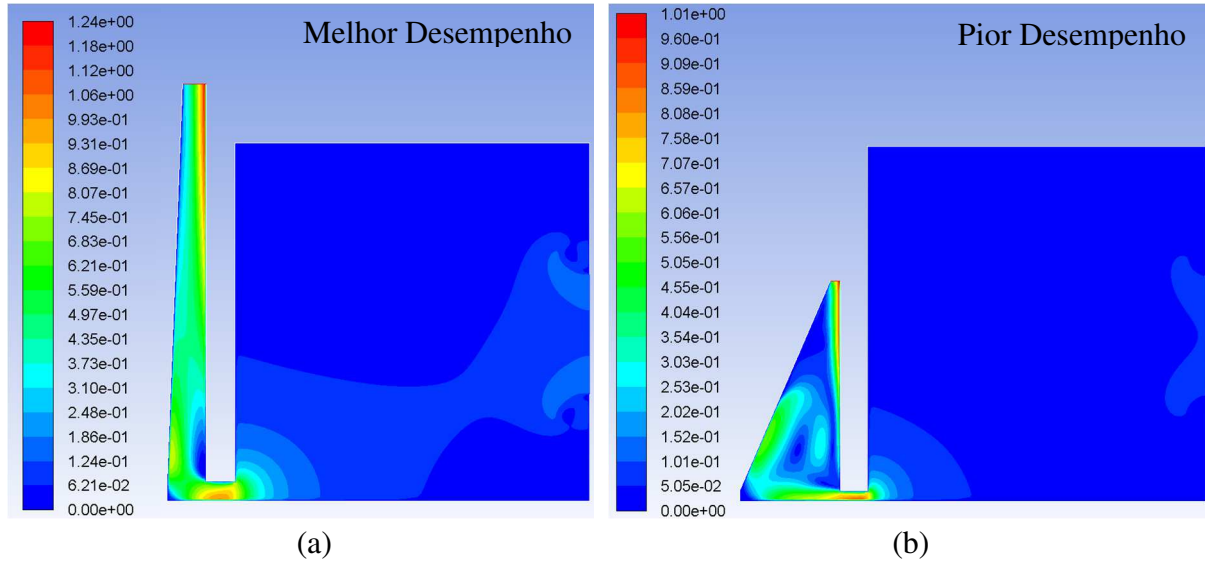


Figura 5.5. Campos de velocidades para (a) $(W_g/H_a)_o = 0,1$ e $(W_e/W_g)_{2o} = 0,6$ e (b) $W_g/H_a = 0,5$ e $(W_e/W_g)_o = 0,1$ – Análise com H_i/H_a fixo e igual a 0,05.

Na Figura 5.7 é possível analisar o efeito da razão W_g/H_a sobre $(W_e/W_g)_o$ para as três diferentes magnitudes de H_i/H_a . Pode-se notar que conforme a razão W_g/H_a aumenta, a razão $(W_e/W_g)_o$ diminui. Ou seja, conforme ocorre um alargamento da base da chaminé em relação à altura da mesma, a sua melhor performance passa a ser atingida com um estreitamento da sua largura de saída.

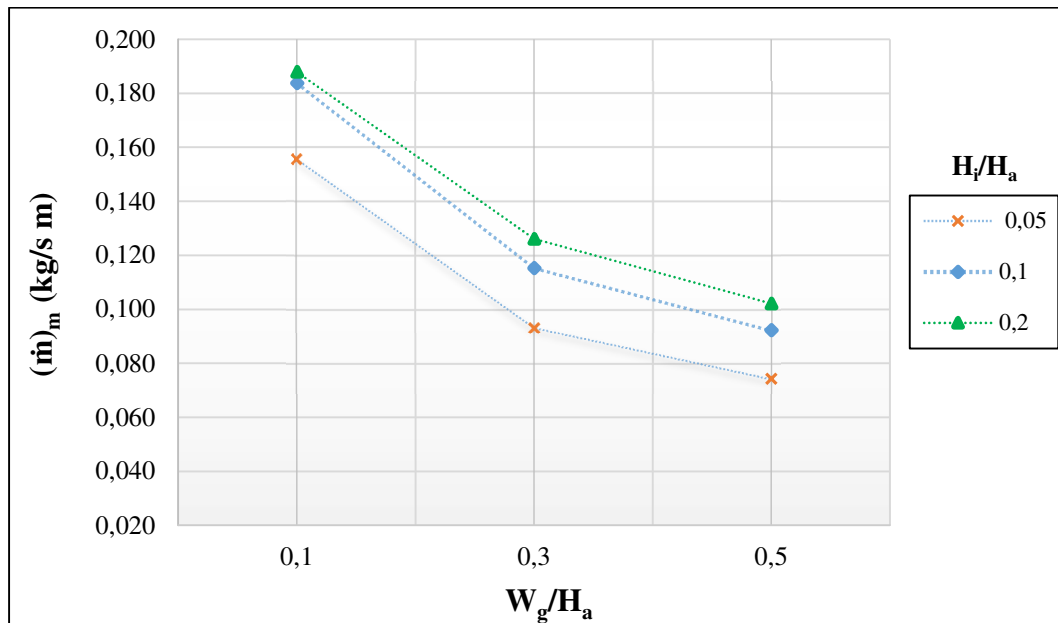


Figura 5.6. Efeito da razão W_g/H_a sobre a vazão mássica uma vez maximizada para três diferentes magnitudes de H_i/H_a .

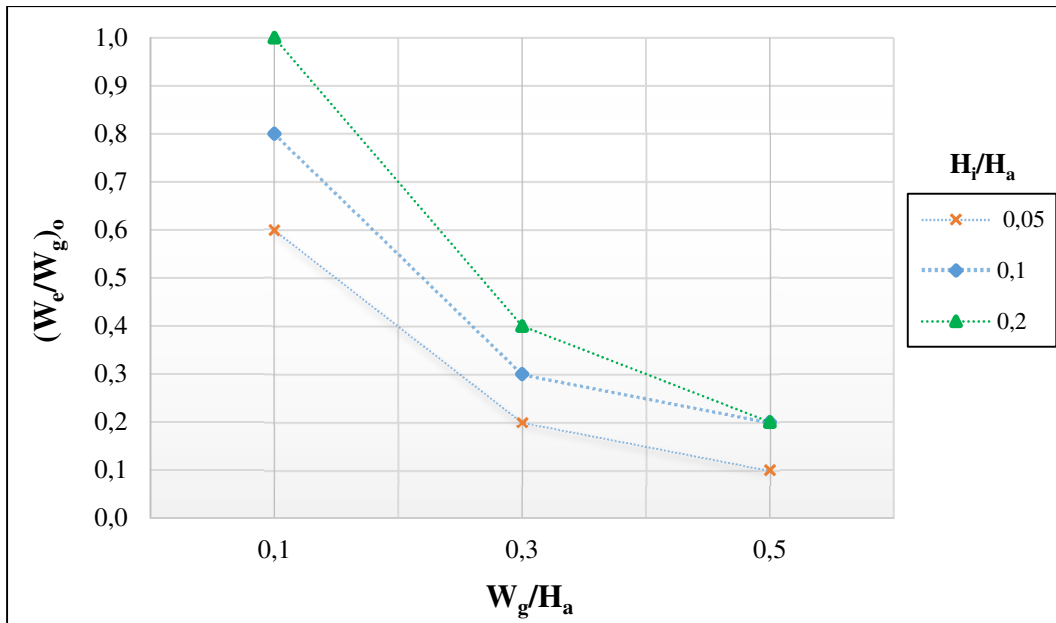


Figura 5.7. Efeito da razão W_g/H_a sobre $(W_e/W_g)_o$ para três diferentes magnitudes de H_i/H_a .

Analisando as Figs. 5.8 e 5.9 é possível notar que a vazão mássica é maior conforme aumentam as razões H_i/H_a e W_e/W_g , ou seja, quanto mais larga é abertura de entrada para a chaminé e quanto mais larga a abertura de saída. Também é possível perceber que a vazão mássica duas vezes maximizada é sempre encontrada quando a razão W_g/H_a igual a 0,1, não sendo este o grau de liberdade que apresenta impacto na obtenção de uma maior vazão mássica quando as demais razões são variadas. Além disso, a vazão mássica apresenta um ganho de 18,1% quando comparados os resultados em H_i/H_a de 0,05 para 0,1, porém o ganho é menos significativo para quando H_i/H_a varia de 0,1 para 0,2, apresentando uma melhora de apenas 2,3%.

Na Fig. 5.10 são apresentados os campos de velocidades das geometrias que obtiveram a melhor e a pior vazão mássica duas vezes maximizada ($\dot{m}_{2m}$). Novamente é possível perceber que os parâmetros geométricos que produzem um maior valor de vazão mássica, também geram uma maior velocidade média na saída da chaminé e um melhor desempenho para o escoamento no ambiente anexo. Dessa forma, dentro do espaço de busca investigado e após a avaliação dos efeitos das razões geométricas sobre a vazão mássica no ambiente, a geometria que conduziu ao melhor desempenho para a IPWSC (Fig. 5.8 (a)) foi a obtida com as seguintes razões $(H_i/H_a)_o = 0,2$, $(W_g/H_a)_{2o} = 0,1$ e $(W_e/W_g)_{3o} = 1,0$, obtendo uma vazão mássica três maximizada de 0,1880 kg/s m. Esse valor foi 574,3% superior ao pior caso estudado, onde a vazão mássica alcançou o valor de 0,0279 kg/s m nas razões de $H_i/H_a = 0,05$, $W_g/H_a = 0,5$ e $W_e/W_g = 1,0$.

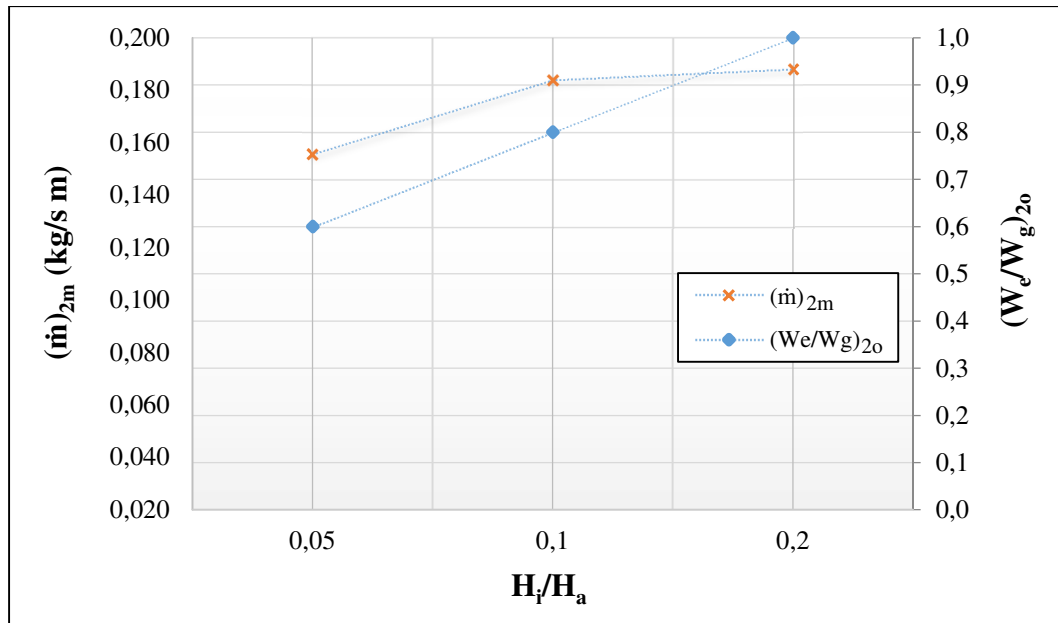


Figura 5.8. Efeito da razão H_i/H_a sobre a vazão mássica e correspondente geometria ótima $(W_e/W_g)_{2o}$.

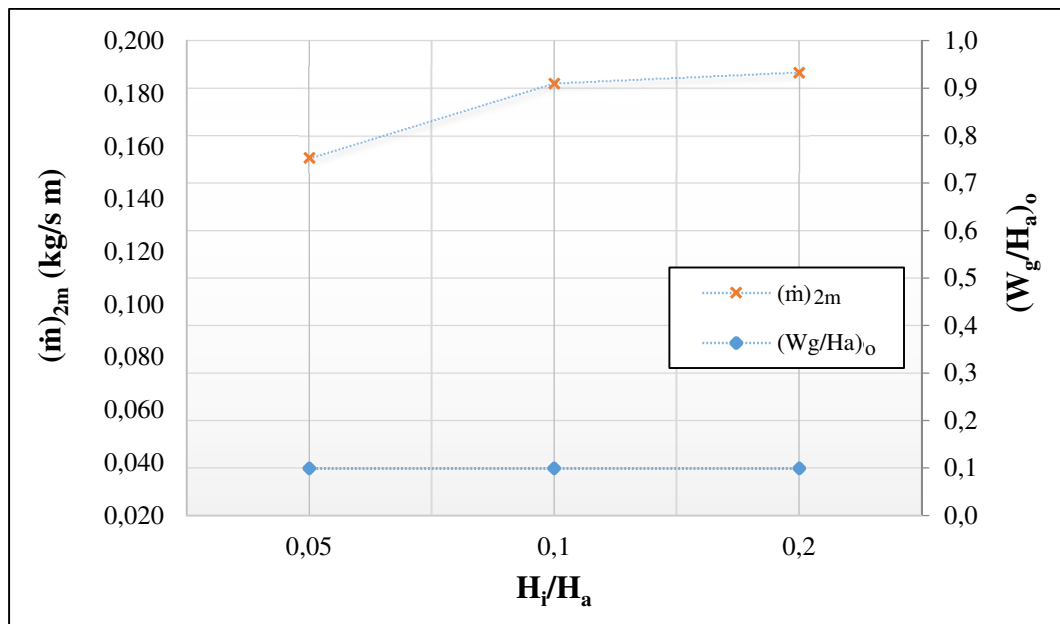


Figura 5.9. Efeito da razão H_i/H_a sobre a vazão mássica e correspondente geometria ótima $(W_g/H_a)_o$.

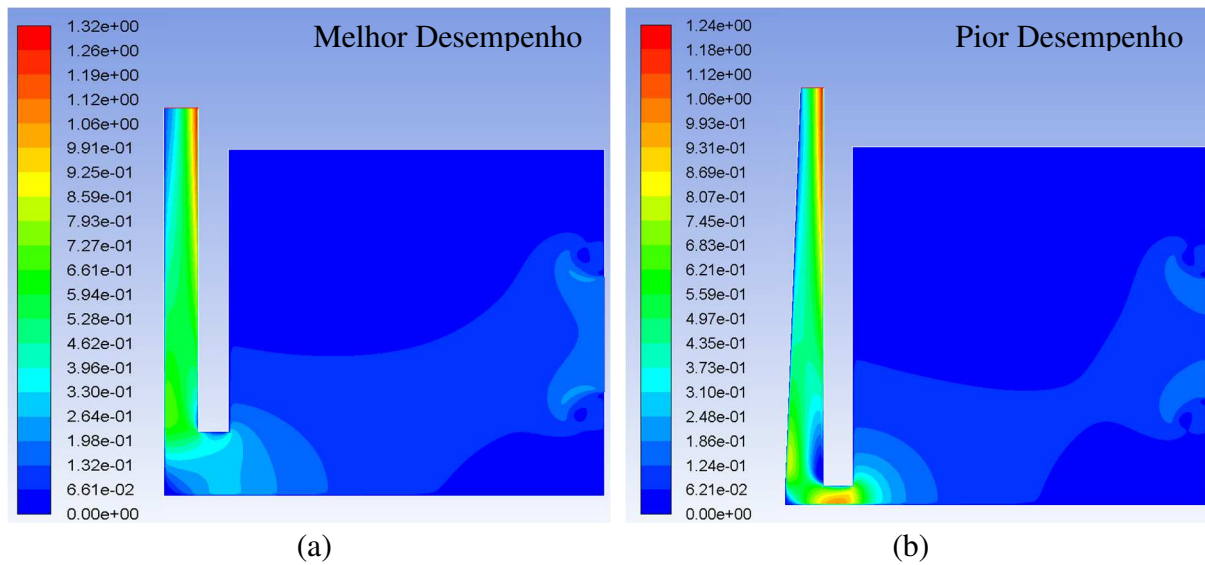


Figura 5.10. Campos de velocidades para (a) $(H_i/H_a)_o = 0,2$, $(W_g/H_a)_{2o} = 0,1$ e $(W_e/W_g)_{3o} = 1,0$ e (b) $H_i/H_a = 0,05$, $(W_g/H_a)_o = 0,1$ e $(W_e/W_g)_{2o} = 0,6$.

Percebe-se também que a configuração que teve maior sensibilidade sobre a vazão mássica foi a que produziu uma chaminé solar convencional de parede vertical, ou seja, sem aplicação de algum ângulo de inclinação para a parede de vidro. Acredita-se que isso ocorreu pelo fato de que os estudos realizados até o momento (Khanal e Lei, 2012; Khanal e Lei, 2014; Khanal e Lei, 2015) não tenham considerado essa diversidade de composição de geometrias.

Também é importante destacar que todas as razões apresentaram alguma sensibilidade sobre o indicador de performance. Além disso, com exceção do efeito de H_i/H_a sobre $(W_g/H_a)_o$, todas as razões geométricas ótimas também foram influenciadas por variações no subsequente grau de liberdade investigado, o que mostra que os graus de liberdade são, de certa forma, dependentes entre si. Portanto conclui-se que a aplicação do Design Construtal contribui para uma avaliação mais profunda da geometria mais adequada para que conduza ao objetivo requerido, que no caso do presente trabalho, é o de atingir a melhor vazão mássica na saída da chaminé, que é diretamente proporcional a vazão mássica no ambiente anexo.

6. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

No presente trabalho o escoamento turbulento em uma chaminé solar de parede passiva inclinada (IPWSC) conectada a um ambiente foi analisado através do emprego de uma metodologia numérica. O principal objetivo é avaliar o efeito de diferentes razões geométricas sobre o desempenho do escoamento no ambiente anexo através do método Design Construtal. O modelo computacional foi verificado com os modelos presentes na literatura e estudos de independência de malha e de passo de tempo foram realizados. O método Design Construtal foi aplicado, utilizando como parâmetro de desempenho a vazão mássica na saída da chaminé e considerando como restrições a área da chaminé e do ambiente anexo. A parede do absorvedor foi submetida a uma taxa de transferência de calor constante e os três graus de liberdade analisados foram H_i/H_a , W_g/H_a e W_e/W_g .

Todas simulações foram realizadas no regime transiente em um domínio bidimensional, admitindo o escoamento turbulento, incompressível e com transferência de calor por convecção natural. As equações média no tempo de conservação de massa, quantidade de movimento e energia foram solucionadas numericamente pelo método de volumes finitos utilizando o software Fluent. Para reprodução da turbulência do escoamento de ar na chaminé foi empregada a modelagem RANS com o modelo padrão de turbulência $k - \varepsilon$.

Primeiramente os graus de liberdade H_i/H_a e W_g/H_a foram mantidos constantes e foi investigado W_e/W_g , ou seja, a razão entre a abertura da saída da chaminé solar pela base inferior da mesma, que variou de 0,1 a 1,0, com o incremento de 0,1. Os resultados mostraram que a vazão mássica é sensível à variação dessa razão, atingindo seu ponto máximo em $(W_e/W_g)_o$ de 0,6 no valor de 0,1556 kg/s m, um desempenho 82,5% maior que a pior vazão mássica obtida. Além disso, foram analisados os campos de velocidades para o melhor e pior desempenho da IPWSC e embora a velocidade média na saída da chaminé seja menor para o seu melhor desempenho, a velocidade no interior do ambiente se mostrou mais favorável quando comparada ao pior desempenho (velocidade média na saída da chaminé maior).

Posteriormente partiu-se para a variação de outro grau de liberdade, ou seja, a razão W_g/H_a (a base inferior da chaminé pela altura da mesma) foi variada nos valores de 0,1, 0,3 e 0,5. A avaliação dos resultados obtidos mostrou que conforme a razão W_g/H_a aumentou, os valores encontrados para o parâmetro de desempenho diminuíram, atingindo um valor 457,7% superior quando comparados os valores do melhor desempenho ($(W_g/H_a)_o = 0,1$ e $(W_e/W_g)_{2o} = 0,6$) e pior desempenho ($W_g/H_a = 0,5$ e $W_e/W_g = 1,0$) da chaminé. Também foi possível concluir que para razões de W_g/H_a menores, ou seja, bases mais estreitas em relação à altura, a melhor performance é atingida quando a largura da saída

da chaminé (W_e) é em torno de 60% o valor de sua base. Já para razões maiores de W_g/H_a , as vazões máximas encontradas ocorrem quando W_e é de 10% a 20% o valor da base, ou seja, a variação da razão W_g/H_a apresentou influência no efeito de W_e/W_g sobre a vazão mássica.

Os campos de velocidades para o melhor e pior desempenho da chaminé solar quando analisada a variação da razão W_g/H_a também foram avaliados, sendo possível notar que a configuração que atingiu a maior vazão mássica, também apresentou um maior valor de velocidade na saída da chaminé e um melhor desempenho do escoamento no ambiente anexo. Portanto, a razão W_g/H_a mostrou ter forte influência sobre a vazão mássica e também no efeito da razão W_e/W_g sobre a vazão mássica.

Os últimos resultados avaliados foram os obtidos a partir da variação do terceiro grau de liberdade H_i/H_a , adotando-se os valores de 0,05, 0,1 e 0,2 para essa razão. Através dessa análise foi possível concluir que a variação razão H_i/H_a possui sensibilidade tanto sobre a vazão mássica uma vez maximizada quanto sobre a o efeito da razão W_g/H_a sobre o indicador de performance. Além disso, quanto maiores as relações entre a abertura de entrada da chaminé pela sua altura (H_i/H_a) e a largura da abertura de saída pela sua base (W_e/W_g), maior é o valor encontrado para o parâmetro de desempenho. Porém para razões de H_i/H_a maiores do que 0,1 esse aumento na magnitude da vazão mássica não é superior a 2,3%. Já na análise dos campos de velocidades, a configuração geométrica que apresentou melhor desempenho para a vazão mássica, quando comparado ao seu pior desempenho, também apresentou maiores velocidades médias na saída da chaminé e no ambiente anexo.

Dessa forma, a partir do espaço de busca analisado foi possível concluir que chaminés solares que produzem um melhor desempenho sobre a vazão mássica possuem sua entrada em relação a altura e sua saída em relação a sua base não muito estreitas e uma base medindo 10% de sua altura. No presente trabalho, a configuração geométrica que conduziu a melhor vazão mássica ($\dot{m}_{3m} = 0,1880 \text{ kg/s m}$) foi com as razões de $(H_i/H_a)_o = 0,2$, $(W_g/H_a)_{2o} = 0,1$ e $(W_e/W_g)_{3o} = 1,0$, que foi 574,3% superior ao pior caso estudado ($H_i/H_a = 0,05$, $W_g/H_a = 0,5$ e $W_e/W_g = 1,0$). Além disso, foi possível notar que que todas as razões apresentaram alguma sensibilidade sobre o indicador de performance. Com exceção do efeito de H_i/H_a sobre $(W_g/H_a)_o$, todas as razões geométricas ótimas também foram influenciadas por variações no subsequente grau de liberdade investigado, mostrando a dependência que os graus de liberdade possuem entre si.

A partir de todos os resultados apresentados concluiu-se que o método Design Construtal é uma excelente ferramenta para avaliação da sensibilidade dos parâmetros geométricos de uma IPWSC.

Para continuidade desse trabalho algumas sugestões são propostas a seguir:

- Aplicar outros valores para as razões H_i/H_a e W_g/H_a , permitindo avaliar mais profundamente o efeito dos mesmos sobre a vazão mássica na IPWSC;
- Avaliar a influência da configuração geométrica do ambiente anexo sobre o parâmetro de desempenho. Variar altura e largura do ambiente ou altura da janela de entrada;
- Aplicar um modelo de otimização (busca exaustiva ou algoritmos genéticos) de maneira a poder avaliar um maior espaço de busca para avaliação geométrica (principalmente pelo esforço computacional requerido para cada caso, que inviabiliza uma análise de muitos parâmetros com o método de busca exaustiva);
- Realizar uma avaliação do campo de temperaturas no ambiente anexo, buscando avaliar o quanto uma melhora da vazão mássica impacta na distribuição do campo de temperaturas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEEN, A., SERAGELDIN, A.A., IBRAHIM, M.G.E., EL-ZAFARANY A., OOKAWARA, S., MURATA, R. Solar chimney for enhancing thermal comfort in Egypt: An experimental and numerical study. *Solar Energy*, v. 180, p. 524-536, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.063>>
- ANSI/ASHRAE Standard 55-2013. Thermal environmental conditions for human occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, EUA.
- ANSYS, 14.0 – Guia do Usuário do Fluent, ANSYS Inc, 2011.
- ARAÚJO, V.M.D. Parâmetros de conforto térmico para usuários de edificações escolares no litoral nordestino brasileiro, 1996. Tese PhD. São Paulo, SP, Brasil: Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo.
- ARCHDAILY - O site de arquitetura mais visitado do mundo. ISSN 0719-8906, 2008-2021. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br>>
- ASADI, S., FAKHARI, M., FAYAZ, R., MAHDAVIPARSA, A. The effect of solar chimney layout on ventilation rate in buildings. *Energy and Buildings*, v.123, p.71-78, 2016. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.047>>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT - NBR 16401-2. Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários - Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro, RJ, 2008.
- BEJAN, A. Shape and Structure, from Engineering to Nature. Cambridge, UK, Cambridge University Press, 2000.
- BEJAN, A. Convection Heat Transfer. 4ª ed. Hoboken, New Jersey, USA, John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- BEJAN, A. The Physics of Life – The Evolution of Everything. New York, USA, St. Martin's Press, 2016.
- BEJAN, A., LORENTE, S. Design with Constructal Theory. Hoboken, New Jersey, USA, Wiley & Sons, Inc, 2008.
- BEJAN, A., ZANE, J.P. Design in nature. USA, Doubleday, 2012.
- CAMARGO, M.G., FURLAN, M.M.D.P. Resposta fisiológica do corpo às temperaturas elevadas: exercícios, extremos de temperatura e doenças térmicas. *Revista Saúde e Pesquisa*, v. 4, n. 2, p. 278-288, ISSN 1983-1870, 2011.

- CHAGA, V., GAMA, J.S., PAULINO, R.H.P., SAENZ, J.R. Chaminé solar aplicada à secagem de café para pequenos cafeicultores. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer, v.9, p.3315-3329, 2013.
- CORREIA, A.L.G., SILVEIRA, T., SILVA, C.C.C., ROCHA, L.A.O., REAL, M.V., DOS SANTOS, E.D., ISOLDI, L.A. Constructal Design aplicado a placas com furos elípticos sob flambagem. Vetor, v. 23, p. 18-31, 2013.
- DHAHRI, A., OMRI, A. A Review of solar Chimney Power Generation Technology. International Journal of Engineering and Advanced Technology, v. 2, p. 1–17, 2013.
- DUTRA, R.F., ZINANI, F.S.F., ROCHA, L.A.O., BISERNI, C. Constructal design of an arterial bypass graft. Heat Transfer, p. 1–21, 2020. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1002/htj.21693>>
- FAGUNDES, T.M., LORENZINI, G., ESTRADA, E. da S.D., ISOLDI, L.A., DOS SANTOS, E.D., ROCHA, L.A.O., NETO, A.J. da S. Constructal design of conductive asymmetric tri-forked pathways. Journal of Engineering Thermophysics, v. 28, p. 26–42, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1134/S181023281901003X>>
- FERREIRA, A.G., MAIA, C.B., CORTEZ, M.F.B., VALLE, R.M. Technical feasibility assessment of a solar chimney for food drying. Solar Energy, v. 82, p. 198-205, 2008. Disponível em: <<http://doi.org/10.1016/j.solener.2007.08.002>>
- GAVIRIA, A.A.N. Avaliação por simulação computacional de ventilação de cozinhas residenciais em clima quente e úmido na colômbia por meio de chaminés solares, 2012. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, Florianópolis, SC, Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina. – UFSC.
- GOMES, M.N., LORENZINI, G., ROCHA, L.A.O., DOS SANTOS, E.D., ISOLDI, L.A. Constructal Design applied to the geometric evaluation of an oscillating water column wave energy converter considering different real scale wave periods. Journal of Engineering Thermophysics, v. 27, p. 173–190, 2018. Disponível em <<https://doi.org/10.1134/S1810232818020042>>
- GONZALES, G.V., ESTRADA, E. da S.D., EMMERNDORFER, L.R., ISOLDI, L.A., XIE, G., ROCHA, L.A.O., SANTOS, E.D. dos. A comparison of simulated annealing schedules for constructal design of complex cavities intruded into conductive walls with internal heat generation. Energy, v. 93, p. 372–382, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.058>>
- HAJMOHAMMADI, M.R. Introducing a ψ -shaped cavity for cooling a heat generating medium. International Journal of Thermal Sciences, v. 121, p. 204–212, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.07.010>>
- HOWELL, J.R., SIEGEL R., MENGÜG, M.P. Thermal Radiation Heat Transfer. 5ª ed. New York, Taylor & Francis Group, 2010.
- INCROPERA, F.P., DEWITT, D.P., BERGMAN, T.L., LAVINE, A.S. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 6ª ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, LTC, 2008.

- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE, Monitoramento do território: mudanças climáticas, 2021. Disponível em: <<http://www.inpe.br/faq/index.php?pai=9>>
- KHANAL, R., LEI, C. An experimental investigation of an inclined passive wall solar chimney for natural ventilation. *Solar Energy*, v. 107, p. 461–474, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.032>>
- KHANAL, R., LEI, C. A numerical investigation of buoyancy induced turbulent air flow in an inclined passive wall solar chimney for natural ventilation. *Energy and Buildings*, v. 93, p. 217–226, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.019>>
- KHANAL, R., LEI, C. Flow reversal effects on buoyancy induced air flow in a solar chimney. *Solar Energy*, v. 86, p. 2783–2794, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.06.015>>
- KHANAL, R., LEI, C. Solar chimney – A passive strategy for natural ventilation. *Energy and Buildings*, v. 43, p. 1811–1819, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.035>>
- KIWAN, S., AL-NIMR, M., SALAM, Q.I.A. Solar chimney power-water distillation plant (SCPWDP). *Desalination*, v. 445, p. 105–114, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.08.006>>
- LAMBERTS, R., CANDIDO, C., DE DEAR, R., DE VECCHI, R. Towards a brazilian standard on thermal comfort. Relatório de pesquisa e projeto de norma brasileira de conforto térmico. Desenvolvido pela Universidade Federal de Santa Catarina (LabEEE) e Universidade de Sydney (IEQ Lab), 2013. Disponível em: <<https://labeee.ufsc.br/node/808>>
- LAUNDER, B.E., SPANDING, D.B. *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. London, England, Academic Press, 1972.
- LAYENI, A.T., WAHEED, M.A., ADEWUMI, B.A., BOLAJI, B.O., NWAOKOCHA, C.N., CIWA, S.O. Computational modelling and simulation of the feasibility of a novel dual purpose solar chimney for power generation and passive ventilation in buildings. *Scientific African*, v. 8, e00298, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00298>>
- LAZAROTTO, N., SANTOS, J.C.P., Avaliação do conforto térmico de estudantes do ensino fundamental na região noroeste do RS. Encontro Nacional no Ambiente Construído - ENCAC. Anais. Ouro Preto, MG, 2007.
- LIMA, J.P.S., CUNHA, M.L., DOS SANTOS, E.D., ROCHA, L.A.O., REAL, M.VA., ISOLDI, L.A. Constructal Design for the ultimate buckling stress improvement of stiffened plates submitted to uniaxial compressive load. *Engineering structures*, v. 203, p. 109883–109883–16, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109883>>
- LIMA, Y.T.B.L., ROCHA, L.A.O., GOMES, M.N., DOS SANTOS, E.D., ISOLDI, L.A. Aplicação do método design construtal na avaliação numérica da potência hidropneumática de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar do tipo coluna de água oscilante com região de transição trapezoidal. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 6, p. 376–396, 2017.

- LUI, C.H., FONG, N.K., LORENTE, S., BEJAN, A., CHOW, W.K. Constructal design of pedestrian evacuation from an area. *Journal of Applied Physics*, v. 113, 034904, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.4780612>>
- MAGALHÃES, G.M.C., FRAGASSA, C., LEMOS, R. de L., ISOLDI, L.A., AMICO, S.C., ROCHA, L.A.O., SOUZA, J.A., SANTOS, E.D. dos. Numerical analysis of the influence of empty channels design on performance of resin flow in a porous plate. *Applied Sciences*, v. 10, 4054, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/app10114054>>
- MALISKA, C.R. *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*. 2ª ed. Rio de Janeiro, Brasil, LTC, 2004.
- MARÈ, R.M. Estudo de eficiência da ventilação em sistema de climatização com distribuição de ar pelo piso, 2010. Dissertação de Mestrado em Engenharia, São Paulo, SP, Brasil: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- MARTINS, J.C., GOULART, M.M., GOMES, M. N., SOUZA, J.A., ROCHA, L.A.O., ISOLDI, L.A., DOS SANTOS, E.D. Geometric evaluation of the main operational principle of an overtopping wave energy converter by means of constructal design. *Renew Energy*, v. 118 p. 727–741, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.061>>
- NEVES, L. de O., RORIZ, M. Procedimentos estimativos do potencial de uso de chaminés solares para promover a ventilação natural em edificações de baixa altura. *Ambiente Construído*, v. 12, p. 177-192, ISSN 1678-8621, 2012.
- NORMA REGULAMENTADORA 17 – Ergonomia – NR 17. Ministério do Trabalho, 1990.
- NOTA TÉCNICA EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE 030/2018. Uso de ar condicionado no setor residencial brasileiro: perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética, 2018. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/nota-tecnica-epe-030-2018>>
- OLIVEIRA, M.M. Análise da influência de chaminés solares no conforto e na renovação de ar de ambientes internos, 2017. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, Viçosa, MG, Brasil: Universidade Federal de Viçosa.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU, Site oficial da ONU no Brasil, 2021. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>
- PATANKAR, S. V., *Numerical heat transfer and fluid flow*. New York, USA, McGraw Hill, 1980.
- PRÊMIO AGA KHAN DE ARQUITETURA – CICLO 2011-2013. Disponível em: <<https://www.akdn.org/pt>>
- PROJETANDO EDIFICAÇÕES ENERGETICAMENTE EFICIENTES – PROJETEÉE. Disponível em: <<http://projeteee.mma.gov.br/sobre-o-projeteee/>>
- PROJETO EDIFÍCIOS EUROPEUS DE BAIXA ENERGIA E ALTA QUALIDADE – EULEB. Disponível em: <<https://www.new-learn.info/packages/euleb/en/home/index.html>>

- RAJÃO, M.L. Estudo numérico do escoamento turbulento em chaminé solar para ventilação de ambientes construídos, 2016. Projeto de Graduação Engenharia Mecânica Empresarial, Rio Grande, RS, Brasil: Universidade Federal do Rio Grande - FURG.
- SERAGELDIN, A.A., ABDELRAHMAN, A.K., OOKAWARA, S. Parametric study and optimization of a solar chimney passive ventilation system coupled with an earth-to-air heat exchanger. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 30, p. 263-278, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.10.010>>
- SHI, L., ZIEM, A., ZHANG, G., LI, J., SETUNGE, S. Solar chimney for a real building considering both energy-saving and fire safety –a case study. *Energy and Buildings*, v. 221, 110016, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110016>>
- SILVEIRA, T., LIMA, J.P.S., REAL, M.V., ROCHA, L.A.O., DOS SANTOS, E.D., ISOLDI, L.A. Design construtal e método de elementos finitos aplicados à flambagem biaxial de placas perfuradas laminadas simetricamente. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 9, p. 186-198, 2017.
- SPLENGER, J.D., CHEN, Q. Indoor air quality factors in designing a healthy building. *Annual Review of Energy and Environment*, v. 25, p. 567-600, 2000.
- TROINA, G., CUNHA, M., PINTO, V., ROCHA, L., DOS SANTOS, E., FRAGASSA, C., ISOLDI, L. Computational Modeling and Constructal Design Theory Applied to the Geometric Optimization of Thin Steel Plates with Stiffeners Subjected to Uniform Transverse Load. *Metals*, v. 10, p. 220-249, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/met10020220>>
- VERSTEEG, H. K. , MALALASEKERA, W., *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Pearson Education Limited, 2007.
- VIANNA, J.C.B., ESTRADA, E. da S.D., ISOLDI, L.A., SANTOS, E.D. dos, SOUZA, J.A. A new Constructal Theory based algorithm applied to thermal problems. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 126, p. 118-124, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.12.023>>
- VIEIRA, R.S., PETRY, A.P., ROCHA, L.A.O., ISOLDI, L.A., DOS SANTOS, E.D. Numerical evaluation of a solar chimney geometry for different ground temperatures by means of constructal design. *Renewable Energy*, v. 109, p. 222-234, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.007>>
- ZHANG, H., TAO, Y., SHI, L. Solar Chimney Applications in Buildings. *Encyclopedia*, v.1, p. 409-422, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/encyclopedia1020034>>