
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE – FURG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA GEOMÉTRICA NA POTÊNCIA
DISPONÍVEL DE UMA CHAMINÉ SOLAR EMPREGANDO DESIGN
CONSTRUTAL**

RODRIGO SPOTORNO VIEIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Elizaldo Domingues dos Santos, Dr. Eng. Mecânica
Co-orientador: Liércio André Isoldi, Dr. Eng. Mecânica

Rio Grande, Dezembro de 2015.

RODRIGO SPOTORNO VIEIRA

“AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA GEOMÉTRICA NA POTÊNCIA DISPONÍVEL
DE UMA CHAMINÉ SOLAR EMPREGANDO DESIGN CONSTRUTAL”

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

Aprovada em

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos
Orientador – FURG

Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Co-Orientador – FURG

Prof. Dr. Paulo Roberto de Freitas Teixeira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica – FURG

Prof. Dr. João Francisco Prolo Filho
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica – FURG

Prof. Dr. Adriane Prisco Petry
Departamento de Engenharia Mecânica – UFRGS

Rio Grande – RS
2015

Eu não procuro saber as respostas, procuro compreender as perguntas.

Confúcio
Filósofo chinês (551 a.C. - 479 a.C.)

RESUMO

Neste trabalho é realizado um estudo numérico sobre o princípio de funcionamento de uma Usina de chaminé solar (UDCS) e a influência de alguns parâmetros geométricos na potência da UDCS empregando o método Design Construtal. Os principais objetivos aqui são avaliar a aplicabilidade do modelo numérico estudado e avaliação geométrica do efeito dos graus de liberdade H_1/H (onde H_1 e H são as alturas da saída e entrada do coletor), R/H (onde R é o raio do coletor) e R_1/H_2 (onde R_1 é o raio de saída da chaminé e H_2 a altura da chaminé) sobre a potência do dispositivo. Para isso é considerado um escoamento incompressível, turbulento, permanente com transferência de calor por convecção mista em um domínio bidimensional, axissimétrico, similar ao encontrado em uma chaminé solar. As equações de conservação de massa, quantidade de movimento, energia e a equação de estado dos gases ideais são resolvidas numericamente com o uso do método de volumes finitos. Para a abordagem da turbulência é empregada a modelagem clássica da turbulência (RANS) com modelo padrão $k - \epsilon$. Os demais parâmetros geométricos, como os raios da entrada e saída da secção onde a turbina está localizada (R_2 e R_3 , respectivamente) foram mantidas constantes. Os resultados de verificação mostraram uma boa concordância com os apresentados na literatura, mesmo empregando um domínio simplificado. Também foi observado que o grau de liberdade R/H apresentou grande influência na potência. Por exemplo, para $R/H = 10$ e $R/H = 1000$ (para o mesmo $R_1/H_2 = 0.04$ e $H_1/H = 10$) a diferença obtida entre a potência superou 520.0 %. A razão R_1/H_2 também apresentou grande sensibilidade sobre a potência. O método Design Construtal conduziu a obtenção de resultados com uma diferença na potência de aproximadamente 47 vezes entre a melhor ($R_1/H_2=0.04$ e $R/H=1000$) e pior geometria ($R_1/H_2=0.4$ e $R/H=10$). Também foi observado que a potência depende de R/H e R_1/H_2 para que o sistema tenha capacidade de produzir a diferença de potencial térmico na região do coletor e força motriz suficiente para movimentar a massa de fluido quente dessa região em direção a saída da chaminé. Além disso, as geometrias ótimas foram obtidas para razões R_1/H_2 intermediárias e para as maiores razões de R/H . Contudo, os extremos inferior e superior de R_1/H_2 conduzem a razões ótimas de $(R/H)_o$ também pequenas, mostrando a influência de cada razão geométrica.

Keywords: Chaminé Solar, Estudo Numérico, Potência Disponível, Parâmetros Geométricos.

ABSTRACT

In the presented work, it is made a numerical study about the main operational principle of a Solar Chimney Power Plant (SCPP) and the influence of some geometric parameters on the available power of SCPP employing the constructal design method. The main objectives are to test the applicability of the studied numerical model in future studies of SCPP geometric optimization and evaluate the effect of the degrees of freedom H_1/H (H_1 and H are the heights of collector and entrance of collector), R/H (R is the collector radius) and R_1/H_2 (R_1 is the chimney radius and H_2 is the chimney height) over the power of the device. For that it is considered an incompressible, turbulent, steady flow with mixed convective heat transfer in a two-dimensional and axisymmetric domain, similar to the one found in a solar chimney. The equations of mass conservation, momentum and energy and the state equation for ideal gases are numerically solved using the finite volume method. The Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) turbulence approach with standard model $k - \epsilon$ was used. The other geometric parameters, as the input radius and outlet of the turbine section, R_2 and R_3 , are considered constant. Verification results showed good agreement with those presented in literature, even for a simplified domain. It is also noticed that the degree of freedom R/H had significant influence over the power. For instance, for $R/H = 10$ and $R/H = 1000$ (for the same $R_1/H_2 = 0.04$ and $H_1/H = 10$) the difference between the achieved power exceeded 520 %. The ratio R_1/H_2 also presented large sensibility over the power. The Constructal Design led to an improvement of achieved power, with a difference of 47 times between the best ($R_1/H_2 = 0.04$ and $R/H = 1000$) and the worst ($R_1/H_2 = 0.4$ and $R/H = 10$) geometries. It is also noticed that the power depends on R/H and R_1/H_2 in such way that the system have capacity to produce the thermal potential in the collector region and driven force enough to flow the air from the hot region towards the chimney outlet. Moreover, optimal shapes were obtained for intermediate ratios of R_1/H_2 and for the highest ratios of R/H . However, the lowest and highest extremes of R_1/H_2 led to lower magnitudes of optimal ratios of $(R/H)_o$, showing the influence of one geometric ratio over the geometric pattern of studied device.

Keywords: Solar Chimney, Numerical study, Available Power, Geometric parameters.

Sumário

LISTA DE SÍMBOLOS.....	7
LISTA DE ABREVIATURAS.....	9
LISTA DE TABELAS.....	10
LISTA DE FIGURAS.....	11
1. INTRODUÇÃO	13
1.1 MOTIVAÇÃO	13
1.2 ESTADO DA ARTE.....	16
1.3 OBJETIVOS	21
1.3.1 Objetivos gerais:.....	21
1.3.2 Objetivos específicos:.....	21
1.4 DELINEAMENTO DO TEXTO	22
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	24
2.1 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMENTO DA CHAMINÉ SOLAR	24
2.1.1 O COLETOR	25
2.1.2 A CHAMINÉ.....	26
2.1.3 AS TURBINAS	26
2.1.4 O ARMAZENAMENTO DE ENERGIA NO COLETOR	27
2.2 FUNDAMENTOS DA TEORIA CONSTRUTAL	28
3. MODELAGEM MATEMÁTICA.....	33
3.1 EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO.....	33
3.2 AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA COM DESIGN CONSTRUTAL.....	35
4. MODELAGEM NUMÉRICA	38
4.1 MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS (MVF)	38
4.2 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
5.1 RESULTADO PARA A TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE $T_s=323K$	48
5.2 POTÊNCIA PARA DIFERENTES TEMPERATURAS DO SOLO.....	57
6. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE.....	61
7. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	64

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da secção transversal da UDCS na região da turbina	m^2
A_1	Área do coletor	m^2
A_2	Área do gerador	m^2
A_3	Área da chaminé	m^2
g	Aceleração da gravidade	m/s^2
H	Altura de entrada do coletor (Inlet)	m
H_1	Altura de saída do coletor (Outlet)	m
H_2	Altura da chaminé	m
H_3	Altura do gerador	m
k	Energia cinética da turbulência	J
p	Pressão	Pa
P	Potência	W
R	Raio do coletor	m
R_1	Raio de saída da chaminé	m
R_2	Raio de entrada do gerador	m
R_3	Raio de saída do gerador	m
T	Temperatura	K
t	Domínio de tempo	s
u	Velocidade – x	m/s
v	Velocidade – y	m/s
V	Velocidade do ar na seção	m/s
Pr_t	Número de Prandtl Turbulento	
P_{op}	Pressão de operação	Pa
R_{ar}	Constante do ar	$J/Kg.K$
R	Constante universal dos gases	$J/Mol.K$
M_{ar}	Massa molecular do gás	kg/Mol

Símbolos gregos

α	Difusividade Térmica	m^2/s
α_t	Difusividade turbulenta	m^2/s
δ	Delta de Kronecker	
ε	Taxa de dissipação da energia cinética da turbulência	
λ	Viscosidade volumétrica	$\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$
μ_t	Viscosidade turbulenta	$\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$
μ	Viscosidade dinâmica	$\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$
ν	Viscosidade cinemática	m^2/s
ρ	Massa específica do fluído	kg/m^3
Ω	Domínio espacial	m

Sub-índices

i	Componente i
j	Componente j
-	Operador da média temporal
m	uma vez maximizado
mm	duas vezes maximizado
o	uma vez otimizado
oo	duas vezes otimizado

LISTA DE ABREVIATURAS

<i>UDCS</i>	Usina de chaminé solar
<i>S</i>	Superfície
<i>CEL</i>	Custo de Energia Elétrica
<i>CFD</i>	Computational Fluid Dynamics

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - CONSTANTES EMPREGADAS NO MODELO NO MODELO $K - E$, Eqs. (3.6 – 3.9).	34
TABELA 3.2 - CONDIÇÕES DE CONTORNO	36

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1- CHAMINÉ SOLAR PROPOSTA POR SCHAICH EM MANZANARES.....	14
FIGURA 1.2- CHAMINÉ INCLINADA (FONTE: ADAPTADO DE DHAHRI E OMRI, 2013).	17
FIGURA 1.3 - ILUSTRAÇÃO DE TORRE COM CHAMINÉ DIVERGENTE (ADAPTADO DE KOONSRSUK E CHITSOMBOON (2006)).	18
FIGURA 2.1 - CAMINHO FEITO PELO AR DE ENTRADA NA CHAMINÉ SOLAR (FONTE: ADAPTADO DE DHAHRI E OMRI, 2013).....	25
FIGURA 2.2 - BALANÇO TÉRMICO NO COLETOR (FONTE: ADAPTADA DE DHAHRI E OMRI, 2013).....	27
FIGURA 2.3 - PRINCÍPIO DE ARMAZENAGEM DE ENERGIA CALORIFICA NO SOLO DO COLETOR ATRAVÉS DE BOLSAS COM ÁGUA (FONTE: ADAPTADO DE DHAHRI E OMRI, 2013).....	28
FIGURA 2.4 - EXEMPLOS DE FORMA E ESTRUTURA DE SISTEMAS DE FLUXO E COMPARAÇÃO ENTRE PADRÕES PRESENTES NA NATUREZA (FONTE: BEJAN E LORENTE, 2008).	29
FIGURA 2.5 - CAVIDADE EM Y PARA UM CORPO CONDUTOR BIDIMENSIONAL COM GERAÇÃO DE CALOR UNIFORME LORENZINI ET AL. (2014).	32
FIGURA 3.1- GEOMETRIA DA CHAMINÉ SOLAR AVALIADA NUMERICAMENTE.....	35
FIGURA 3.2 - ESQUEMA ILUSTRANDO O PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO REALIZADO APLICANDO O MÉTODO DESIGN CONSTRUTAL COM MECANISMO DE BUSCA EXAUSTIVA.	37
FIGURA 4.1- TÉCNICA DE DISCRETIZAÇÃO (MALISKA, 2004).	39
FIGURA 4.2 - OBTENÇÃO DE Φ_f EM UMA FACE DO VOLUME DE CONTROLE (ADAPTADO DE DOS SANTOS 2011).	40
FIGURA 4.3 - COMPORTAMENTO DOS RESÍDUOS DAS ITERAÇÕES.	42
FIGURA 4.4 - MALHA EMPREGADA NO ESTUDO.....	43
FIGURA 4.5 - ESTUDO DE INDEPENDÊNCIA DE MALHA.	44
FIGURA 4.6 - REFINO DE MALHA NA REGIÃO DO GERADOR.	44
FIGURA 4.7 - COMPARAÇÃO ENTRE OS PERFIS DE VELOCIDADES NA REGIÃO CENTRAL DA SCPP OBTIDAS NO PRESENTE TRABALHO E EM PATEL ET AL. (2014).....	46
FIGURA 4.8 – PERFIL DE TEMPERATURAS AO LONGO DO RAIO DO COLETOR PARA UMA POSIÇÃO $y = 0,025$ M.	47
FIGURA 5.1 - AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DA CHAMINÉ PARA AVALIAR A SENSIBILIDADE DAS VARIÁVEIS PARA POSTERIOR OTIMIZAÇÃO.....	49
FIGURA 5.2 – EFEITO DA RAZÃO R/H SOBRE A POTÊNCIA DA CHAMINÉ SOLAR.	50
FIGURA 5.3 – CAMPO DE VELOCIDADES PARA $R/H=10$ E $R_1/H_2 = 0.05$	51
FIGURA 5.4 – CAMPO DE VELOCIDADES PARA $(R/H)_0 = 800$ E $R_1/H_2 = 0.05$	51
FIGURA 5.5– COMPARAÇÃO ENTRE O CAMPO DE VELOCIDADES NA REGIÃO DO GERADOR: A) $(R/H)_0 = 800$ E B) $R/H = 10$	52
FIGURA 5.6 - EFEITO DA RAZÃO R/H SOBRE A POTÊNCIA NA CHAMINÉ PARA VÁRIAS RAZÕES DE R_1/H_2	53
FIGURA 5.7 - CAMPOS DE VELOCIDADE PARA $R_1/H_2 = 0.2$ E DIFERENTES RAZÕES DE R/H : A) $R/H = 10$, B) $(R/H)_0 = 500$ E C) $R/H = 800$	54

FIGURA 5.8 - EFEITO DA RAZÃO R_1/H_2 SOBRE A POTÊNCIA UMA VEZ MAXIMIZADA (PM).	55
FIGURA 5.9 - EFEITO DA RAZÃO R_1/H_2 SOBRE A RAZÃO R/H UMA VEZ OTIMIZADA, $(R/H)_o$.	56
FIGURA 5.10 - CAMPOS DE VELOCIDADE NA REGIÃO DA TURBINA OBTIDAS NAS FIGS. 5.8 E 5.9 PARA DIFERENTES RAZÕES $(R_1/H_2)_o$: A) $(R_1/H_2)_o = 0.02$, B) $(R_1/H_2)_{oo} = 0.04$ E C) $(R_1/H_2)_o = 0.4$.	57
FIGURA 5.11 - EFEITO DA RAZÃO R/H SOBRE A POTÊNCIA PARA DIFERENTES MAGNITUDES DA TEMPERATURA IMPOSTA NO SOLO.	59
FIGURA 5.12 - EFEITO DA VARIAÇÃO DE R/H NA $T_s = 313$ K: A) $R/H=10$, B) $(R/H)_o = 500$ E C) $R/H = 800$.	59
FIGURA 5.13 - EFEITO DA VARIAÇÃO DE R/H NA $T_s = 308$ K: A) $R/H = 10$, B) $(R/H)_o = 300$ E C) $R/H = 800$.	60
FIGURA 5.14 - CAMPOS DE VELOCIDADE PARA CADA T_s E $(R/H)_o$: A) $(R/H)_o = 300$ E $T_s = 308$ K; B) $(R/H)_o = 500$ E $T_s = 313$ K; C) $(R/H)_o = 600$ E $T_s = 318$ K E D) $(R/H)_o = 800$ E $T_s = 328$ K.	60

1. INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

O efeito estufa em nível mundial causado pela queima de combustíveis fósseis, associados à escassez deste recurso energético, tem sido motivo de grande preocupação. É bem conhecido que o efeito estufa traz uma grande quantidade de perdas econômicas e sociais. Por exemplo, Stern (2007) estimou que as perdas econômicas causadas pelo aquecimento Global vão além de 20% do PIB mundial. Por esta razão, cada vez mais países começam a tomar medidas para reduzir a emissão de gases de efeito estufa. Uma dessas medidas é desenvolver as tecnologias que utilizam fontes de energias renováveis e “limpas”. De acordo com Stern (2007) como uma energia renovável e limpa, a energia solar é livre de carbono, inesgotável, sustentável, livre de custos e praticamente ilimitada. Estima-se que o uso de parte da energia solar que incide sobre a superfície da Terra seja capaz de satisfazer a demanda energética atual. Nos últimos anos, a forma de transformação da energia solar abundante para energia que possa ser consumida em diversas aplicações industriais, comerciais e domésticas tem sido um grande desafio. Com a diminuição dos combustíveis fósseis e atuação do efeito estufa, muitos países tem oferecido incentivos econômicos para o desenvolvimento de usinas baseadas em energia solar, que incluem os subsídios não reembolsáveis, empréstimos em condições favoráveis e políticas fiscais favoráveis (Lia et al., 2013).

Os aumentos dos preços do petróleo e da demanda de energia combinado com restrições ambientais recentes têm aumentado rapidamente a demanda mundial por energia renovável. A energia solar é uma das soluções mais promissoras, especialmente considerando sua tecnologia, avanços e seu crescimento nos últimos anos. Uma das opções que vai ajudar a atender a essas demandas é a Usina de chaminé solar (UDCS) ou somente Chaminé Solar. A UDCS é uma proposta de um tipo de planta de energia renovável que transforma a energia solar em eletricidade (Patel et al., 2014).

A UDCS é uma usina de energia de baixa temperatura composto por três elementos essenciais - o coletor, a chaminé, e as turbinas. A chaminé é uma estrutura cilíndrica longa normalmente colocada no centro de um coletor de estufa que é feita de

vidro transparente ou filme plástico (Patel et al., 2014), a mesma pode ser vista na Figura 1.1.

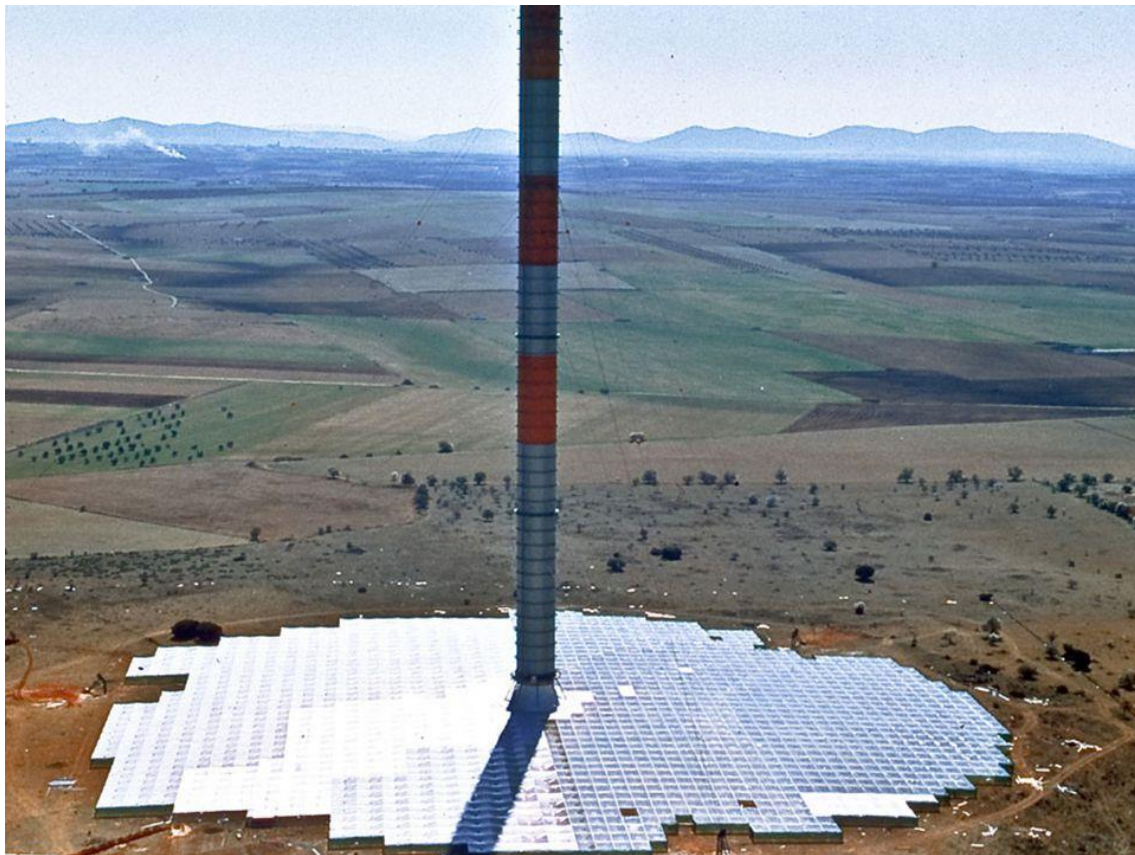


Figura 1.1- Chaminé Solar proposta por Schaich em Manzanarez.

A tecnologia de energia da chaminé solar é bem aceita e tida como um dos métodos que pode utilizar a energia solar em grande escala. Baseia-se em três princípios simples: o efeito estufa, o empuxo do efeito chaminé e o princípio de energia eólica. Por conseguinte, o coletor de energia solar é a fonte de calor, a chaminé é o mecanismo motriz e o gerador de turbina é a unidade de conversão de energia (Cao et al., 2013).

A chaminé solar (UDCS) não tem nenhum efeito adverso sobre o ambiente, não necessita de água de refrigeração e possui baixo custo de manutenção, ao contrário do que se observa em outros dispositivos de energia solar que necessitam de uma tecnologia com alto custo financeiro (o que a torna inviável em grande escala). Essas vantagens fazem da UDSC uma tecnologia promissora para a geração de eletricidade em regiões onde a energia solar é abundante, como o Brasil por possuir uma vasta zona perto da linha do Equador. Essa tecnologia é especialmente atraente para

vastas regiões desérticas que carecem de recursos hídricos, mas que sejam abundantes em energia solar (Guo et al., 2013).

A maior parte do território brasileiro está localizada relativamente próxima da linha do Equador, de forma que não se observam grandes variações na duração solar do dia. Contudo, a maioria da população brasileira e das atividades socioeconômicas do país se concentra em regiões mais distantes do Equador. Em Porto Alegre, capital brasileira mais meridional (cerca de 30° S), a duração solar do dia varia de 10 horas e 13 minutos a 13 horas e 47 minutos, aproximadamente, entre 21 de junho e 22 de dezembro, respectivamente (Aneel, 2005).

Segundo Plano Nacional de Energia PNE 2030, o principal fator ambiental que favorece o aproveitamento solar para produção de energia é a não modificação do equilíbrio térmico da Terra. Os equipamentos solares utilizam parte da irradiação disponível como calor ou como eletricidade úteis, antes da energia ser finalmente degradada como calor para o meio ambiente. Portanto, não há aumento ou diminuição líquida do calor. Além disso, tais sistemas são capazes de contribuir para o suprimento de energia elétrica, sem emissão de gases de efeito estufa ou de gases ácidos. Outra vantagem importante é o fato de dispensar a necessidade de transporte de combustível, diminuindo riscos de acidentes, e também a não formação de lagos, evitando a perturbação do equilíbrio ecológico local. Estas são algumas características que o recomendam como um dispositivo de aplicação costeira, pois não afeta o ambiente em torno, não gerando quaisquer transtornos para a localidade.

O aproveitamento da energia gerada pelo Sol é considerado, hoje, uma das alternativas energéticas mais promissoras para enfrentar os desafios da expansão da oferta com menor impacto ambiental (PNE2030).

A energia solar térmica é uma tecnologia relativamente nova, porém tem-se mostrado bastante promissora, devido aos reduzidos impactos ambientais associados e à enorme disponibilidade de recursos em algumas regiões com grande radiação solar direta, como o Nordeste brasileiro (PNE2030).

Outra característica importante sobre esse estudo é a possibilidade do emprego de modelagem numérica para obter recomendações teóricas sobre o potencial energético destes dispositivos, facilitando assim o projeto e aplicação do mesmo, para futuras sedes de testes, por exemplo.

A avaliação geométrica destes dispositivos e a otimização do mesmo para melhorar seu desempenho torna-se importante no contexto de energia renovável,

uma vez que a sua utilização é benéfica por diversas razões para a própria humanidade, então a racionalização desse recurso também é importante.

1.2 ESTADO DA ARTE

Com relação aos estudos realizados na literatura, mesmo existindo poucos protótipos em escala comercial, como o proposto por Haaf et al. (1983) em Manzanares na Espanha (Fig. 1.1), onde um estudo numérico de rendimento mensal da chaminé solar foi realizado através das informações experimentais retiradas dessa planta, além de estudos de viabilidade econômica que têm sido propostos na literatura. Alguns exemplos são apresentados abaixo:

Schlaich et al. (2004) se preocuparam em estimar o custo de plantas de energia solar e o custo de energia elétrica (CEL) para diferentes capacidades de potência. Além do mais, foram feitos experimentos para diferentes tipos de componentes, tais como a membrana do coletor, onde foram estudados coletores plásticos e de vidro, achando assim uma melhor aplicação e redução de custo do mesmo referente ao CEL.

Fluri et al. (2009) apresentaram um modelo de custo mais detalhado para estimar o custo de duas plantas comerciais cujas configurações eram semelhantes à planta proposta por Schlaich com uma potência de 100 MW. Em sua análise econômica, o impacto de créditos de carbono no CEL também foi considerado. Estes estudos mencionados acima consideraram uma central de chaminé de concreto reforçado de energia solar comercial (CCCRE).

Cao et al. (2013) realizaram uma análise econômica de UDCS convencionais e UDCS inclinada conforme pode ser vista na Fig. 1.2, onde a mesma é instalada em encostas de montanhas, com coletores em três capacidades de energia (5.1 MW, 35.1 MW e 104.7 MW) proposto no noroeste da China. Neste estudo foi realizado um estudo de fluxo de caixa para todo o seu período de funcionamento. Na análise econômica também foi levado em consideração os benefícios dos créditos de carbono e o custo do imposto de renda. O período de operação da planta foi assumido em 30 anos.

De acordo com Mullet (1987) a eficiência global da instalação para apenas uma chaminé não é significativa. Dessa forma, a grande vantagem em utilizar uma UDCS é observada quando se tem uma associação de diversas UDCS, similarmente ao observado em dispositivos de conversão de energia eólica e energia das

ondas. O conjunto de UDCS pode ser usado para geração de energia em larga escala, com diversas chaminés. A baixa eficiência de um único dispositivo fez com que muito poucos modelos experimentais de UDCS fossem construídos e testados, assim modelos mais teóricos e matemáticos têm sido desenvolvidos para prever o desempenho das UDCS.

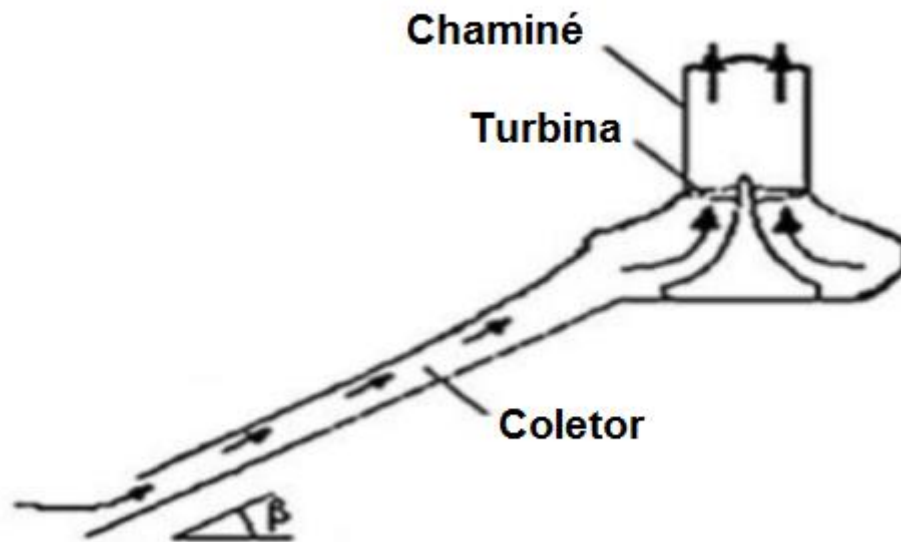


Figura 1.2- Chaminé inclinada (Fonte: Adaptado de Dhahri e Omri, 2013).

Kirstein e Backstrom (2006) realizaram análise numérica para estudar o escoamento através de uma seção de transição entre o coletor e a chaminé na UDCS, usando o software de dinâmica dos fluídos computacional (CFD – do inglês: *Computational Fluid Dynamics*) comercial, ANSYS CFX. O CFX foi usado para verificar os dados experimentais de um modelo UDCS dimensionado. Devido à boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos, observou-se que o uso de modelos computacionais podem ser empregados para a obtenção de recomendações de desempenho de uma chaminé solar.

Koonsrisuk e Chitsomboon (2006) estudaram o efeito da variação de área na torre em uma UDCS usando CFD. De seus estudos, pode ser concluído que uma torre divergente (conforme ilustra a Fig. 1.3) ajuda a aumentar a taxa de fluxo de massa e energia cinética em comparação com uma torre de área de secção transversal constante, ou seja, um cilindro. Foi observado também que a energia cinética máxima ocorreu na base da chaminé, onde deve ser colocada a turbina. Para uma torre convergente, a velocidade aumenta no topo da torre, mas a vazão mássica diminui

causando, assim, uma energia cinética semelhante ao de uma torre de secção transversal constante.

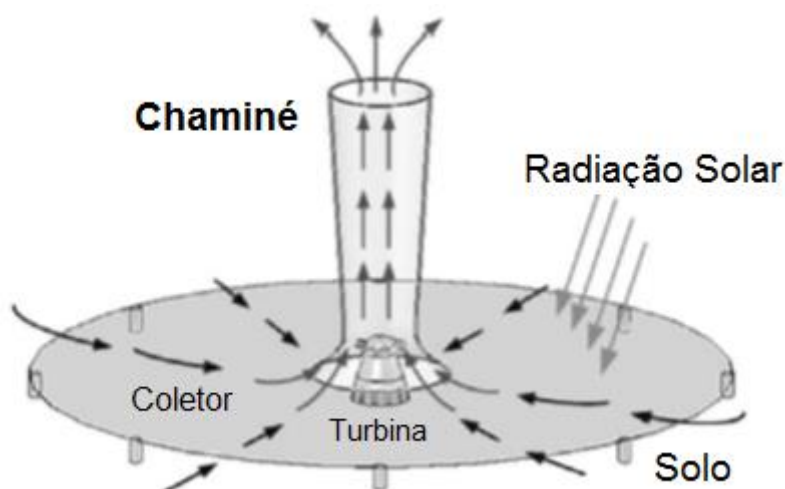


Figura 1.3 - Ilustração de torre com chaminé divergente (Adaptado de Koonsrisuk e Chitsomboon (2006).

Patel et al. (2014) exploram a influência de vários parâmetros geométricos mantendo fixos a altura da chaminé solar e o diâmetro do coletor sobre o desempenho do UDCS, ou seja, o dispositivo que possuía a maior potência na região da turbina. Neste trabalho foram avaliados parâmetros geométricos como: a abertura de entrada do coletor, diâmetro de saída do coletor, altura da saída do coletor, abertura de entrada da chaminé e os ângulos de divergência. Diferentes configurações foram variadas e testadas para estudar e melhorar as características escoamento de ar dentro de um UDCS. Contudo, neste trabalho o volume total do coletor e da chaminé não foi mantido constante, o que seria uma premissa para a aplicação do Design Construtal (Bejan, 2000; Bejan e Lorente, 2008).

Ainda no estudo de Patel et al. (2014) foi empregado o ANSYS CFX-Versão 14 através do método de volumes finitos para fins de simulação neste projeto de pesquisa. Foram resolvidas as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia, além de uma equação de estado para a massa específica, para obtenção dos campos de velocidade, pressão e temperatura. A altura total da UDCS foi de 10.0 m, e o coletor de energia solar possuía um diâmetro de 8.0 m. A altura de entrada do coletor e o ângulo de divergência da chaminé foram variados neste trabalho. Logo foram obtidos resultados em função desses dois parâmetros. A altura da base do

coletor foi variada de 0.5 m, 0.75 m e 1.0 m a partir do nível do solo. O diâmetro de saída do coletor foi variado a partir de 0.6 m a 1.0 m e o diâmetro da chaminé na garganta foi variada de 0.25 m a 0.3 m. Com esta uma variação de parâmetros foi possível ampliar o estudo sobre o caso, onde a variação de geometria influencia diretamente na potência da UDCS.

Zhou et al. (2007) desenvolveram um estudo experimental e observaram que a temperatura do ar decresce conforme chega ao topo da chaminé solar. Os mesmos resultados para a distribuição do campo de temperaturas foram obtidos utilizando-se os métodos numéricos através de um software CFX.

Guo et al. (2013) propuseram investigar os efeitos da radiação solar, a queda de pressão da turbina, e a temperatura ambiente no desempenho do sistema em detalhes, levando em consideração dados experimentais obtidos da usina existente na Espanha. Os resultados das simulações mostraram que o modelo de radiação é essencial para estimar a energia absorvida pela UDCS.

Ghalamchi et al. (2014) desenvolveram uma planta piloto de uma chaminé solar com 3 m de diâmetro e coletor de 2 m de altura fabricada na Universidade do Teerã, no Irã. As distribuições de temperatura e velocidade do ar foram medidas e avaliadas. A diferença de temperatura entre a entrada da chaminé solar e o ambiente atingiu a 26.3 °C. Os dados de saída para diferentes alturas de entrada do coletor foram obtidos e o relatório mostrou que a redução do tamanho de entrada (altura) tem um efeito positivo sobre o rendimento de produção de energia na chaminé solar.

Kasaeian et al. (2014) realizaram um estudo analítico e numérico para otimização geométrica do protótipo da chaminé solar na Universidade de Teerã. Um modelo matemático fundamental que descreve o escoamento foi apresentado, e a avaliação do desempenho da chaminé solar foi simulada com configurações operacional e geométrica. As previsões numéricas foram validadas através da comparação com os dados experimentais da chaminé solar piloto que foi construída em altura de 2 m e um raio de coletor de 3 m. Os resultados mostraram que, a entrada do coletor de 6 cm, a altura da chaminé de 3 m e o diâmetro da chaminé de 10 cm foram as melhores alternativas para a chaminé solar piloto construída. Verificou-se que a magnitude da velocidade pode ser aumentada de 4% a 25% em alguns casos diferentes. Além disso, os resultados indicaram que a altura e o diâmetro de saída da chaminé são as variáveis físicas mais importantes na concepção da chaminé solar.

Segundo Cao et al. (2013) as diferenças de condições climáticas variam de um lugar para outro, afetando o desempenho da UDCS, e, assim, o design (forma geométrica) da chaminé solar deve ser avaliado para diferentes regiões. Em função disso, um programa baseado em TRNSYS foi construído para simular o desempenho das UDCS. Com o programa, o principal parâmetro meteorológico que influencia o desempenho da UDCS é identificado. Verificou-se que a geração de energia da UDCS possui uma dependência maior da irradiação solar local do que para da temperatura ambiente. Foi observado que a UDCS com maior capacidade de geração possui melhores características em relação custo-benefício.

Apesar dos diversos estudos e várias recomendações sobre o princípio de funcionamento de uma UDCS, a obtenção de recomendações geométricas para o dispositivo empregando Design Construtal ainda é um tema pouco explorado na literatura. Nesse sentido, pretende-se no presente trabalho apresentar uma recomendação teórica sobre a influência de determinados parâmetros geométricos sobre a potência de uma UDCS.

Koonsrisuk et al. (2010) realizaram um estudo de otimização geométrica em uma chaminé solar usando um método analítico determinado pelas equações envolvidas no fenômeno e chegaram a conclusão que a taxa de geração de energia por área é proporcional ao tamanho da escala, ou seja, o tamanho da planta sendo determinadas através do estudo da razão altura/raio da chaminé, taxa de escoamento máxima e também a potência máxima da chaminé.

Lorente et al. (2010) também verificou através do Design Construtal que a potência gerada por unidade de área de terra é proporcional ao tamanho da chaminé solar, ou seja, dependente da altura da chaminé, raio do coletor e o raio da chaminé. Constatou-se também que a altura da chaminé, raio do coletor e o raio da chaminé não podem aumentar de forma independente e em uma razão indeterminada, ou seja, possui um limite máximo de relação. Neste estudo a aplicação do Design Construtal foi realizada de forma analítica e com apenas um grau de liberdade, diferente do argumentado aqui onde se usará um método numérico para avaliação geométrica proposta utilizando o Design Construtal.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivos gerais:

Como objetivo geral pretende-se aplicar o Design Construtal para avaliar numericamente a influência da geometria na potência de uma chaminé solar, ou seja, é estimada uma recomendação teórica a respeito do efeito de parâmetros geométricos do dispositivo sobre sua capacidade de geração. O problema consiste na avaliação de 3 graus de liberdade. Na área do coletor têm-se dois graus de liberdade, (H_1/H e R/H), ou seja, as influências da variação do raio do coletor em função da entrada do mesmo e a variação da saída do coletor com a sua entrada e na chaminé tem-se o ultimo grau de liberdade (R_1/H_2) onde se tem a relação entre o raio de saída da chaminé e a altura da chaminé. Para tal objetivo considerou-se a área do gerador constante, a fim de representar a área de um determinado gerador pré-estabelecido através do modelo desenvolvido por Patel et al (2014). Utilizou-se o modelo matemático, numérico (e suas simplificações) e condições de contorno semelhantes à de Patel et al.(2014), tendo em vista que o trabalho do mesmo é tridimensional e o trabalho atual trata-se de um domínio bidimensional e axissimétrico possibilitando a avaliação de um número maior de graus de liberdade.

1.3.2 Objetivos específicos:

No presente estudo, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a validade do modelo numérico axissimétrico da chaminé solar;
- Avaliar o efeito da variação do Raio do coletor em função de entrada do coletor (R/H) na potencia disponível na chaminé Solar (P_{disp});
- Avaliar o efeito da variação do comprimento de saída do coletor com a altura de entrada do coletor (H_1/H) na potencia disponível da chaminé Solar uma vez maximizada, (P_{disp})_m;

- Avaliar o efeito da variação do comprimento de saída do coletor com a altura de entrada do coletor (H_1/H) sobre a razão $(R/H)_o$, ou seja, uma vez otimizada;

- Avaliar o efeito da variação do raio de saída da chaminé com a altura da chaminé (R_1/H_2) na potencia disponível duas vezes maximizada na chaminé Solar, $(P_{disp})_{mm}$;

- Avaliar o efeito da variação do raio de saída da chaminé com a altura da chaminé (R_1/H_2) na razão (H_1/H) uma vez otimizada, $(H_1/H)_o$, e na razão (R/H) duas vezes otimizada, $(R/H)_{oo}$.

1.4 DELINEAMENTO DO TEXTO

O texto será dividido em etapas, nas quais a fundamentação e a aplicação direta do método são apresentadas. Em uma primeira etapa será apresentada a fundamentação teórica para o desenvolvimento das técnicas aplicadas, onde o mesmo explica como cada equipamento presente na chaminé solar se comporta, destacando suas funções e aplicações.

Após o capítulo de princípio de funcionamento de uma chaminé solar, têm-se os fundamentos da teoria Construtal, onde se abrange o tema Design Construtal explicando os fundamentos dessa teoria e a aplicabilidade em elementos inanimados.

Após tratar os fundamentos da teoria Construtal, um capítulo de modelagem matemática é apresentado após o capítulo de fundamentos da Teoria Constructal, onde serão abordadas as equações fundamentais do processo físico utilizados pelo software para realizar todos os cálculos necessários para o entendimento do problema. Também são apresentados os equacionamentos dos graus de liberdade utilizados. Todas as condições de contorno e a gama de simulações realizadas são apresentadas nesse capítulo.

Após o tratamento da modelagem matemática têm-se o capítulo de modelagem numérica onde é apresentado o método dos volumes finitos. Nesse ponto demonstram-se algumas constantes encontradas no processo de métodos numéricos, além das constantes utilizadas no processo de simulação numérica. No mesmo capítulo é feita a validação do modelo matemático e numérico além do desenvolvimento de refinamento de malha.

Posteriormente ao capítulo de modelagem numérica encontra-se o capítulo de resultados e discussões, no qual são apresentados os resultados obtidos em todas as simulações e os resultados que envolvem todos os graus de liberdade e geraram a geometria ótima da chaminé. É demonstrado no mesmo capítulo a potência máxima da chaminé e os graus de liberdade com maior relevância no processo.

Por fim, após os resultados e discussões tem-se o capítulo de conclusão, onde apresenta-se o perfil escolhido de chaminé solar, devido aos graus de liberdade e sua máxima potência gerada, relacionando sempre ao modelo numérico em estudo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DA CHAMINÉ SOLAR

A chaminé solar converte a radiação solar em eletricidade através da combinação de três princípios bem conhecidos: o efeito de estufa, a torre e as turbinas de vento. O ar é aquecido através de um grande telhado de vidro ou plástico. A radiação solar direta atinge o teto de vidro (coletor), onde frações específicas da energia são refletidas, absorvidas e transmitidas. As quantidades destas frações dependem do ângulo de incidência solar e características ópticas do vidro, tais como o coeficiente de refração, espessura e de absorção. A radiação solar transmitida atinge a superfície da terra; uma parte da energia é absorvida enquanto a outra parte é refletida de volta para o coletor, onde fica retida na mesma devido a mudança de comprimento de onda após incidência no solo. A reflexão múltipla da radiação permanece resultado da maior fração da energia absorvida pelo solo. Por meio do mecanismo de convecção natural, a superfície do solo quente aquece o ar adjacente, provocando a sua subida. O ar aquecido sobe para a chaminé da planta, arrastando desse modo mais ar no perímetro do coletor e iniciando assim convecção forçada que aumenta o aquecimento do ar no coletor. Através de convecção mista, o coletor de ar quente aquece a parte inferior do topo do coletor (Dhahri, 2013).

Parte da energia absorvida pela superfície do solo é conduzida para a terra mais fria abaixo. Por sua vez, por meio de convecção natural e forçada, a energia é transferida do topo do coletor a partir da sua superfície para o ar ambiente adjacente a ela. O caminho que o ar de entrada faz da sua entrada à sua saída pode ser visto na Fig. 2.1. À medida que fluído se desloca do perímetro do coletor para a chaminé sua temperatura aumenta, enquanto a velocidade do ar permanece aproximadamente constante por causa do aumento da altura do coletor. A diferença de pressão entre a base da chaminé e pressão ambiente na saída pode ser calculada a partir da diferença de massa específica. Isto por sua vez depende das temperaturas do ar na entrada e na parte superior da chaminé. A diferença de pressão disponível para acionar a turbina pode ser reduzida pela perda por atrito nas paredes da chaminé, as perdas na entrada e a perda de energia cinética de saída. À medida que o ar sai do coletor e flui através da(s) turbina(s),

a energia cinética do ar movimenta as pás da turbina que, por sua vez, acionam o(s) gerador(es) (Dhahri, 2013).

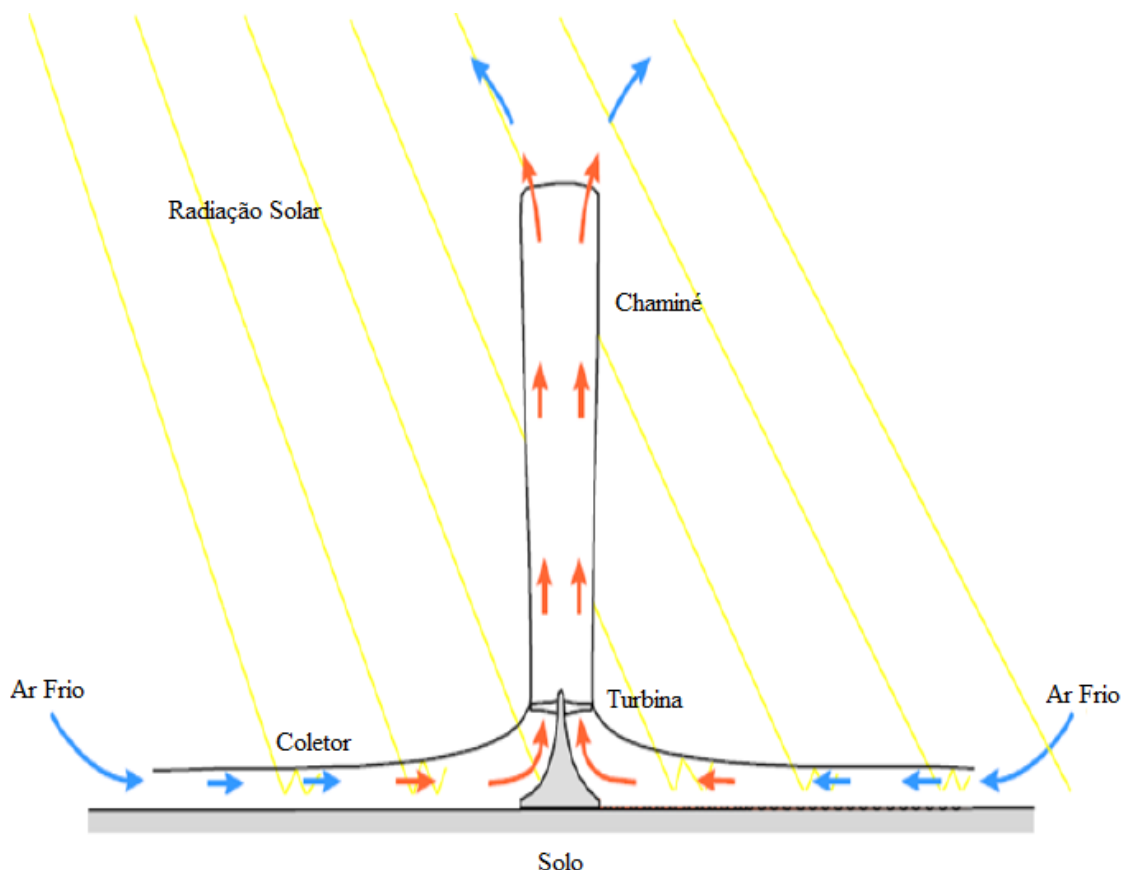


Figura 2.1 - Caminho feito pelo ar de entrada na chaminé solar (Fonte: Adaptado de Dhahri e Omri, 2013).

2.1.1 O COLETOR

O componente principal de uma UDCS é o coletor solar. O Coletor de energia solar funciona como uma espécie de trocador de calor, que transforma a energia da radiação solar em energia interna do meio de transporte. O coletor é a parte da chaminé que produz ar quente pelo efeito estufa. Ele possui um telhado feito de filme plástico ou vidro. O material de cobertura é esticado horizontalmente acima do solo. A altura do telhado aumenta conforme chega à base da chaminé, de modo que o ar é desviado para a base da chaminé com perda mínima por atrito. Esta cobertura admite que a componente de radiação solar de onda curta passe e retém a radiação de onda longa oriunda do chão aquecido. Assim, o terreno sob o coletor aquece-se e transfere o seu calor para o ar que escoar na direção radial da periferia do coletor para o centro do

mesmo. Posteriormente, o escoamento expande na turbina e se desloca em direção a saída da chaminé (Fig. 2.1). A estrutura do coletor muda dependendo do material de revestimento que se utilizou (Dhahri, 2013).

2.1.2 A CHAMINÉ

Chaminé (ou torre tubular) é um importante componente da chaminé solar. A torre, que atua como uma grande chaminé está localizada no centro da cúpula da estufa e é o motor térmico para a tecnologia. A torre cria um diferencial de temperatura entre o ar frio na parte superior e o ar aquecido na parte inferior. Isto cria o efeito de chaminé, que suga o ar a partir da parte inferior da torre para fora no topo da mesma. A chaminé é extremamente elevada e precisa de uma base estável, enquanto ainda permitir o livre fluxo de ar através da turbina. Além disso, seria vantajoso ter a turbina o mais baixo possível na chaminé para tornar a sua construção mais simples (Dhahri, 2013).

2.1.3 AS TURBINAS

A turbina da chaminé solar é outro componente importante da usina, uma vez que converte a energia do ar através do gerador em energia elétrica. Ele tem influência significativa sobre a usina como a queda de pressão e a taxa de fluxo de massa da mesma. As especificações para turbinas de chaminés solar são, em muitos aspectos, semelhantes a aqueles para grandes turbinas eólicas. Ambos convertem grandes quantidades de energia no escoamento de ar em energia elétrica e alimentam uma rede. Mas também existem várias diferenças importantes. As típicas turbinas de chaminé solar possuem características contrastantes à turbinas de geradores eólicos tradicionais, tais como, a potência das turbinas é canalizada em um escoamento interno (tubos), de forma que assim sua potência máxima em relação à eficiência total é 59,8% (Betz-limit, máximo de potência que pode ser retirado do ar), que é aplicável para os dutos, a direção do escoamento de ar em sentido contrário é conhecida e se mantém constante, as turbinas são protegidas contra condições climáticas adversas, mas têm de lidar com temperaturas mais elevadas; os grandes volumes do coletor e da chaminé agem para amortecer as grandes flutuações na velocidade do escoamento de ar. Isto faz com que, as cargas dinâmicas sobre as pás da turbina e todos os outros componentes

rotativos sejam comparativamente baixas. Além disso, a queda de pressão da turbina em UDCS, é cerca de 10 vezes maior do que em turbinas eólicas (Dhahri, 2013).

2.1.4 O ARMAZENAMENTO DE ENERGIA NO COLETOR

O chão abaixo do coletor se comporta como um meio de armazenamento, e pode até mesmo aquecer o ar por um tempo significativo após o por do sol. A eficiência da instalação de apenas uma chaminé solar é inferior a 2% e depende, principalmente, da altura da torre. Como resultado, essas usinas têm sua construção recomendada em terrenos de baixo custo de aquisição, que geralmente estão situadas em regiões desérticas ou algumas regiões litorâneas com baixa ocupação. Tubos pretos cheios de água são colocados lado a lado no solo com toldo preto sob o coletor de vidro (Fig. 2.3). Eles são cheios com água e, posteriormente, fechados de modo a não permitir a evaporação. O volume de água no tubo é selecionado para corresponder a uma camada de água com uma profundidade de 5 a 20 cm, dependendo da potência desejada. Uma vez que a transferência de calor entre os tubos negros e água é muito maior do que entre o toldo preto e o solo, mesmo a baixa velocidade de fluxo da água nos tubos, e uma vez que a capacidade calorífica da água (4.2 kJ/kg) é muito maior do que de solo (0.75-0.85 kJ/kg) a água no interior dos tubos armazena uma parte do calor solar e liberta-a durante a noite, quando o ar no coletor arrefece (Dhahri, 2013).

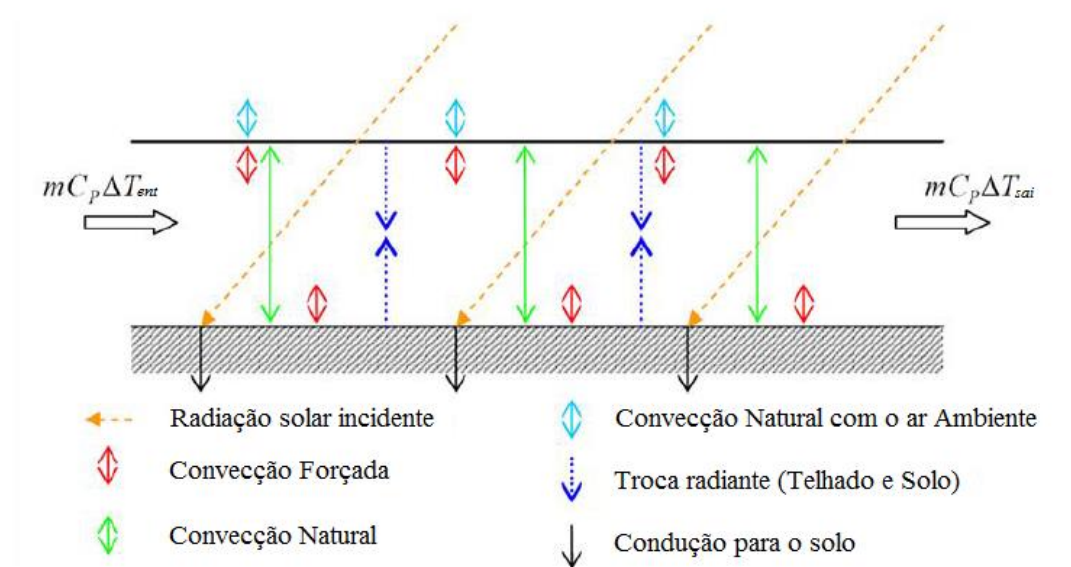


Figura 2.2 - Balanço térmico no coletor (Fonte: Adaptada de Dhahri, 2013).

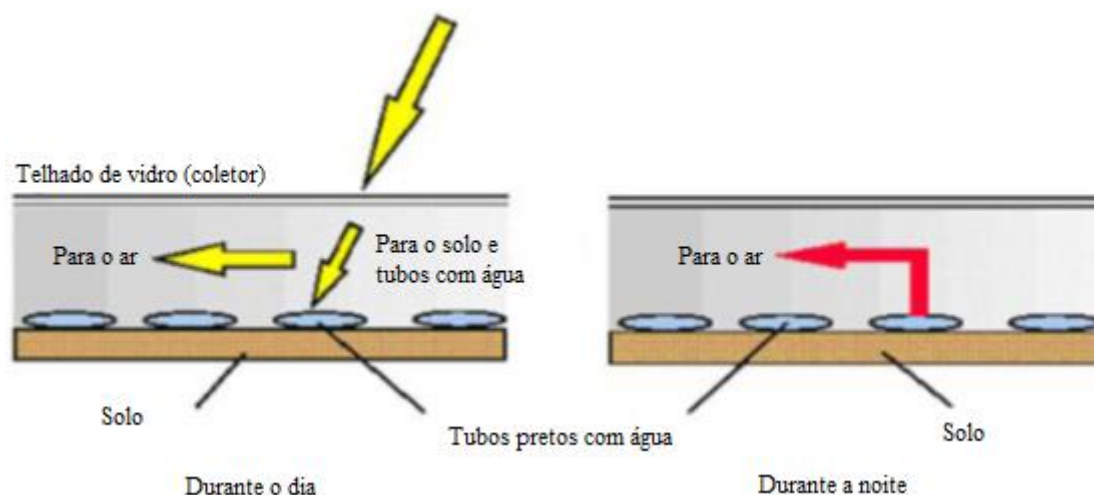


Figura 2.3 - Princípio de armazenagem de energia calorífica no solo do coletor através de bolsas com água (Fonte: Adaptado de Dhahri, 2013).

2.2 FUNDAMENTOS DA TEORIA CONSTRUTAL

Adrian Bejan formulou a Teoria Constructal para explicar padrões geométricos que se repetem na natureza, através da análise da natureza ao seu redor, contrariando ainda a comunidade científica, onde muitas vezes foi desacreditado. A teoria proposta por Bejan (1996) defende que as formas geométricas de sistemas de fluxo presentes na natureza não são aleatórias, ao acaso, e sim determinísticas e orientadas por um princípio físico.

O princípio físico que a Teoria Constructal explica que as formas e padrões encontrados na natureza são determinísticos e não aleatórios, a qual afirma que “Para um sistema onde existe escoamento persistir no tempo, sua configuração deve evoluir de modo a facilitar o acesso às suas correntes (fluido, energia...)” (Bejan e Zane, 2012). Nessa visão, todo e qualquer fluxo visa sempre evoluir e direcionar-se por um caminho mais simples e de fácil acesso. Vários sistemas podem ser representados aqui, de bacias de rios às geometrias de árvores, pulmões humanos, e demais formas. A Fig. 2.4 demonstra alguns exemplos onde a forma e estrutura dos sistemas de fluxo são gerados pela Lei Constructal, bem como, a semelhança entre alguns padrões encontrados na natureza. Por exemplo, as imagens do topo da Fig. 2.4 ilustram uma comparação do padrão geométrico que surge no escoamento de água em rios, do ar nos pulmões e a geometria de escoamentos em canais e dutos.

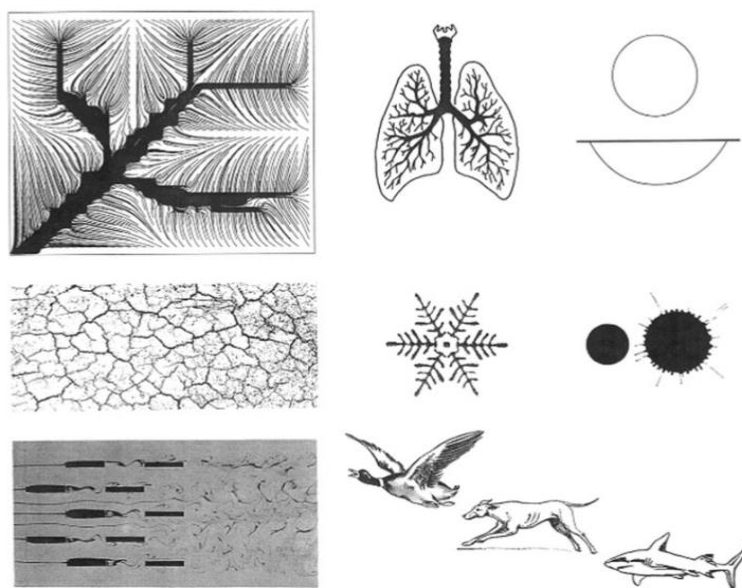


Figura 2.4 - Exemplos de forma e estrutura de sistemas de fluxo e comparação entre padrões presentes na natureza (Fonte: Bejan e Lorente, 2008).

A Lei Constructal aborda sistemas de fluxo onde, para todo o tipo de sistema em que houver um desequilíbrio, ou movimento, a estrutura deste sistema tenderá a adaptar-se no tempo de forma a maximizar este processo de movimento e minimizar a resistência ao escoamento. O princípio Constructal tem sido empregado em problemas de dimensões finitas submetidos a alguma espécie de fluxo, unificando sistemas animados e inanimados, exemplos são redes de transporte, geometria de rios, árvores, a forma de uma descarga elétrica e até em economia como apresentam os estudos de Bejan e Merkx (2007), Bejan e Lorente (2008), Miguel (2013) e Rocha et al. (2013).

A *Lei Constructal* mostra qual é a tendência da natureza e com isso permite obter uma melhor condição de fluxo. Usando essa lei podemos projetar processos de forma orgânica e dinâmica para obter melhores ou mais eficientes resultados (Bejan e Zane, 2012).

Um sistema de escoamento possui duas propriedades básicas, o escoamento (por exemplo, fluido, calor, massa ou informação) e a estrutura por onde ele flui. Um raio, por exemplo, é um sistema de escoamento de uma descarga elétrica. Em um pequeno instante de tempo são criados braços luminosos revelando a estrutura mais eficiente para dispersar a corrente elétrica de um volume (nuvem) a um ponto (chão,

árvore, para-raios ou outra nuvem). Assim como em raios, vários outros sistemas apresentam o padrão de estrutura em forma de árvore chamado de *treelike*. Este padrão é o formato mais eficaz do fluxo ir de um ponto para um volume ou de um volume para um ponto em sistemas de elevada magnitude de fluxo (Bejan e Zane, 2012).

Mesmo sendo uma forma muito comum na natureza, o padrão *treelike* é apenas uma das várias manifestações da Lei Constructal.

A Lei Constructal estabelece que sistemas de escoamento devem evoluir através do tempo. O interessante neste princípio físico é que ele ocorre em diferentes escalas. Cada árvore, cada arroio e cada estrada são componentes que possuem um sistema de escoamento e estão inseridos em estruturas maiores, como florestas, rios e redes de transporte. Os componentes de diferentes tamanhos se unem facilitando o escoamento global (Bejan, 2000; Bejan e Zane, 2012).

Segundo Bejan e Lorente (2008), pode se perceber a tendência dos rios atingirem o oceano, das veias atingirem o coração e das pessoas se deslocassem para seus locais de trabalho gastando a menor energia possível. Assim, todo sistema que escoar acaba por se modificar. Em tais sistemas de escoamento existem também resistências, e seu movimento se dá para aperfeiçoar o fluxo de maneira a evitar ou minimizar as resistências. Os sistemas, portanto, firmam seu desenho e seu ritmo e passam pelos anos se modificando de forma natural. Essa dinâmica não acontece de forma isolada, pois os sistemas interagem com o meio ao redor, evoluindo no tempo de forma a evitar as resistências ao escoamento e, assim, equilibrando-se com seu entorno.

Vários aspectos da evolução dos sistemas podem ser atestados pela simples observação. Pode-se ver a semelhança entre o design de sistemas inanimados, como os aviões. Em nenhum dos casos um está copiando o outro. A evolução do design de tais sistemas de fluxo, sejam eles aquáticos ou aéreos, culmina com uma aparência semelhante. Isso comprova que a lei constructal não se trata de uma lei da biologia, mas fundamentalmente de uma lei da física. Assim, sistemas naturais refletem em seus designs o processo de evolução e seleção natural de muitos anos, o que acaba por ser um bom ponto de partida na criação ou melhoria do design de projetos elaborados pelo homem (Bejan, 2000, Bejan e Lorente, 2008).

A teoria constructal aplica-se em todo e qualquer tipo de sistema de fluxo, abrangendo as mais diferentes áreas, desde a engenharia, sistemas biológicos, sistemas sociais e econômicos, onde o fluxo de interesse acaba por evoluir no tempo de forma a minimizar suas resistências internas. Em Bejan e Zane (2012) o autor cita que:

“a rota mais fácil para os fluxos consiste no balanço das imperfeições no sistema. Todos os componentes do sistema colaboram, trabalhando juntos para criar um todo que é menos e menos imperfeito no tempo”.

O método Design Construtal é baseado na aplicação da Teoria Constructal em sistemas de fluxo. De acordo com Bejan e Lorente (2008) o método não é a otimização em si do problema, mas sim a definição dos objetivos e restrições do mesmo, visando a melhor distribuição das imperfeições.

Diversos problemas têm sido avaliados geometricamente através do Design Construtal. A maioria dos estudos são dedicados a avaliação geométrica de cavidades complexas inseridas em sólidos com geração de calor (Lorenzini et al., 2014; Gonzales et al., 2015) e problemas de transferência de calor por convecção (Dos Santos et al., 2013; Rocha et al., 2013). Contudo, geometrias em problemas de energia renovável também têm sido avaliadas, como por exemplo, são apresentados nos dispositivos de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica (Dos Santos et al., 2014; Gomes et al., 2015). No presente trabalho pretende-se estender essa avaliação para o estudo de uma chaminé solar.

Exemplos da aplicação do Design Construtal para a avaliação de sistemas de geometrias complexas têm sido vistas na literatura, principalmente em problemas de cavidades, onde a principal contribuição está relacionada a geometria e não a fenomenologia física. Um exemplo é apresentado em Lorenzini et al. (2014) para a otimização geométrica de uma cavidade em forma de Y, Fig. 2.5. O objetivo do problema era distribuir a cavidade de forma a minimizar a máxima temperatura em excesso no domínio sólido com geração de calor. Para o problema abordado, a cavidade possui 5 incógnitas (L_1 , L_0 , t_1 , t_0 e α) que devem ser variadas para uma completa avaliação geométrica da cavidade, mais duas incógnitas para o domínio sólido (H e L). O problema é submetido a 3 restrições: área total do domínio sólido, área da cavidade e uma área auxiliar (que foi empregada apenas com o intuito de se avaliar menos um grau de liberdade e restringir o espaço de busca). Em função de se ter um problema não fechado, por ter-se 3 equações (para as restrições) e 7 incógnitas, são requeridos 4 graus de liberdade, que neste caso foram: H/L , t_1/t_0 , L_1/L_0 e α . No primeiro nível de otimização, o valor de α é variado e as demais razões geométricas são mantidas constantes. A menor temperatura máxima em excesso ($\theta_{\max}$) encontrada será a temperatura máxima em excesso uma vez minimizada ($(\theta_{\max})_m$) e a respectiva geometria ótima é denominada uma vez minimizada, neste caso α_o . Em um segundo nível de

3. MODELAGEM MATEMÁTICA

3.1 EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO

As equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia temporais médias para a solução de escoamentos turbulentos, incompressíveis, com transferência de calor por convecção mista são dadas por (Bejan, 2013):

$$\frac{\partial(\rho \cdot \bar{v}_z)}{\partial z} + \frac{\partial(\rho \cdot \bar{v}_r)}{\partial r} + \frac{\rho \cdot \bar{v}_r}{r} = 0 \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} (r \rho \overline{v_z v_z}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho \overline{v_r v_z}) = & -\frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left\{ r(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{v}_z}{\partial r} \right) \right\} \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{v}_z}{\partial r} + \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial z} \right) \right\} + \rho_0 g \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} (r \rho \overline{v_z v_r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho \overline{v_r v_r}) = & -\frac{\partial \bar{P}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left\{ r(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{v}_z}{\partial r} + \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial z} \right) \right\} \frac{1}{r} \\ & + \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r(\mu + \mu_t) \left(\frac{2 \partial \bar{v}_r}{\partial r} \right) \right\} - 2\mu \frac{\bar{v}_r}{r^2} + \rho \frac{\bar{v}_z^2}{r} \\ \rho C_p \left(\bar{V}_z \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} + \bar{V}_r \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} \right) = & (k + k_t) \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial z^2} + \frac{(k + k_t)}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} \right) \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\rho = \frac{P_{op}}{R_{ar} T} \quad (3.4)$$

$$R_{ar} = \frac{R}{M_{ar}} \quad (3.5)$$

onde $(\bar{})$ representa o operador média temporal, ρ é a massa específica do fluido (kg/m^3); μ é a viscosidade dinâmica (kg/ms); ν é a viscosidade cinemática (m^2/s); α é a difusividade térmica (m^2/s); v_r é a velocidade na direção r (m/s); v_z é a velocidade na direção z (m/s); P é a pressão (N/m); T é a temperatura (K); g é a aceleração da

gravidade (m/s^2), P_{op} é a pressão de operação, R_{ar} é a constante do ar, R é a constante universal dos gases e M_{ar} é o massa molecular do ar.

Nas Eqs. (3.2) – (3.3) a viscosidade turbulenta (μ_t) e a difusividade turbulenta (α_t) são dadas por:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.6)$$

$$\alpha_t = \frac{\nu_t}{Pr_t} \quad (3.7)$$

Para estimar μ_t é necessário obter os valores da energia cinética da turbulência (k) e sua taxa de dissipação (ε) ao longo do domínio. Para isso, são resolvidas duas equações adicionais (Wilcox, 2002; Launder e Spalding, 1972) que são dadas por:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{v}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \varepsilon \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{v}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.9)$$

As constantes empregadas para resolver as equações de transporte adicionais, Eqs. (3.6) – (3.9), são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Constantes empregadas no modelo no modelo $k - \varepsilon$, Eqs. (3.6 – 3.9).

C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε	Pr_t
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3	1.0

3.2 AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA COM DESIGN CONSTRUTAL

Para a avaliação geométrica é empregado o Design Construtal na geometria de uma chaminé solar, conforme ilustra a Fig. 3.1.

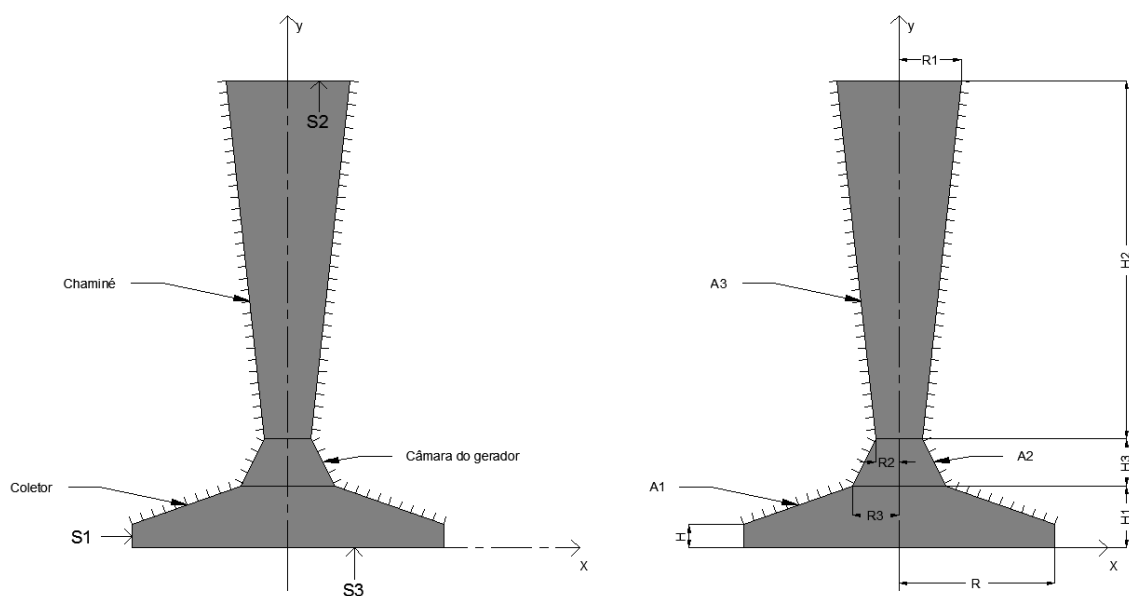


Figura 3.1- Geometria da chaminé solar avaliada numericamente.

Será considerado que o solo está isolado, assim como a superfície da chaminé e coletor, ou seja, o calor é gerado pela superfície S3 que irá aquecer o ar dentro da chaminé, o ar aquecido escoar através da convecção natural para a chaminé, passando pela área do gerador e após isso deixando a chaminé através da superfície S2, assim as velocidades do ar de entrada e saída (S1 e S2) serão iguais à zero. A pressão de entrada e saída do (S1 e S2) serão a pressão atmosférica. A A_2 não foi modificada por considerar-se o uso de um gerador que corresponde a essa área, semelhante ao modelo usado por Patel et al (2014). As condições de contorno impostas nas superfícies podem ser vistas na Tabela 3.2. A seguir é demonstrada as equações que resultam nos graus de liberdade utilizados na aplicação do design construtal e obtenção das geometrias estudadas.

Tabela 3.2 - Condições de contorno

Superfície	Condição de contorno
S1	$V= 0 \text{ m/s}, T = 302\text{K}, P = 1 \text{ atm}$
S2	$V= 0 \text{ m/s}, T= 302\text{K}, P= 1 \text{ atm}$
S3	Wall, $T= 323\text{K}$
Chaminé	Wall, Isolado
Coletor	Wall, Isolado

- Restrição 1 – Área do coletor (A_1)

$$A_1 = (R_3 \cdot H_1) + \frac{(H_1+H)}{2} \cdot (R - R_3) \quad (3.10)$$

- Restrição 2 – Área da chaminé (A_3):

$$A_3 = \frac{(R_1+R_2)}{2} \cdot H_2 \quad (3.11)$$

Como há duas restrições e cinco variáveis, há a necessidade da criação de graus de liberdade. Para a obtenção dos graus de liberdade que faltam são adimensionalizadas as Eqs. (3.10) e (3.11), gerando assim os graus de liberdade abaixo, que posteriormente irão gerar as geometrias utilizadas no modelo numérico.

$$H_1 = \left(\frac{H_1}{H}\right) \cdot H \quad (3.12)$$

$$R = \left(\frac{R}{H}\right) \cdot H \quad (3.13)$$

$$R_1 = \left(\frac{R_1}{H_2}\right) \cdot H_2 \quad (3.14)$$

A partir dos graus de liberdade têm-se os valores propostos para o estudo na Fig. 3.2, onde se manteve fixo o grau de liberdade H_1/H , em seguida mantendo-se fixo um R_1/H_2 avaliou-se o grau de liberdade R/H , encontrando a potência uma vez otimizada (P)_m e a razão R/H uma vez otimizada também (R/H) _o. Em um segundo nível

de otimização, variou-se o grau de liberdade R_1/H_2 obtendo-se a potência duas vezes maximizada $(P)_{mm}$. A razão R/H correspondente é a razão R/H duas vezes otimizada $(R/H)_{oo}$. Ao todo foram realizadas 120 simulações para a obtenção dos resultados.

O principal objetivo neste trabalho é maximizar a potência na chaminé solar, bem como avaliar o efeito dos graus de liberdade sobre o desempenho do dispositivo. A potência na UDCS é dada a partir da seguinte expressão:

$$P = 0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (3.15)$$

onde ρ é a massa específica do ar (kg/m^3), A é a área da secção transversal da UDCS na região da turbina (m^2) e V é a velocidade média espacial na secção analisada (m/s).

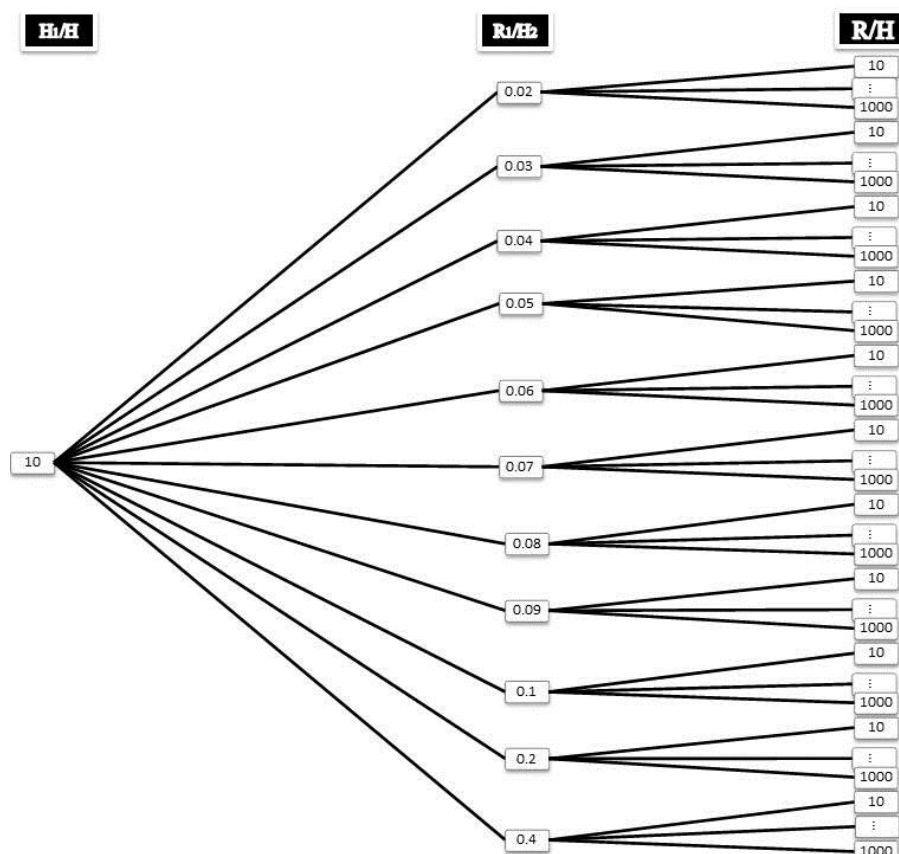


Figura 3.2 - Esquema ilustrando o processo de otimização realizado aplicando o método Design Construtal com mecanismo de busca exaustiva.

4. MODELAGEM NUMÉRICA

4.1 MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS (MVF)

A tarefa do método numérico é transformar uma equação diferencial, definida num domínio, em um sistema de equações algébricas. Para isso as derivadas da função existente na equação diferencial devem ser substituídas pelos valores discretos da função. O MVF é uma forma de se obter uma versão discreta de uma Equação Diferencial Parcial (EDP). Diferentemente de outros métodos, o método fundamenta-se em uma abordagem física do problema representado pela EDP. O seu desenvolvimento está intrinsecamente ligado ao conceito de fluxo entre regiões, ou volumes adjacentes, onde o fluxo de uma determinada grandeza, como massa ou energia, é a quantidade dessa grandeza que atravessa a área de uma fronteira. A quantidade líquida desta grandeza, que atravessa um volume de controle, por unidade de tempo, é calculada pela integração, sobre essas fronteiras, da diferença entre os fluxos que entram e os que saem deste volume, o que é conseguido de forma mais geral pela integração das EDPs (Maliska, 2004; Bortoli, 2000; Fortuna, 2000).

Quando não é possível a solução analítica, e decide-se fazer uma aproximação numérica da equação diferencial, se aceita ter a solução para um número discreto de pontos, com um determinado erro, esperando-se que quanto maior for este número de pontos e iterações mais perto da solução exata será a solução aproximada. Um método analítico com habilidade de resolver tais equações forneceria a solução em uma forma fechada, e seria possível, então, calcular os valores das variáveis dependentes em nível infinitesimal, isto é, para um número finito de pontos (Maliska, 2004).

A Figura 4.1 ilustra a técnica de discretização empregada pelo método numérico, o qual converte uma equação diferencial em um sistema de equações algébricas.

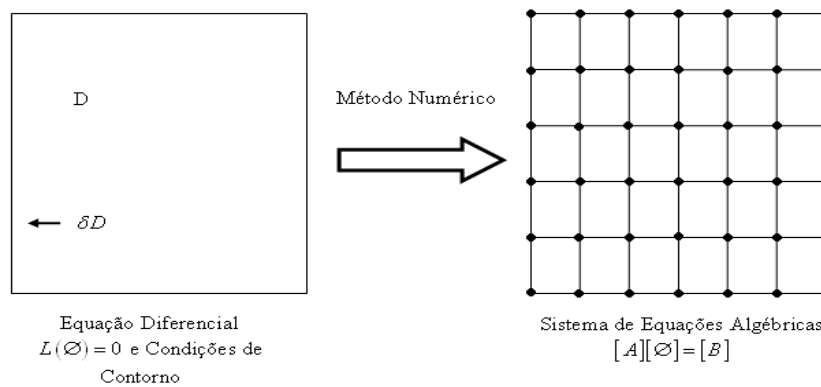


Figura 4.1- Técnica de discretização (Maliska, 2004).

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. Existem duas maneiras de se obter as equações aproximadas para esta metodologia. 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).

No âmbito do método dos volumes finitos, as oscilações numéricas geradas ocorrem devido à negatividade dos coeficientes dos termos advectivos das equações de conservação, que ocorre quando é utilizada uma discretização por diferenças finitas centrais (Dos Santos, 2011). Uma forma de evitar isso é através do emprego de outra aproximação para os termos advectivos nas faces dos volumes de controle (Patankar, 1980; Maliska, 2004).

Neste trabalho, foi utilizado o esquema de advecção *upwind* para os termos advectivos. Para o presente esquema, a direção do escoamento é levada em consideração para a realização do cálculo do valor de uma determinada variável (velocidade, temperatura) na face do volume finito. Além disso, a positividade dos coeficientes dos termos advectivos é sempre garantida, sendo geradas soluções numéricas ausentes de oscilações numéricas (Dos Santos, 2011). Aliado a isso, como grande vantagem, se tem que a função de interpolação *upwind* é a simplicidade de sua aplicação em algoritmos de CFD (Brum, 2013).

No esquema de advecção *upwind* de primeira ordem, o valor ϕ_f na interface é igual ao valor da célula que está à montante da face (Patankar, 1980; Dos Santos, 2011). Por exemplo, se a velocidade principal do escoamento ocorre na direção, conforme ilustra a Fig. 4.2, a variável ϕ_e (na face leste) será dada por:

$$\phi_e = \phi_P \text{ se } F_e = (\rho v_1)_e > 0 \quad (4.1)$$

$$\phi_e = \phi_E \text{ se } F_e = (\rho v_1)_e < 0 \quad (4.2)$$

Para face oeste, tem-se:

$$\phi_w = \phi_W \text{ se } F_w = (\rho v_1)_w > 0 \quad (4.3)$$

$$\phi_w = \phi_P \text{ se } F_w = (\rho v_1)_w < 0 \quad (4.4)$$

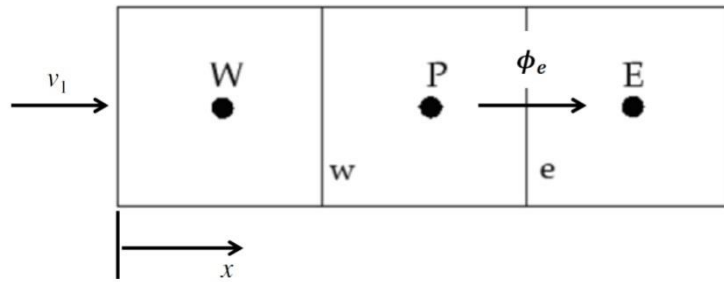


Figura 4.2 - Obtenção de ϕ_f em uma face do volume de controle (Adaptado de Dos Santos 2011).

O software FLUENT permite escolher entre dois métodos numéricos: segregado (*segregated solver*) ou acoplado (*coupled solver*). Usando qualquer método, o FLUENT integra as equações (da conservação da massa, da quantidade de movimento) geradas pela discretização.

Comparando os dois métodos, pode se concluir que a diferença entre esses métodos consiste na forma de resolução das incógnitas. Enquanto o solver acoplado resolve todas as incógnitas simultaneamente (e para isso cria uma única matriz envolvendo todos os coeficientes), resolvendo todas as equações governantes para todas as variáveis (velocidade, pressão, temperatura e demais variáveis) em todos os volumes de controle ao mesmo tempo (ou de maneira simultânea ou acoplada). O método

segregado resolve as equações governantes para uma variável (por exemplo, a velocidade) em todos os volumes de controle um de cada vez (ou sequencialmente), atualizando para isso os coeficientes (Maliska, 2004). A solução segregada apresenta vantagens sobre a solução simultânea. Enquanto a solução acoplada apresenta uma matriz resultante com um altíssimo índice de esparsividade, a solução segregada forma matrizes menos esparsas, o que acelera a resolução dos sistemas lineares e diminui a alocação de memória.

Em função das não linearidades existentes nas equações governantes, no método segregado (baseado em pressão), várias iterações devem ser efetuadas até se obter a convergência.

A solução segregada das equações de conservação da quantidade de movimento e da massa, para problemas incompressíveis, gera o problema do acoplamento pressão-velocidade. Neste sentido é preciso encontrar um procedimento sequenciado e iterativo (algoritmo) que melhore a estimativa do campo de pressão de modo que o campo de velocidade se aproxime progressivamente da solução que satisfaça a equação da continuidade na forma discretizada (Versteeg e Malalasekera, 1995).

Os campos de velocidades podem ser avançados no tempo empregando a equação da conservação da quantidade de movimento. Já o campo de pressões não possui uma equação que relacione o seu avanço no tempo. Lembrando que a equação da conservação da quantidade de massa é somente uma restrição a ser obedecida pelo campo de velocidades e não serve de evolução de nenhuma variável no tempo (Dos Santos, 2011; Maliska, 2004).

No presente trabalho é utilizado o método SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*) no qual relaciona a correção do campo de velocidades com a correção do campo de pressões a partir da equação da conservação da quantidade de movimento.

No presente trabalho o solver é baseado na pressão e todas as simulações empregaram esquema de advecção 2nd Order Upwind e o método SIMPLE para o acoplamento pressão velocidade. As simulações foram consideradas convergidas quando os resíduos para massa, velocidades e para as equações do modelo de turbulência foram menores do que 5.0×10^{-6} e para a energia menores que 10^{-8} . Além disso, fatores de sub-relaxação de 0.7 foram impostos nas equações de conservação e em todas as simulações foram empregadas 7000 iterações. A Fig. 4.3 ilustra o

comportamento dos resíduos ao longo das iterações realizadas para um caso crítico com geometria onde a convergência foi mais difícil de ser alcançada.

Para a abordagem numérica da turbulência foi empregada à modelagem clássica (RANS – do inglês: *Reynolds Averaged Navier-Stokes*) que consiste na aplicação de um operador média temporal nas equações de conservação (Wilcox, 2002). Para resolver o problema do fechamento da turbulência é empregado o modelo a duas equações diferenciais $k - \epsilon$ (Launder e Spalding, 1972).

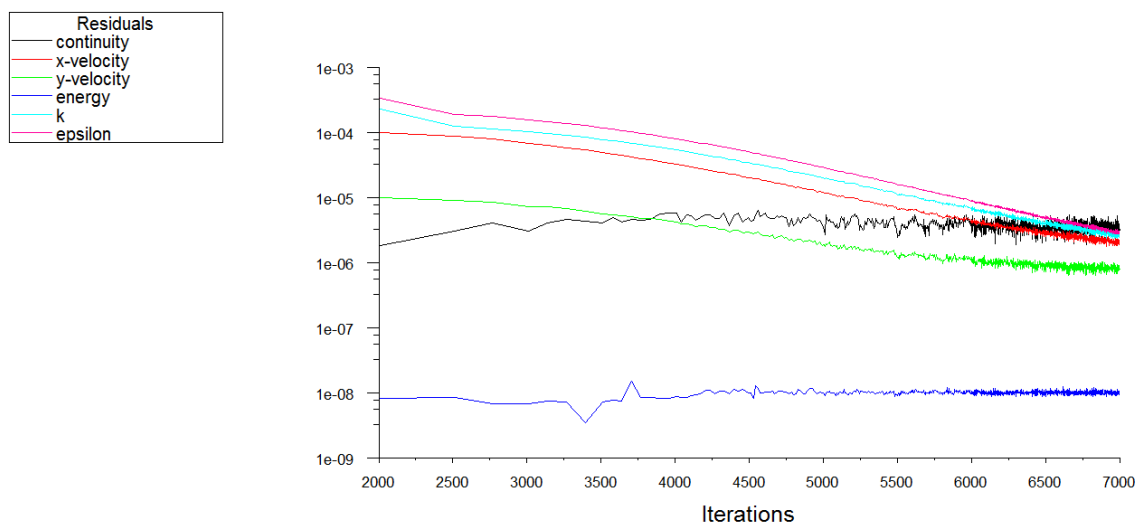


Figura 4.3 - Comportamento dos resíduos das iterações.

4.2 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO

A malha utilizada pode ser vista na Fig. 4.4, em todos os casos o domínio foi subdividido em volumes finitos retangulares e na região das paredes e turbina foi empregado um maior refinamento de malha utilizando uma malha do tipo *stretched*, onde se pode verificar o perfil utilizado e o modelo bidimensional axissimétrico empregado no modelo.

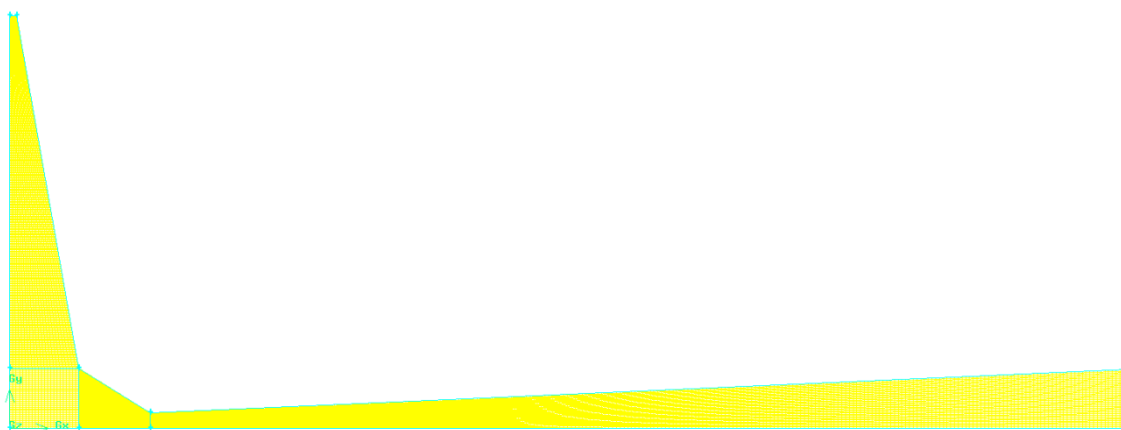


Figura 4.4 - Malha empregada no estudo.

Primeiramente, foi realizado um estudo de independência de malha do domínio computacional empregado. As malhas investigadas foram divididas no seguinte número de volumes retangulares: 18000, 19600, 20400, 23600, 25500. Os perfis de velocidades na região de simetria do domínio obtidos com as diferentes malhas testadas são apresentados na Fig. 4.5 Os resultados indicam que a os perfis obtidos com 23600 e 25500 volumes apresentam uma excelente concordância, com uma variação inferior a 1%, além de excelentes níveis de resíduos. Em função disso, considera-se a malha com 23600 volumes independente e a mesma será empregada no restante das simulações realizadas no trabalho sendo a mesma apresentada na Fig. 4.5, o refino na região da turbina é apresentado na Fig. 4.6, cada simulação teve um tempo médio de 2.4×10^{-3} s.

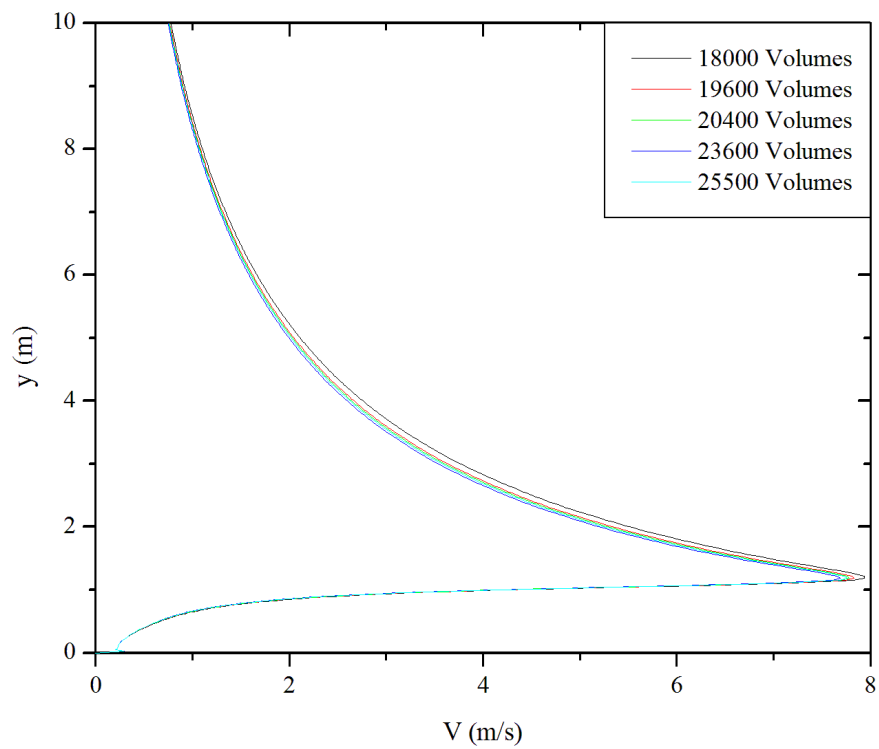


Figura 4.5 - Estudo de independência de malha.

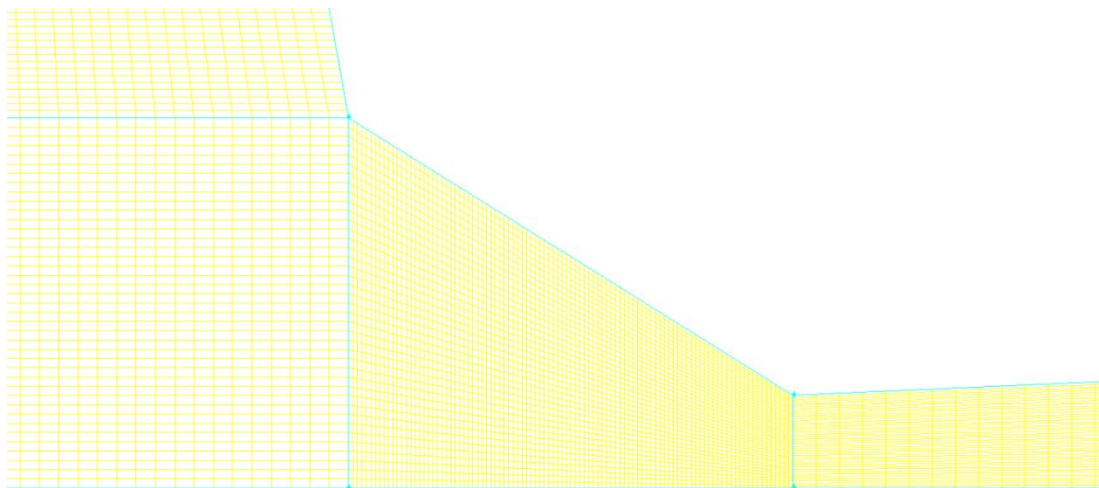


Figura 4.6 - Refino de malha na região do gerador.

Após o estudo de independência de malha, é realizada uma verificação dos resultados encontrados com o presente modelo numérico com os obtidos no estudo

de Patel et al. (2014). A Fig. 4.7 ilustra uma comparação da magnitude do campo de velocidades na região do eixo da UDCS obtidas no presente trabalho com as apresentadas na literatura. Pode ser observado que os resultados apresentam um desvio médio de aproximadamente 2.0 %. A velocidade máxima encontrada nas presentes simulações é de $v_{\max} = 7.69$ m/s enquanto que no trabalho de Patel et al. (2014) foi obtida uma velocidade máxima de $v_{\max,1} = 7.86$ m/s. Na região de saída da chaminé, é visualizado nos resultados da literatura uma flutuação no perfil de velocidades com uma redução sensível em $y = 9.0$ m que não é obtida nas simulações do presente trabalho. Uma hipótese para a diferença encontrada na região de saída pode estar associada a algum efeito tridimensional do escoamento que não foi considerada na simulação do presente trabalho. Ainda é possível que o refinamento de malha na região de saída seja baixo para o estudo com domínio tridimensional, levando a um comportamento não esperado do campo de velocidades nessa região.

No estudo de Patel et al. (2014) o domínio tridimensional foi discretizado em 157432 volumes. Apesar das pequenas diferenças visualizadas entre os resultados de Patel et al. (2014) e os obtidos aqui, é possível afirmar que os resultados são satisfatoriamente concordantes, principalmente na região da turbina que é a mais importante para a estimativa da potência útil na UDCS. Com relação à potência no dispositivo, uma comparação entre a potência máxima no ponto de máxima velocidade obtida no presente trabalho e em Patel et al. (2014) também pode ser realizada. A potência máxima obtida aqui é de $P_{\max} = 13.65$ W, enquanto em Patel et al. (2014) a potência máxima é de $P_{\max} = 14.59$ W, ou seja, um desvio inferior a 7.0 %. Assim, o presente modelo será empregado para avaliar o efeito das variáveis R_2 e H_1 sobre a potência útil do dispositivo.

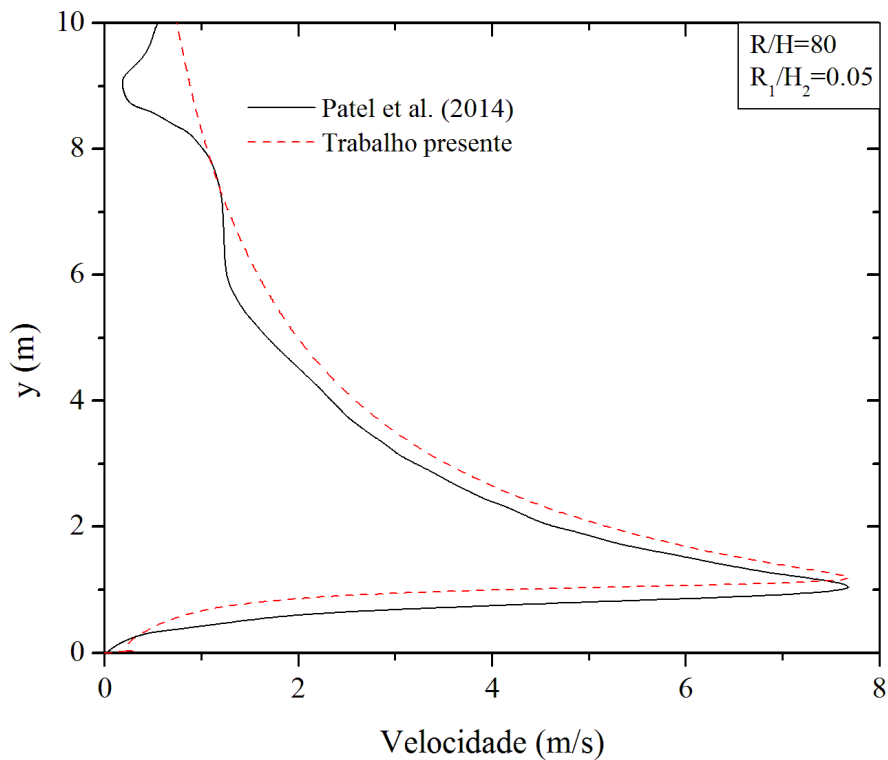


Figura 4.7 - Comparação entre os perfis de velocidades na região central da SCPP obtidas no presente trabalho e em Patel et al. (2014).

Outra importante verificação foi realizada para o campo de temperaturas. Para a verificação deste campo foi monitorado um perfil de temperaturas ao longo do raio do coletor em uma posição $y = 0.025$ m. Os resultados foram comparados com um perfil obtido por Patel et al. (2014). A verificação pode ser vista na Fig. 4.8 onde nota-se um comportamento similar ao de Patel et al. (2014) cuja diferença máxima encontra-se em torno 1.0 % em torno de $R = 3.0$ m do coletor. Essa diferença provavelmente está relacionada as diferenças entre os modelos bidimensional e tridimensional.

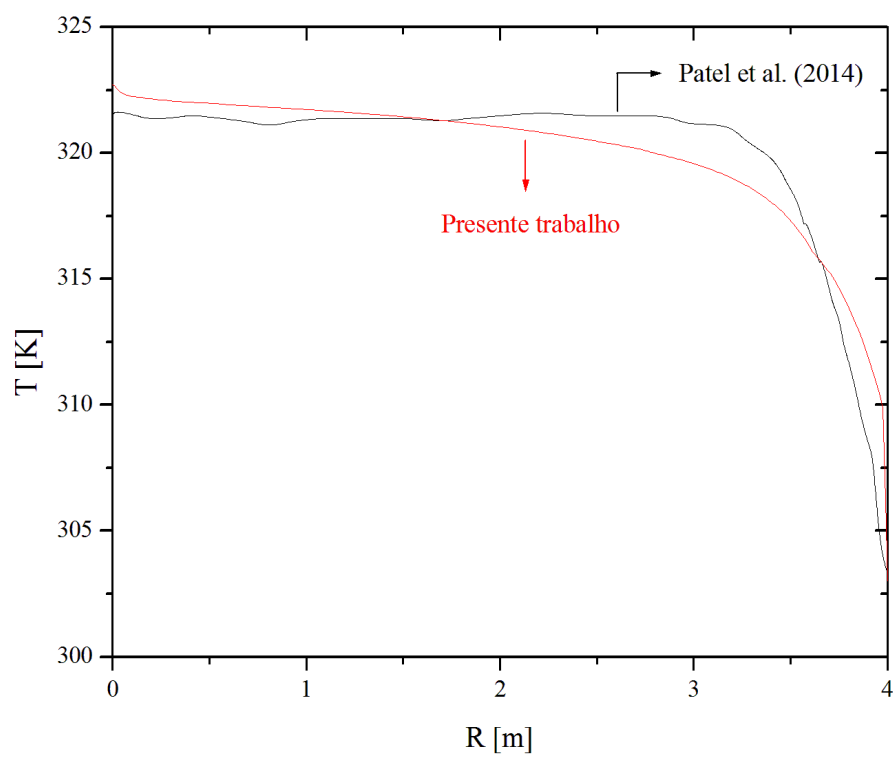


Figura 4.8 – Perfil de temperaturas ao longo do raio do coletor para uma posição $y = 0,025$ m.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 RESULTADO PARA A TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE $T_s=323K$

Um estudo preliminar foi realizado no intuito de verificar quais razões geométricas teriam uma maior sensibilidade sobre a potência na chaminé solar, utilizando-se como referência Patel et al. (2014), que utilizou uma temperatura da superfície inferior igual a $T_s=323K$. Uma vez que era naturalmente esperado que o raio do coletor tivesse grande sensibilidade sobre a potência do dispositivo, resolveu-se avaliar o efeito da altura de entrada do coletor (H) e do diâmetro de saída da chaminé ($D_1 = 2 \cdot R_1$). O objetivo foi permitir uma definição sobre as principais razões geométricas a serem avaliadas prioritariamente no presente trabalho, visto que o número de simulações requeridas para otimizar completamente o problema é extremamente elevado. A Fig. 5.1 ilustra o efeito da altura de entrada do coletor (H) sobre a potência para diferentes raios de saída da chaminé (R_1). Esses resultados indicaram que o raio de saída da chaminé possui uma maior sensibilidade sobre a potência no dispositivo do que a altura de entrada do coletor. Em função disso, decidiu-se para o presente estudo avaliar primeiramente o efeito da razão R/H sobre a potência do dispositivo, devido a grande influência do raio do coletor (R). Em um segundo nível de otimização, foi avaliado o efeito das diferentes razões R_1/H_2 sobre a potência disponível uma vez maximizada, bem como, sobre a razão R/H uma vez otimizada, $(R/H)_o$, e a potência do dispositivo uma vez maximizada, P_m . Para todas as simulações, em função da menor influência da altura H associada ao grande número de simulações requeridas para o estudo, a razão H_1/H foi mantida fixa, i.e., $H_1/H = 10.0$.

A partir desse estudo, decidiu-se avaliar primeiramente o efeito da razão R/H sobre a potência da chaminé solar. A Figura 5.2 ilustra esse efeito mantendo-se constantes os demais graus de liberdade, ou seja, $H/H_1 = 10$ e $R_1/H_2 = 0,05$. Conforme pode ser visto, o grau de liberdade R/H possui uma grande sensibilidade sobre a potência. Conforme esperado, o aumento da razão R/H conduz a um aumento da potência do dispositivo. A razão ótima $(R/H)_o = 800$ conduziu a uma potência aproximadamente 4.6 vezes superior a menor razão $R/H = 10$, que conduziu ao pior desempenho. Apesar desse comportamento esperado, os resultados permitem avaliar também que a grande variação na potência ocorre para as menores razões de R/H , mais

precisamente na faixa entre $10 \leq R/H \leq 350$. A partir dessa região, os ganhos de potência passam a ser bastante suavizados. Dessa forma, é possível obter uma recomendação teórica para a construção da região do coletor do dispositivo. No caso onde condições financeiras inviabilizem a construção de coletores com razões de $R/H = 800$, é possível empregar (sem grande perda de potencial) outras razões menores menos otimizadas, desde que se encontre em uma faixa onde a variação da potência não é sensível.

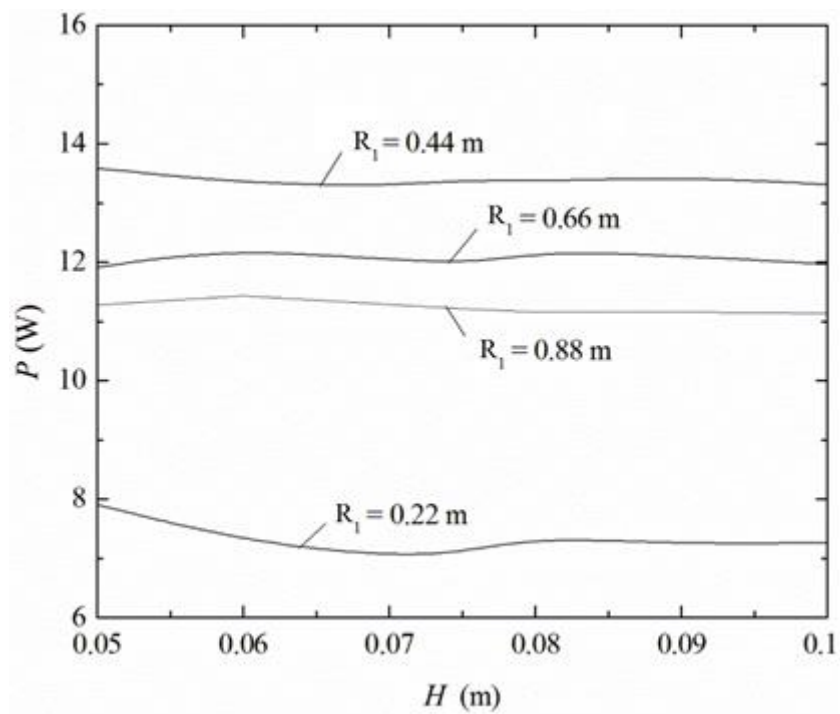


Figura 5.1 - Avaliação geométrica da chaminé para avaliar a sensibilidade das variáveis para posterior otimização (Vieira et al. 2014).

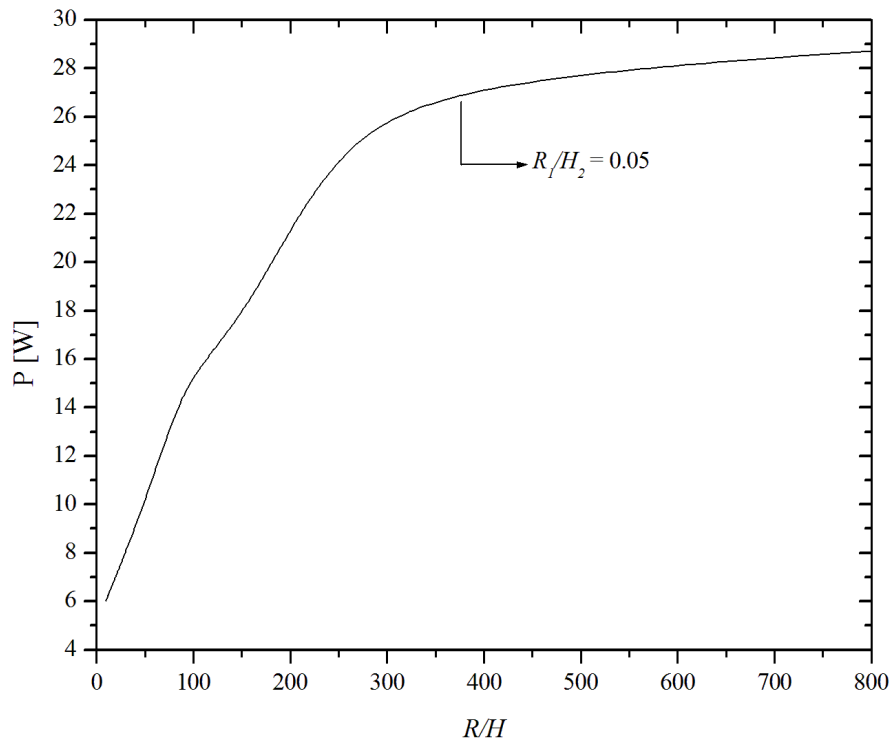


Figura 5.2 – Efeito da razão R/H sobre a potência da chaminé solar.

Nas Figs. 5.3, 5.4 e 5.5 são apresentados os campos de velocidade para o estudo da Fig. 5.2, onde é apresentado o campo de velocidades para $R/H = 10$ e $(R/H)_o = 800$, para um $R_1/H_2 = 0.05$ e uma comparação direta do campo de velocidades na região da turbina, que é o local de maior velocidade. As imagens apresentadas não estão em escala geométrica, pois para um R/H grande, o raio do coletor é muito maior que um R/H pequeno, assim dificultando a representação dos mesmos. Apesar disso, é possível observar que há uma maior intensidade do campo de velocidades na região da restrição (onde é posicionada a turbina) e ao longo de toda a chaminé para o caso ótimo, Fig. 5.4, do que para o caso com menor razão de $R/H = 10$, Fig. 5.3. A Fig. 5.5 evidencia a diferença de magnitude dos campos de velocidades em toda a região de colocação da turbina. Para o pior caso, a intensidade da velocidade aumenta apenas na região mais restrita da geometria, enquanto que para o caso ótimo a maior magnitude se estende ao longo do domínio da câmara onde a turbina deve ser inserida.

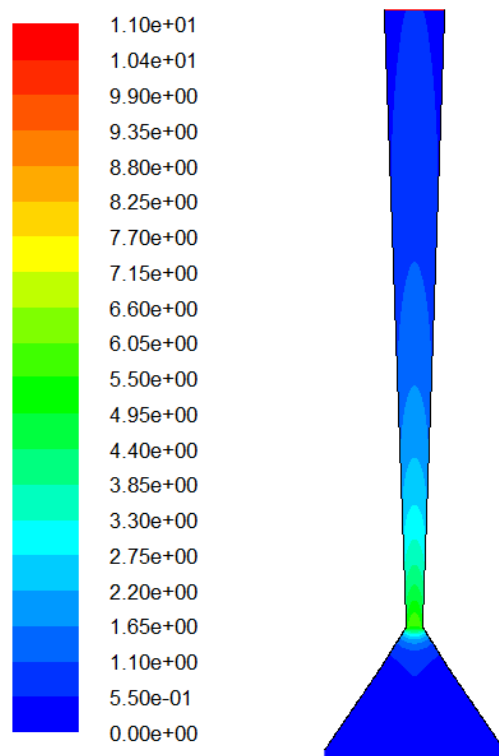


Figura 5.3 – Campo de velocidades para $R/H=10$ e $R_1/H_2 = 0.05$.

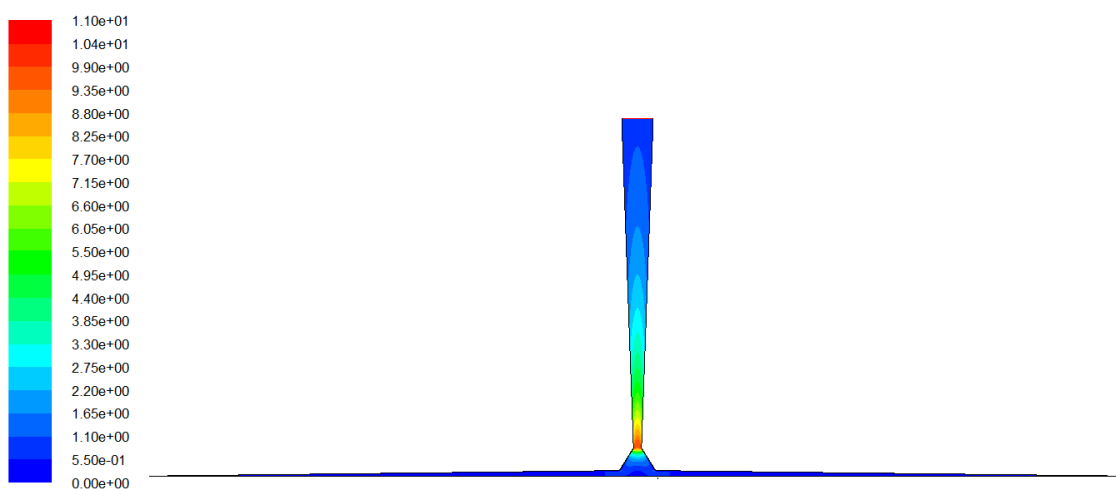


Figura 5.4 – Campo de velocidades para $(R/H)_0 = 800$ e $R_1/H_2 = 0.05$.

Uma nova análise foi efetuada variando outro grau de liberdade. Nesta etapa a razão R_1/H_2 foi variado a fim de se avaliar o efeito de R/H sobre a potência para diferentes razões de R_1/H_2 , verificando se há uma tendência específica no comportamento do efeito de R/H sobre a potência. Nessa avaliação o grau de liberdade R_1/H_2 mostrou grande influência na variação da razão R/H sobre a potência da chaminé, conforme pode ser visto na Fig. 5.6. Um exemplo da importância da avaliação

geométrica pode ser visto quando se compara o melhor caso, $(R/H)_{oo} = 1000$ e $(R_1/H_2)_o = 0.04$, e o pior caso, $R/H=10$ e $R_1/H_2=0.4$. Para estes casos nota-se uma diferença no desempenho de 4674%.

É possível perceber também na Fig. 5.6 que há uma maior variação de P para as menores razões de R/H . Para razões de R/H superiores a 400 o aumento de potência se torna menos sensível. Isso se dá principalmente pelo fato de que para um R/H muito grande e uma razão H/H_1 constante, a entrada do coletor se torna muito pequena, restringindo o fluxo de entrada. Dessa forma, mesmo com o acúmulo maior de energia na região do coletor, há uma restrição na vazão de entrada de ar e uma diminuição do crescimento da potência do dispositivo. É importante ressaltar que o efeito de R/H sobre a potência é alterado para diferentes razões de R_1/H_2 . Por exemplo, para $R_1/H_2 = 0.4$ o comportamento de P em função de R/H é quase constante. Para $R_1/H_2 = 0.2$ há uma razão ótima (R/H) intermediária em $(R/H)_o = 500$. Para as razões menores que $R_1/H_2 \leq 0.1$ as maiores razões de R/H foram as que conduziram ao melhor desempenho.

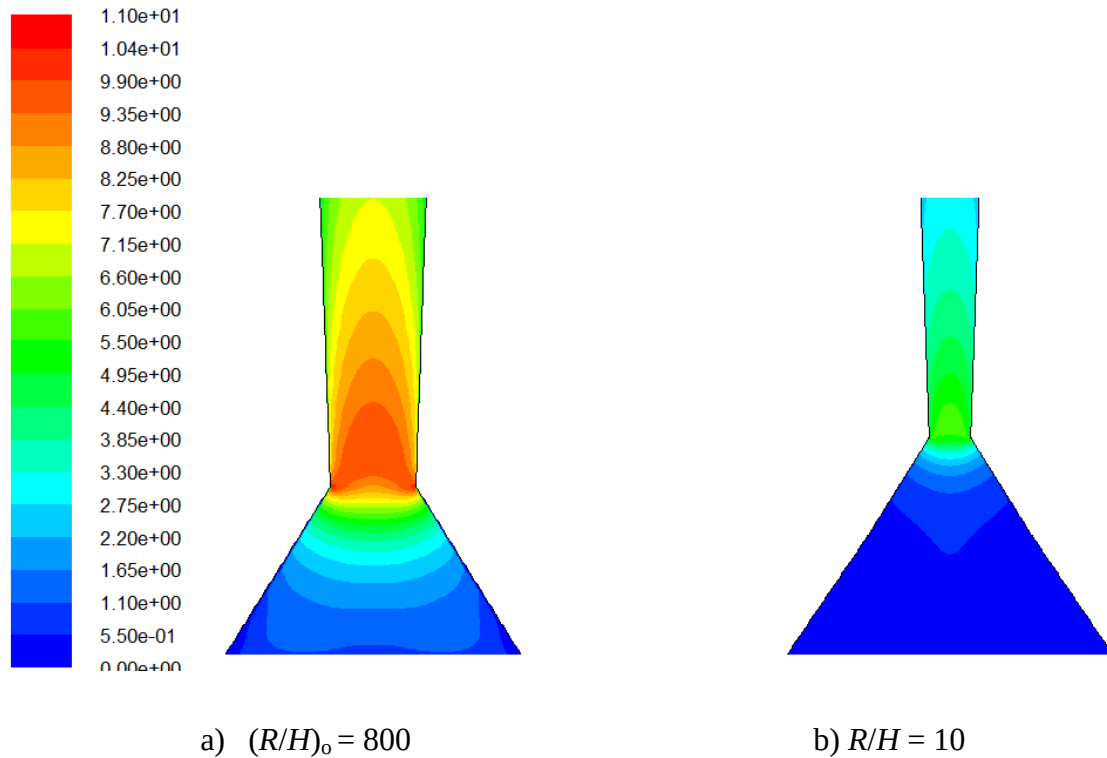


Figura 5.5– Comparação entre o campo de velocidades na região do gerador: a) $(R/H)_o = 800$ e b) $R/H = 10$.

A Fig. 5.7 ilustra os campos de velocidades obtidos na Fig. 5.6 para a razão $R_1/H_2 = 0.2$. A Fig. 5.7(a) ilustra o campo de velocidades na região da turbina para $R/H = 10$, enquanto as Figs. 5.7(b) e (c) ilustram os campos de velocidades para as razões $(R/H)_o = 500$ e $R/H = 800$, respectivamente. Os resultados mostram que o campo de velocidades não é necessariamente favorecido com o aumento da razão R/H para todas as razões de R_1/H_2 , mostrando que para o projeto desse tipo de dispositivo um parâmetro geométrico influencia no outro.

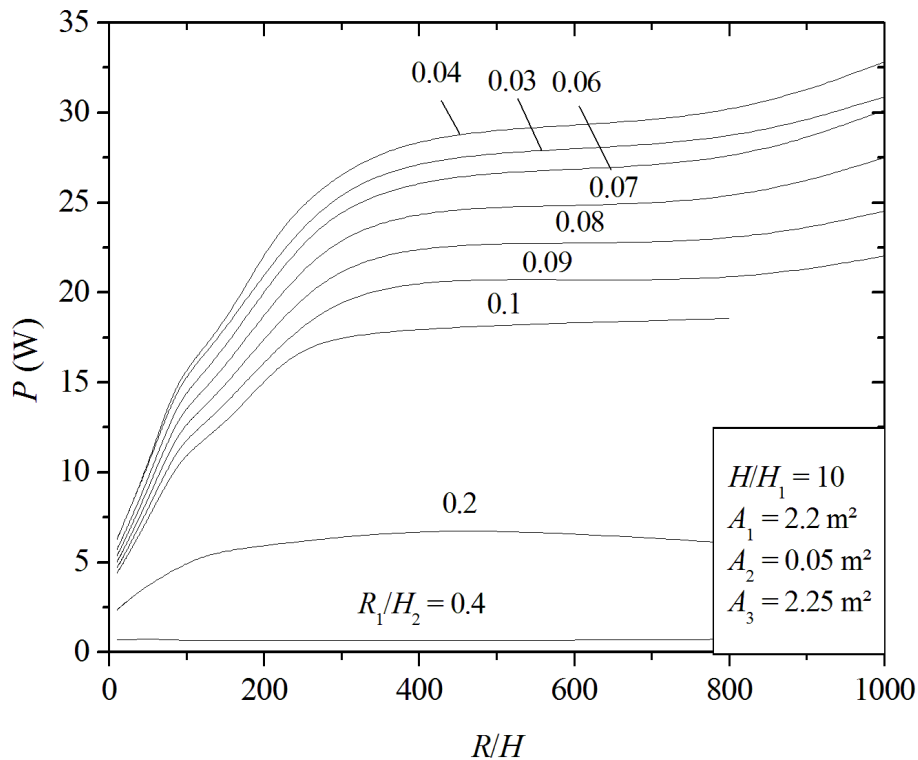


Figura 5.6 - Efeito da razão R/H sobre a Potência na chaminé para várias razões de R_1/H_2 .

Os resultados ótimos obtidos na Fig. 5.6 são compilados e apresentados nas Figs. 5.8 e 5.9. Mais precisamente a Fig. 5.8 ilustra o efeito da razão R_1/H_2 sobre a potência uma vez maximizada (P_m), enquanto a Fig. 5.9 ilustra o efeito da razão R_1/H_2 sobre a razão R/H uma vez otimizada, i.e., $(R/H)_o$. A Figura 5.8 permite verificar que conforme o grau de liberdade R_1/H_2 aumenta, a potência uma vez maximizada chega a um ponto máximo, e logo em seguida decresce, ou seja, a potência duas vezes maximizada (P_{mm}) é obtida para uma razão intermediária de $(R_1/H_2)_{oo} = 0.04$. A potência duas vezes maximizada é 4670% maior que o pior resultado, obtido para a

razão $R_1/H_2 = 0.4$, e 48% superior que o obtido no extremo inferior, ou seja, para a razão $R_1/H_2=0.02$.

Vale destacar que maiores razões de R_1/H_2 indicam maiores diâmetros e menores alturas da chaminé, visto que a área é constante. Então, para chaminés com baixa altura, o melhor será utilizar coletores com razões R/H intermediárias, conforme os resultados obtidos e mostrados na Fig. 5.8 onde as razões ótimas de $(R/H)_o$ decrescem com o aumento de R_1/H_2 . Do ponto de vista físico, a baixa altura da chaminé reduz o empuxo sobre o fluido aquecido no coletor.

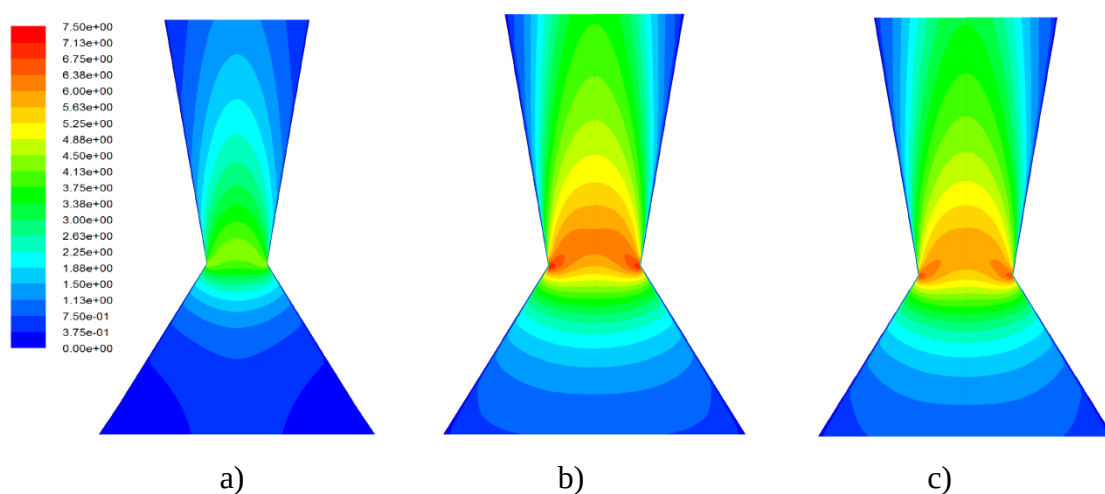


Figura 5.7 - Campos de velocidade para $R_1/H_2 = 0.2$ e diferentes razões de R/H : a) $R/H = 10$, b) $(R/H)_o = 500$ e c) $R/H = 800$.

A Figura 5.9 mostra que na região de ótimo de R_1/H_2 , $(R_1/H_2)_o$, a razão R/H duas vezes otimizada, $(R/H)_{oo}$, é a máxima possível. Para as menores razões de R_1/H_2 há um crescimento sensível da razão ótima $(R/H)_o$ até o limite superior estudado no presente trabalho que foi $R/H = 1000$. Nessa região onde o R_1/H_2 é pequeno, a abertura da chaminé é muito pequena e restringe a passagem do escoamento conduzindo a razões de R/H menores do que o limite superior. Após a região de ótimo de R_1/H_2 , a Fig. 5.9 mostra que a abertura da chaminé é muito grande e a altura muito pequena, limitando o potencial motriz gerado na região do coletor. Dessa forma, a razão R/H que conduz ao melhor desempenho decresce abruptamente, como pode ser confirmado na Fig. 5.10 onde são apresentados os campos de velocidade diversas razões de R_1/H_2 .

Vale destacar que possivelmente a simulação de maiores razões de R/H

na região ótima de R_1/H_2 conduziriam a desempenhos ainda maiores. Contudo, o aumento da razão $R/H > 1000$ conduz a dificuldades na geração de malhas e convergência das soluções. Dessa forma, os resultados foram restringidos a razões de $R/H = 1000$.

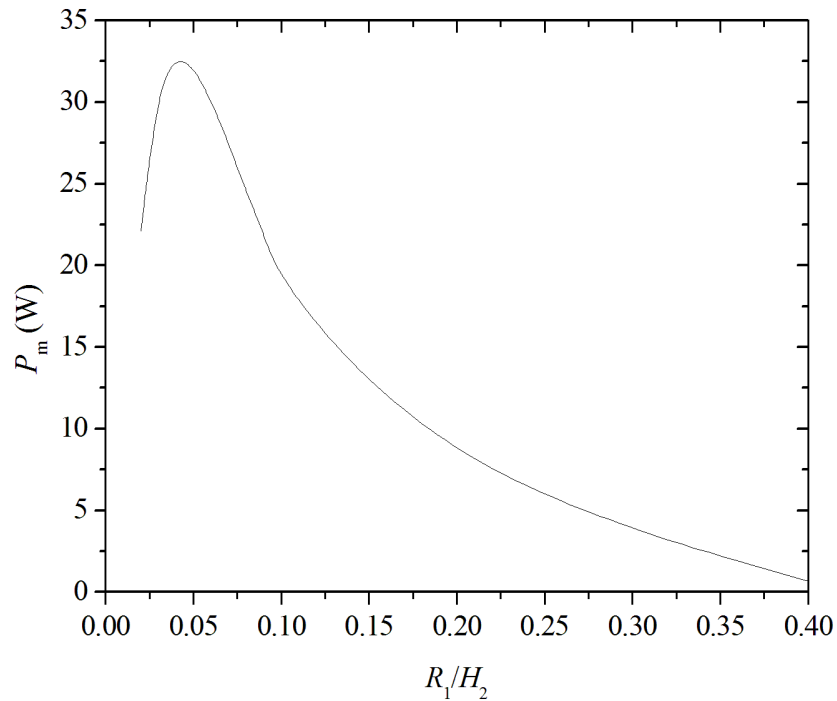


Figura 5.8 - Efeito da razão R_1/H_2 sobre a potência uma vez maximizada (P_m).

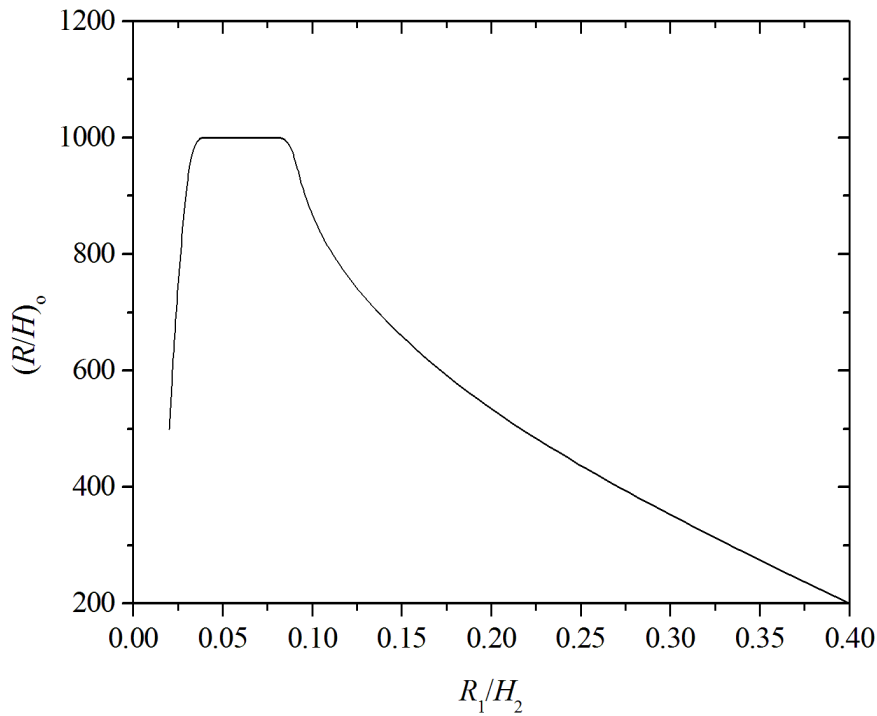


Figura 5.9 - Efeito da razão R_1/H_2 sobre a razão R/H uma vez otimizada, $(R/H)_o$.

De uma forma geral, os resultados reforçam que a alteração de uma razão geométrica pode influenciar no efeito de outra razão geométrica sobre o objetivo proposto. Esse comportamento foi semelhante ao observado no estudo de Lorente et al. (2010).

Os resultados mostram que há uma razão intermediária ótima da razão entre o diâmetro de saída da chaminé e a altura da mesma. Se somente a altura fosse importante, o ótimo teria sido obtido para a menor razão R_1/H_2 , ou seja, o diâmetro da chaminé possui importância sobre a avaliação geométrica do dispositivo.

Na Figura 5.10 nota-se que o campo de velocidade torna-se muito menos intenso para um R_1/H_2 alto, nesse caso $(R_1/H_2)_o = 0.4$. Também foi observado que para o extremo inferior $(R_1/H_2)_o = 0.02$, a magnitude do campo de velocidades cresce significativamente com relação ao extremo superior, contudo é menos intenso e pior distribuído do que o campo de velocidades obtido para a razão $(R_1/H_2)_{oo} = 0.04$. Os campos de velocidade corroboram o que tinha sido apresentado nas Figs. 5.8 e 5.9, ou seja, há uma dependência de uma razão geométrica sobre a outra e sobre o campo de velocidades, que afeta a potência obtida.

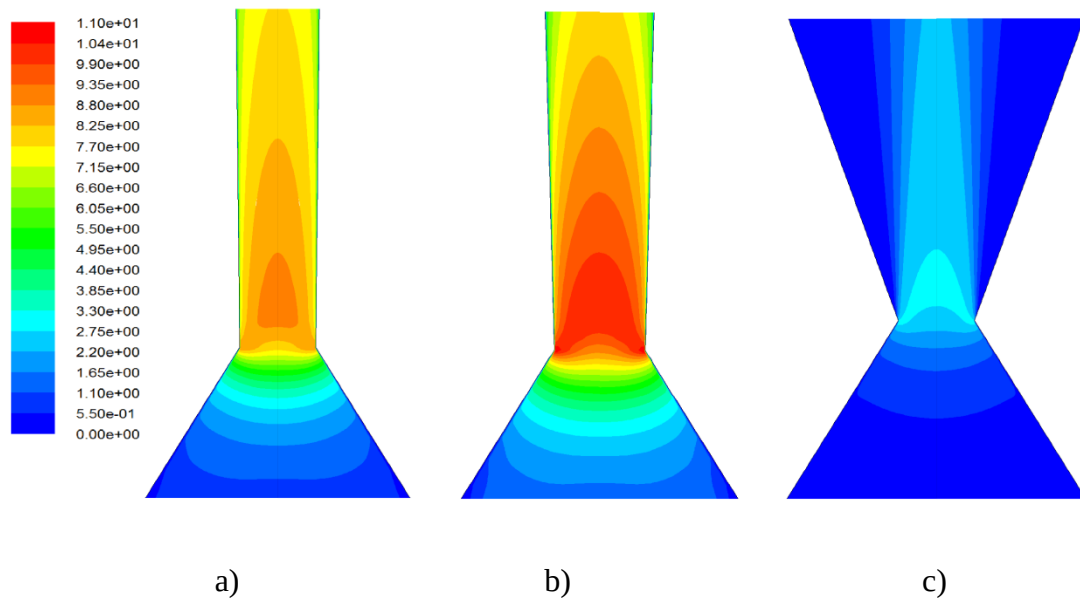


Figura 5.10 - Campos de velocidade na região da turbina obtidas nas Figs. 5.8 e 5.9 para diferentes razões $(R_1/H_2)_o$: a) $(R_1/H_2)_o = 0.02$, b) $(R_1/H_2)_o = 0.04$ e c) $(R_1/H_2)_o = 0.4$.

5.2 POTÊNCIA PARA DIFERENTES TEMPERATURAS DO SOLO

O objetivo desta sessão é avaliar o efeito da absorção de energia radiante na região do coletor, simulando o comportamento de regiões com maior e menor incidência de energia solar, bem como, períodos de maior e menor incidência. Para isso, são impostas diferentes magnitudes para a temperatura para imitar o efeito da imposição de diferentes intensidades de radiação sobre o coletor.

A Figura 5.11 apresenta os efeitos do grau de liberdade R/H na potência para quatro diferentes valores da temperatura do solo ($T_s = 308$ K, 313 K, 318 K e 323 K) e o mesmo valor de R_1/H_2 , nesse caso $R_1/H_2 = 0.05$. Como pode ser verificada a temperatura do solo e o grau de liberdade R/H tem uma grande influência na potência da chaminé.

Esta influência da temperatura do solo se deve ao fenômeno de convecção natural que é imposta no sistema, onde o solo quente aquece o ar no coletor, gerando uma maior energia para o mesmo. Os resultados mostram que para um aumento de $T_s = 308$ K até $T_s = 323$ K, um aumento do ΔT de 5 K até 15K, é possível aumentar a potência quase 2.4 vezes mais.

Levando em consideração os efeitos de R/H na potência, pode-se verificar que para uma maior T_s ($T_s = 323$ K) a potência uma vez maximizada é $P_m = 28.2$ W, para o valor ótimo de $(R/H)_o = 800$, e para esse caso nota-se uma estabilização da potência para um $R/H \geq 700$. Conforme a temperatura da superfície decresce, a estabilização ocorre em valores menores de R/H , para $T_s = 318$ K, o grau de liberdade $R/H=800$ não conduz a melhor desempenho, nesse caso $(R/H)_o = 600$ foi a melhor geometria encontrada. Para os menores valores da temperatura da superfície ($T_s = 308$ K e 313 K) a melhor geometria não se encontra nos mais elevados valores de R/H , para $T_s = 313$ K há um valor intermediário de $(R/H)_o = 500$, como pode ser visto na Fig. 5.12, onde o campo de velocidades se encontra mais distribuído e com maior força. Para $T_s = 308$ K a melhor razão cai para $(R/H)_o = 300$ como pode ser visto na Fig. 5.13. No ultimo caso há uma diminuição da potência para $R/H \geq 300$. Os resultados demonstram que mesmo que o raio do coletor seja grande (para casos onde o R/H é alto) se a temperatura da superfície for baixa, não há energia suficiente para aquecer o ar no coletor. Dessa forma, quanto menor a temperatura da superfície, menores valores de R/H ótimos são obtidos uma vez que para grandes razões de R/H não há energia suficiente para aquecer toda massa de ar no coletor e conduzi-la até a saída da chaminé. Os resultados ainda mostram que, mesmo para uma baixa T_s , a diferença entre a melhor e a pior razão para uma mesma T_s , chega a ser 2 vezes. Na Fig. 5.14 podemos ver a comparação entre os $(R/H)_o$ para as 4 temperaturas da superfície. Nota-se que há uma grande influência no aumento da temperatura com relação à potência gerada na chaminé.

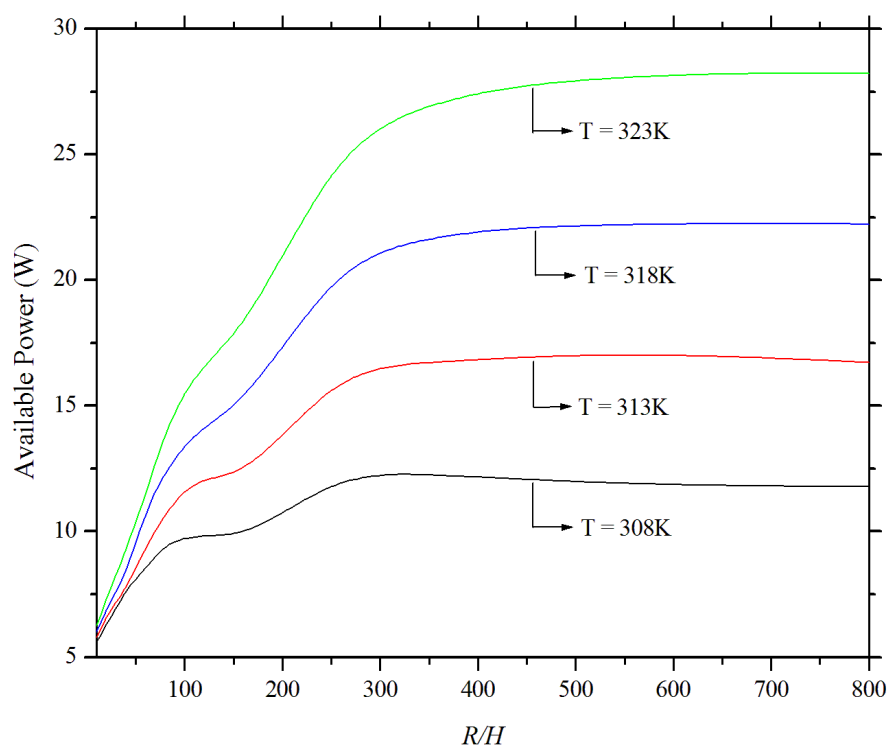


Figura 5.11 - Efeito da razão R/H sobre a potência para diferentes magnitudes da temperatura imposta no solo.

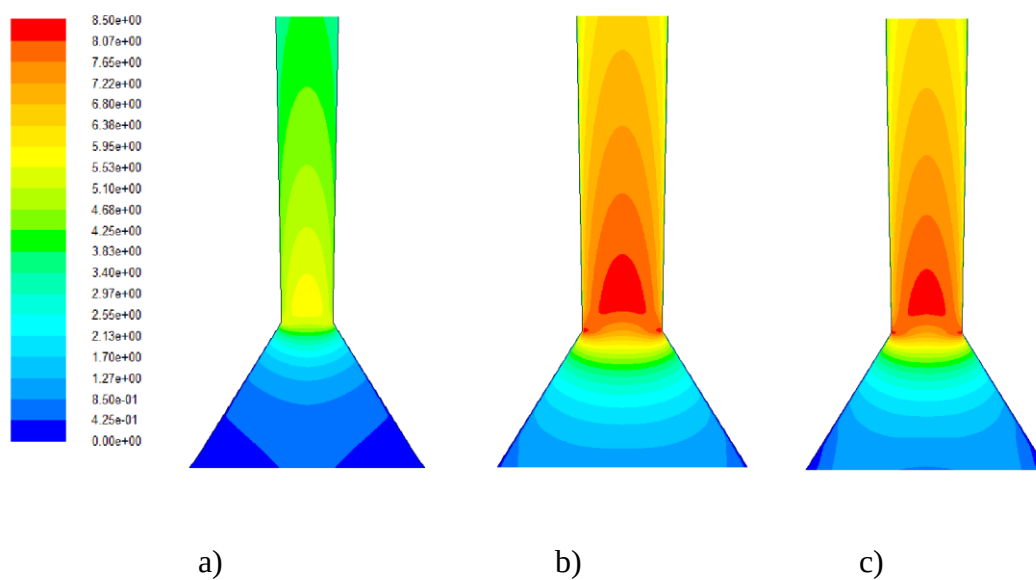


Figura 5.12 - Efeito da variação de R/H na $T_s = 313$ K: a) $R/H=10$, b) $(R/H)_o = 500$ e c) $R/H = 800$.

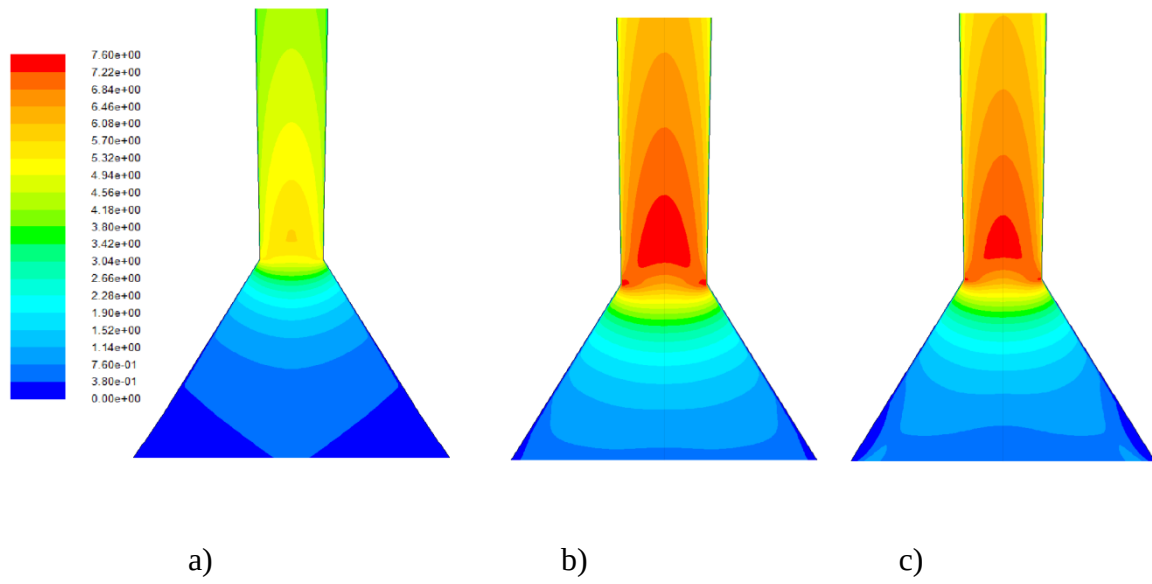


Figura 5.13 - Efeito da variação de R/H na $T_S = 308$ K: a) $R/H = 10$, b) $(R/H)_o = 300$ e c) $R/H = 800$.

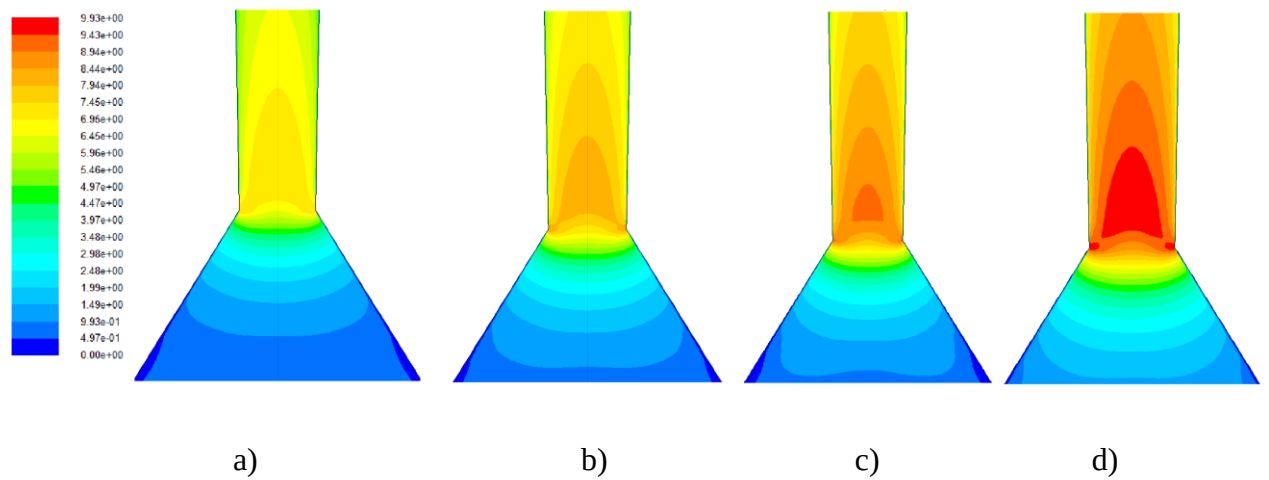


Figura 5.14 - Campos de velocidade para cada T_S e $(R/H)_o$: a) $(R/H)_o = 300$ e $T_S = 308$ K; b) $(R/H)_o = 500$ e $T_S = 313$ K; c) $(R/H)_o = 600$ e $T_S = 318$ K e d) $(R/H)_o = 800$ e $T_S = 328$ K.

6. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

No presente trabalho foi realizado um estudo numérico para investigar a aplicabilidade do Design Construtal em uma UDCS, bem como, foi investigada a influência de parâmetros geométricos sobre a potência no dispositivo. Os principais objetivos aqui foram avaliar a aplicabilidade do modelo numérico para a simulação de uma UDCS, a obtenção da potência no dispositivo e a obtenção de recomendações sobre a geometria de uma UDCS com três graus de liberdade empregando o Design Construtal para avaliação geométrica e a busca exaustiva para otimização. Em todos os casos foi considerado um escoamento incompressível, turbulento, em regime permanente, com transferência de calor por convecção mista em um domínio bidimensional axissimétrico. As equações de conservação de massa, quantidade de movimento, energia e uma equação de estado para os gases ideais foram resolvidas numericamente com o uso do método de volumes finitos, mais precisamente com o software FLUENT® (FLUENT, 2007; Patankar, 1980; Versteeg e Malalasekera, 2007). Para a abordagem da turbulência foi empregada a modelagem clássica da turbulência (RANS) com modelo $k - \varepsilon$ (Launder e Spalding, 1972).

Os resultados demonstraram que mesmo simplificando o escoamento para um domínio bidimensional axissimétrico, os resultados obtidos foram semelhantes aos obtidos em Patel et al. (2014) para a simulação de uma UDCS, principalmente para a predição da potência na região da turbina. Dessa forma, esse modelo foi recomendado para os estudos de otimização geométrica desenvolvidos no presente trabalho.

Posteriormente, foi investigada a influência de um grau de liberdade (R/H), sendo esse a razão entre o raio do coletor e a altura de entrada do coletor, sobre a potência da UDCS. Os resultados mostraram que a potência (P) foi muito sensível à variação do parâmetro do grau de liberdade. Por exemplo, para $R_1/H_2 = 0.04$ e $H_1/H = 10$ a diferença obtida entre a potência ótima, $(R/H)_o = 1000$, e a pior geometria, $R/H = 10$, foi de 520.0 %. Essa diferença se mostra devido ao grande aumento do coletor, onde há uma maior área de troca térmica entre o coletor, solo e ar sob o coletor. Logo o grau de liberdade R/H mostrou-se um importante parâmetro geométrico na busca pela maximização do desempenho da UDCS, conforme esperado. Contudo, os resultados obtidos mostram que para grandes valores de R/H há uma restrição no ar de entrada do coletor, afetando diretamente na potência, principalmente para grandes razões de R_1/H_2

e baixas temperaturas da superfície do solo. Consequentemente, nem sempre a recomendação é a construção de UDCS com grandes coletores.

Outro fator importante a ser observado são os efeitos de R_1/H_2 na potência. Observou-se de modo geral que há uma grande dependência do grau de liberdade R_1/H_2 e que a geometria ótima foi obtida para razões intermediárias de R_1/H_2 , indicando que para maximizar a potência não deve-se apenas aumentar a altura da chaminé, mas deve-se também se ter cuidado com o diâmetro de saída da mesma, para evitar restrições ao escoamento que minimizem a potência na região da turbina. Para menores valores de R_1/H_2 , o diâmetro da chaminé acaba sendo muito restrito e o aumento da altura da chaminé não compensa a potência. Por outro lado, para valores maiores de R_1/H_2 a magnitude da potência foi significativamente reduzida, mesmo com um alto valor de R/H . Essa queda acentuada está associada à redução da altura da chaminé que, por consequência, reduz o empuxo no dispositivo e causando uma estagnação do ar aquecido na região do coletor.

Os resultados também indicaram a importância da avaliação geométrica em problemas de energias renováveis. Para o presente estudo a forma geométrica ótima encontrada com o mecanismo de busca exaustiva, $(R_1/H_2)_o = 0.04$ e $(R/H)_{oo} = 1000$, conduziu a uma potência 47 vezes maior do que o pior caso estudado ($R_1/H_2=0.4$ e $R/H= 10$).

Outro estudo realizado mostra a dependência da potência em relação a temperatura da superfície do solo. Nesse estudo foi feita a variação da temperatura do solo com uma variação de 15K ($308 \text{ K} \leq T_s \leq 323 \text{ K}$). Foi verificado que a mesma também afeta a obtenção da geometria ótima de R/H . A potência máxima para as menores magnitudes de T_s foram obtidas para razões intermediárias de R/H . Dessa forma, o presente trabalho mostrou que a definição da geometria empregada deve ser avaliada em função da incidência de energia solar na região onde o dispositivo será construído. Também foi observado que mesmo para $T_3 = 308 \text{ K}$ a diferença na potência obtida para a geometria ótima e a com pior desempenho pode ser superior a duas vezes.

Como proposta de continuidade para o presente trabalho propõe-se:

- avaliar o efeito da razão H_1/H para o caso $T_s = 323 \text{ K}$ obtendo uma potência três vezes maximizada (P_{mmm}) e suas respectivas geometrias ótimas: $(H_1/H)_o$, $(R_1/H_2)_{oo}$ e $(R/H)_{ooo}$;

- avaliar o efeito da razão R_1/H_2 para os casos com diferentes temperaturas do solo T_s ($T_s = 308 \text{ K}$, 313 K e 318 K) avaliando o efeito de T_s sobre a

razão R_1/H_2 uma vez otimizada, $(R_1/H_2)_o$, e sobre a razão R/H duas vezes otimizada, $(R/H)_{oo}$;

- estudar a imposição de modelos numéricos que contemplem a incidência da energia radiante sobre o coletor para posterior avaliação geométrica;
- construir um dispositivo de pequena escala para servir de balizador aos modelos numéricos estudados;

Ao longo do trabalho, algumas publicações foram realizadas como fruto da própria pesquisa feita. Esses artigos foram de certa forma, etapas da produção da dissertação por completo. Cada publicação abrange uma parte desse trabalho, sendo elas um estudo inicial sobre as influências da geometria na chaminé (sendo o mesmo publicado no SEMENGO 2014 e na RETERM 2015), o estudo de otimização de um grau de liberdade (COBEM 2015) e o estudo da variação da temperatura da superfície do solo (publicado no CILAMCE 2015).

7. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Agencia Nacional de Energia Elétrica (AANEL), 2008. Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 3. ed., Brasília., 2008. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>>.

Bejan, A., “Constructal-theory network of conducting paths for cooling a heat generating volume”, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 40, No. 4, pp. 799–816, 1996.

Bejan, A. and Merks, G.W., Constructal Design of Social Dynamics, Eds., New York: Springer, 2007.

Bejan, A., Convection heat transfer, Wiley, Hoboken, New Jersey, Fourth edition, 2013.

Bejan, A.; Shape and Structure, from Engineering to Nature. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000.

Bejan, A.; Lorente, S.; *Design with Constructal Theory*. Wiley, Hoboken, 2008.

Bejan, A.; Zane, J.; *Design in nature*. Doubleday, USA, 2012.

Brum, R.; Modelagem Computacional De Trocares De Calor Solo-Ar. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande (Furg), Rio Grande, RS, Brasil, 2013.

Cao F., Li H.S., Zhao L., Guo L.J. Economic analysis of solar chimney power plants in Northwest China. J Renew Sustain Energy; 5(2):021406, 2013.

Dhahri, A. and Omri, A., “A Review of solar Chimney Power Generation Technology”, International Journal of Engineering and Advanced Technology, Vol. 2, No. 3, pp. 1 – 17, 2013.

Dos Santos, E. D.; Análise Numérica de Escoamentos Turbulentos não Reativos com Transferência de Calor por Convecção e Radiação Térmica em Meios Participantes. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Programa de Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica (PROMEC), Porto Alegre, RS, Brasil, 2011.

Dos Santos, E. D. ; Isoldi, L. A. ; Souza, J. A. ; Goulart, M. M. ; Rodrigues, M. K. ; Seibt, F. M. ; Souza, R. V. ; Rocha, L. A. O. . Constructal Design of a Rectangular Fin Intruded into Forced Convective Lid-Driven Cavity Flows. In: Constructal Law Conference, Nanjing. Proceedings of Constructal Law Conference, vol. 1. pp. 126-134, 2013.

Dos Santos, E. D. ; Machado, B. N. ; Zanella, M. M. ; Gomes, M. N. ; Souza, J. A. ; Isoldi, L. A. ; Rocha, L. A. O. . Numerical Study of the Effect of the Relative Depth on the Overtopping Wave Energy Converters According to Constructal Design. Defect and Diffusion Forum, vol. 348, pp. 232-244, 2014.

FLUENT., “Documentation Manual – FLUENT 6.3.16”, Ansys, Inc., 2007.

Fortuna, A. O; Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos – Conceitos Básicos e Aplicações, Edusp, São Paulo: Edusp, 2000.

Fluri TP, Pretorius TP, Van Dyk C, von Backström TW, Kröger DG, van Zijl GPAG. Cost analysis of solar chimney power plants. Solar Energy, 83, pp. 246–56, 2009.

Ghaleghani, M., Kasaeian, A., Ghaleghani, M., “Experimental study of geometrical and climate effects on the performance of a small solar chimney”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol43, 425–431, 2015.

Gomes, M. N. ; Lara, M. F. E. ; Iahnke, S. L. P. ; Machado, B. N. ; Goulart, M. M. ; Seibt, F. M. ; Dos Santos, E. D. ; Isoldi, L. A. ; Rocha, L. A. O. . Numerical Approach of the Main Physical Operational Principle of Several Wave Energy Converters: Oscillating Water Column, Overtopping and Submerged Plate. Defect and Diffusion Forum, vol. 362, pp. 115-171, 2015.

Gonzales, G. V. ; Estrada, E. da S. D. ; Emmendorfer, L. R. ; Isoldi, L. A. ; Xie, G. ; Rocha, L. A. O. ; Dos Santos, E. D. . A comparison of simulated annealing schedules for constructal design of complex cavities intruded into conductive walls with internal heat generation. Energy (Oxford), vol. 93, pp. 372-382, 2015.

Guo, P., Li, J., Wang, P. Numerical simulations of solar chimney power plant with radiation model. Renewable Energy 2013;

Haaf W., Friedrich K., Mayr G., and Schlaich J., — Solar Chimneys Part I: Principle and Construction of the Pilot Plant in Manzanares, International Journal of Solar Energy, vol. 2, pp. 3-20, 1983.

Kasaeian, A., Ghaleghani, M., Ghaleghani, M., Simulation and optimization of geometric parameters of a solar chimney in Tehran”, Energy Conversion and Management, Vol 83, pp. 28–34, 2014.

Kirstein, C.F., Backstrom T.Wv., Flow through a solar chimney power plant collector-to-chimney transition section. J Sol Energy Eng, pp. 128-317, 2006.

Koonsrisuk A., Chitsomboon T., Effect of tower area change on the potential of solar tower. In: The 2nd Joint International Conference on Sustainable Energy and Environment. Bangkok (Thailand). pp. 1–6, 2006.

Koonsrisuk A., Lorente S., Bejan A., Constructal solar chimney configuration, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol 53, pp. 327–333, 2010.

Launder, B. E. and Spalding, D. B., Lectures in mathematical models of turbulence, Academic Press, London, England, 1972.

Lorente S., Koonsrisuk A., and Bejan A., Constructal distribution of solar chimney power plants: Few large and many small, International Journal of Green Energy, Vol 7, pp. 577–592, 2010.

Lorenzini, G. ; Biserni, C. ; Estrada, E. D. ; Isoldi, L. A. ; Dos Santos, E. D. ; Rocha, L. A. O. . Constructal Design of Convective Y-Shaped Cavities by Means of Genetic Algorithm. Journal of Heat Transfer, Vol. 136, pp. 071702-071702-10, 2014.

Maliska, C. R.; Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional; Rio de Janeiro: LTC, 2004.

Miguel, A.F., “The Emergence of Design in Pedestrian Dynamics: Locomotion, Self-Organization, Walking Paths and Constructal Law”, Phys Life Rev, 2013.

Mullet LB., "Solar chimney – overall efficiency". Des Perform Int J Ambient Energy, Vol. 8, pp. 35–40, 1987.

Patankar, S. V., Numerical heat transfer and fluid flow, McGraw Hill, New York, USA, 1980.

Patel, S.K., Prasad, D. and Ahmed, M.R., “Computational studies on the effect of geometric parameters on the performance of a solar chimney power plant”, Energy Conversion and Management, Vol. 77,, pp. 424–431, 2014.

Plano Nacional de Energia 2030 - PNE2030.

Rocha, L. A. O. ; Gomes, M. N. ; Porte, A. F. ; Galarca, M. M. ; Acunha Jr, I.C. ; da Silva, F. M. V. ; Isoldi, L. A. ; Dos Santos, E. D. . Constructal Design of Turbulent Forced Convective Flows over a Pair of Circular cylinders. In: Constructal Law Conference, Nanjing. Proceedings of Constructal Law Conference, Vol. 1, pp. 174-184, 2013.

Rocha, L.A.O., Lorente, S., and Bejan, A., Constructal Law and the Unifying Principle of Design, Eds., Springer-Verlag, 2013.

Schlaich J, Bergermann R, Schiel W, Weinrebe G. Sustainable electricity generation with solar updraft towers. Struct Eng Int, Vol 3, pp: 225–9, 2004.

Stern N., The economics of climate change: the stern review. Cambridge, UK: Cambridge University Press; 2007.

Versteeg, H. K., Malalasekera, W., An Introduction to Computational Fluid Dynamics, Longman, Malasia, pp. 257, 1995.

Versteeg, H. K. and Malalasekera, W., An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, Pearson, 2007.

Vieira, R.S., Garcia C., Junior, I. C. A., Souza, J. A., Rocha, L. A. O., Isoldi, L. A. and dos Santos, E. D., 2015, "Numerical study of the influence of geometric parameters on the available power in a solar chimney", Engenharia Térmica (Thermal Engineering), Vol. 14, No. 1, pp. 103-109, June 2015.

Wilcox, D. C., Turbulence modeling for CFD, DCW Industries, La Canada, USA, 2nded, 2002.

Zhou, X., Yang, J., Xiao, B. and Hou, G., “Experimental study of temperature field in a solar chimney power setup”, Applied Thermal Engineering, Vol. 27, No. 11-12, pp. 2044–2050, 2007.