



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

DIOGO AGOSTINHO DA COSTA

CONCEPÇÃO E SIMULAÇÃO DE UMA CHAMINÉ SOLAR

Guaratinguetá

2013

DIOGO AGOSTINHO DA COSTA

CONCEPÇÃO E SIMULAÇÃO DE UMA CHAMINÉ SOLAR

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Alexandre Matelli

Guaratinguetá

2013

C837c Costa, Diogo Agostinho da
Concepção e simulação de uma chaminé solar / Diogo Agostinho da
Costa – Guaratinguetá : [s.n], 2013.
33 f : il.
Bibliografia: f. 31

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013.
Orientador: Prof. Dr. José Alexandre Matelli

1. Energia solar I. Título

CDU 620.91



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

CONCEPÇÃO E SIMULAÇÃO DE UMA CHAMINÉ SOLAR

DIOGO AGOSTINHO DA COSTA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE "GRADUADO EM
ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. ANTONIO WAGNER FORTI
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. José Alexandre Matelli
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna
UNESP-FEG



Prof. Dr. José Antonio Ferrelle Balestieri
UNESP-FEG

Dezembro de 2013

Àqueles que me apoiaram e acreditaram em mim,
dedicando parte do seu tempo para que este trabalho fosse
realizado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por conceder-me vida e força e por me fazer acreditar que sonhos se tornam realidade.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Alexandre Matelli pela dedicação e disposição em me auxiliar.

Ao Prof. Dr. Luiz Roberto Carrocci, com quem também pude contar diversas vezes a fim de que este trabalho se concretizasse.

Aos meus pais e ao meu irmão que sempre acreditaram em mim e me apoiaram em todas as dificuldades e fases e da minha vida.

Por fim, mas não menos importante, meus “irmãos” da república Amoribunda!

“Não sabendo que era impossível, foi lá e fez.”

Jean Cocteau

COSTA, D. A. **Concepção e simulação de uma chaminé solar**. 2013. 33 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo estudar alguns aspectos fluidodinâmicos e de transferência de calor de um sistema de chaminé solar, visando um projeto preliminar de uma instalação. São apresentadas algumas definições e conceitos envolvidos neste sistema de obtenção de energia. A simulação se deu a partir de um modelo teórico validado com medições de um protótipo em Manzanares, Espanha. Utilizando esse mesmo modelo teórico e algumas considerações, aplicam-se dimensões de menor escala tornando o modelo mais interessante do aspecto construtivo. Os resultados mostram o comportamento da velocidade do ar no interior da chaminé bem como ilustra valores de potência para duas turbinas pré-selecionadas. Tal tecnologia se mostra promissora em território brasileiro devido aos altos índices de radiação solar.

PALAVRAS-CHAVE: Chaminé solar. Energias renováveis.

COSTA, D. A. **Concepção e simulação de uma chaminé solar**. 2013. 33 f. Graduate Work (Graduate in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

ABSTRACT

The present work intends to study some fluid dynamic and heat transfer aspects of a solar chimney, aiming at a preliminary design of a facility. Some definitions and concepts of this system are presented. The simulation was performed based on a theoretical model validated with measurements of a prototype in Manzanares, Spain. Using the same theoretical model and some considerations, dimensions on a small scale are applied, making the model more interesting from its constructive aspect. The results show the behavior of the air velocity inside the chimney and illustrate some values of two preselected turbines. This technology looks promising in Brazilian territory due to high levels of solar radiation.

KEYWORDS: Solar chimney. Renewable energy.

LISTA DE SÍMBOLOS

T	temperatura [K]
C_p	calor específico [J/kgK]
h	altitude [m]
g	aceleração da gravidade [m/s ²]
G	radiação solar [W/m ²]
η	eficiência [%]
R	raio [m]
D	diâmetro [m]
H	altura da chaminé [m]
\dot{m}	vazão mássica [kg/s]
ρ	massa específica [kg/m ³]
V	velocidade [m/s]
A	área [m ²]
γ	gradiente adiabático [K/m]

Subscritos

∞	ambiente
∞_{in}	entrada do coletor
in	entrada da chaminé
coll	coletor
c	chaminé

SUMÁRIO

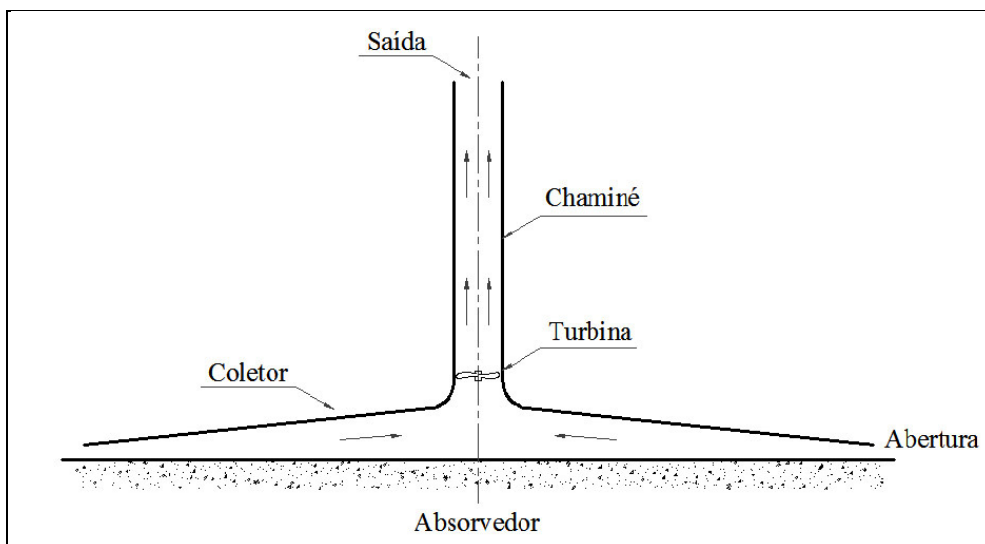
1	INTRODUÇÃO.....	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	18
3.1	BALANÇO DE ENERGIA.....	18
3.2	BASE DE CÁLCULO.....	19
3.2.1	Equações de destaque.....	19
3.3	VALORES DE RADIAÇÃO SOLAR.....	20
3.4	EFICIÊNCIA DO COLETOR.....	22
3.5	TURBINAS EÓLICAS.....	23
4	RESULTADOS.....	26
5	CONCLUSÃO.....	30
	REFERÊNCIAS.....	31
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	33

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente preocupação dos governos em reduzir a emissão de gases poluentes, as fontes de energias renováveis estão ganhando seu espaço no mercado atual. Esse trabalho vem, portanto, procurar atender essa necessidade de se conhecer novos meios de geração de energia limpa com baixos custos de geração e manutenção, visando um melhor aproveitamento da fonte eólica.

A tecnologia aqui discutida, conhecida como chaminé solar, ilustrada na Figura 1, é projetada para gerar energia elétrica. Ela utiliza a energia solar para gerar um fluxo ascendente de ar, o qual é capaz de acionar uma turbina eólica. A chaminé solar combina três componentes: um coletor solar, uma chaminé e a turbina. No coletor, a radiação solar é usada para aquecer um absorvedor, que por sua vez troca calor com uma determinada massa de ar. Esta sobe pela chaminé, devido à diferença de densidade entre o ar na base do coletor e sua periferia. A massa de ar ascendente aciona uma turbina eólica instalada na chaminé a fim de gerar energia elétrica.

Figura 1 – Esquema de uma chaminé solar.



Fonte: produção do próprio autor.

O objetivo do presente trabalho é simular uma chaminé solar de pequena escala que possibilite a construção de um protótipo, visto que as chaminés solares são em sua maioria muito grandes.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica para maior compreensão da tecnologia aqui apresentada, seu histórico e benefícios. No capítulo 3 é apresentada a formulação do problema, onde são expostos o balanço de energia e a base de cálculo utilizada, as principais equações para a modelagem, os valores de radiação utilizados na simulação e as características de duas turbinas eólicas, também utilizadas na simulação. No capítulo 4 são apresentados os principais resultados obtidos e no capítulo 5 são feitas as conclusões deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

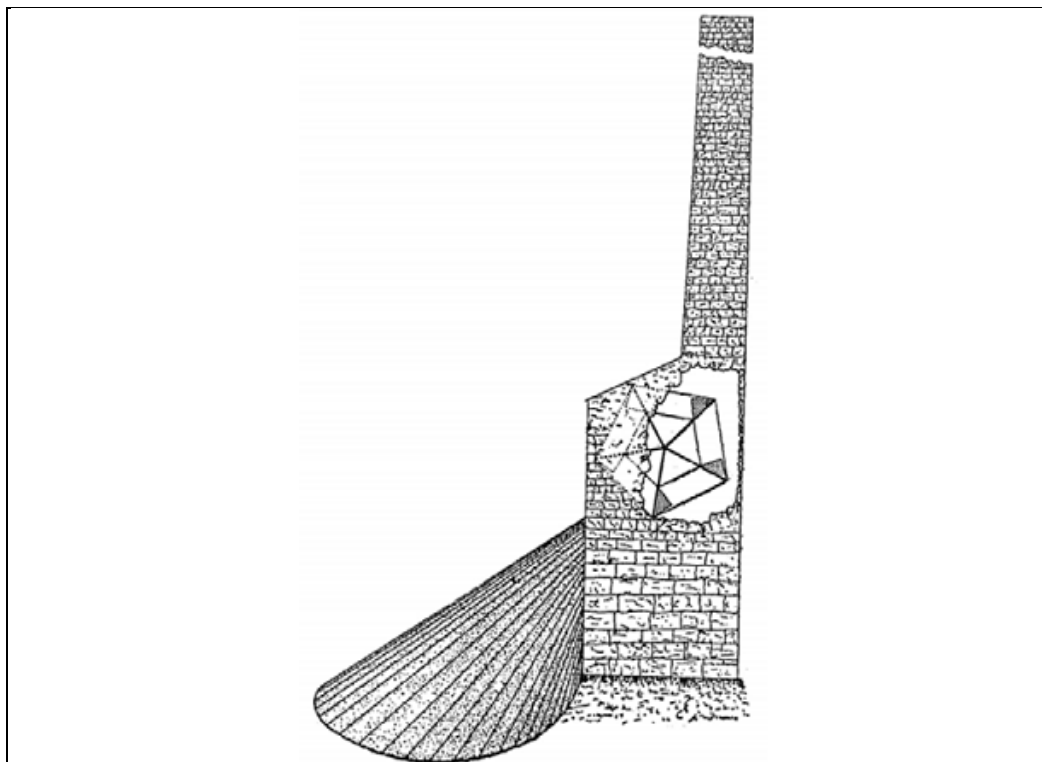
Muitas são as tecnologias de geração de energia que utilizam a energia solar como sua fonte principal. Essas tecnologias podem ser divididas basicamente em duas categorias: direta – com uma só transformação a fim de transformar a energia solar em outra forma utilizável de energia (por exemplo, os painéis solares que transformam a energia solar em elétrica) – e indireta – quando existe mais de uma transformação a fim de que haja conversão de energia utilizável (por exemplo, placas fototérmicas, que direcionam os raios solares a uma tubulação a qual contém um fluido. O fluido em questão entra em contato com a água de um reservatório liberando vapor. Este, por sua vez, aciona turbinas e gera eletricidade). A chaminé solar encaixa-se, portanto, na segunda categoria, uma vez que existe a participação da energia solar, mas a conversão em energia elétrica se dá a partir do acionamento de uma turbina eólica.

Um fenômeno natural relativo à utilização da energia solar envolve o aquecimento da superfície da Terra e, conseqüentemente, o aquecimento do ar adjacente à sua superfície. Este ar quente se expande e promove um fluxo de ar que compõe a atmosfera da Terra. A quantidade de energia disponível devido à flutuação dessas massas de ar é tão grande que, associada aos movimentos planetários, pode gerar grandes ciclones tropicais.

Há tempos algumas concepções foram estudadas a fim de tirar proveito desse fenômeno natural. Bernardes (2010) reuniu algumas dessas concepções que datam do início do século XX. Uma das primeiras descrições de uma chaminé solar foi apresentada em 1903, por Isidoro Cabanyes, um coronel de artilharia espanhola. Ele publicou uma proposição de um aquecedor solar junto a uma casa com uma chaminé. No interior da casa, uma espécie de hélice foi instalada com a finalidade de geração de energia elétrica, como mostrado na Figura 2.

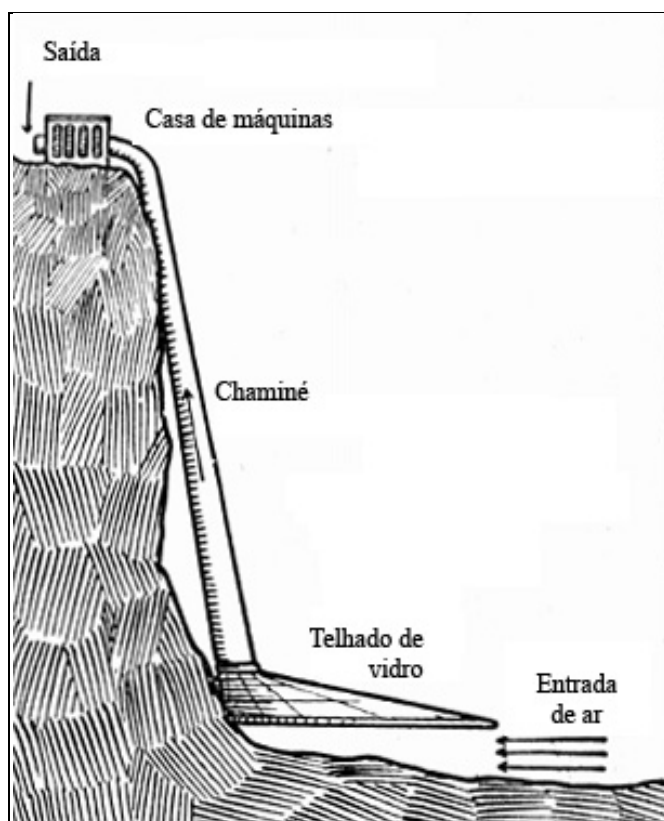
Em 1926, na Academia Francesa de Ciências, o Prof. Engenheiro Bernard Dubos propôs a construção de uma chaminé solar na encosta de uma montanha. O autor afirma que uma velocidade de 50 m/s poderia ser atingida no interior da chaminé. A Figura 3 ilustra este projeto e a Figura 4, uma visão futurística do mesmo projeto.

Figura 2 – Projeto de chaminé solar proposto por Isidoro Cabanyes.



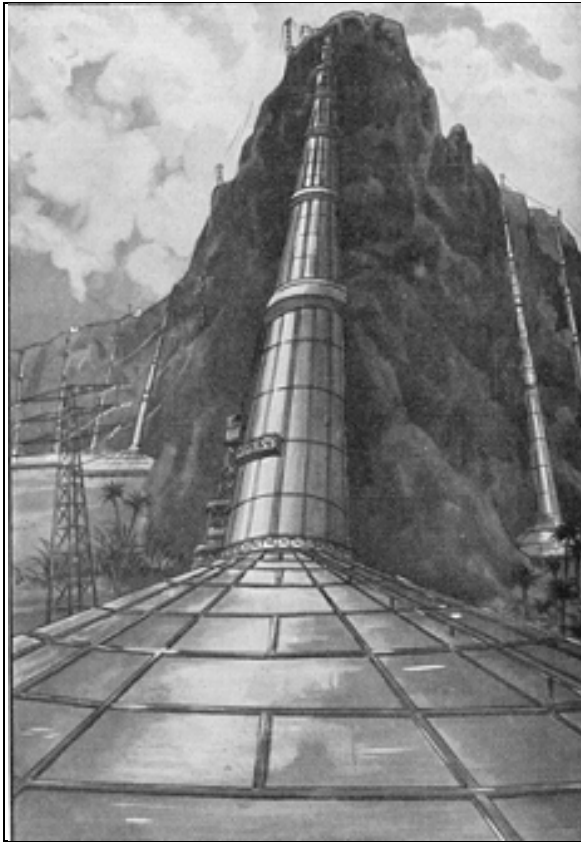
Fonte: (BERNARDES, 2010).

Figura 3 – Chaminé solar proposta por Bernard Dubos.



Fonte: (BERNARDES, 2010) adaptada.

Figura 4 – Visão futurista da chaminé solar proposta por Bernard Dubos.



Fonte: (BERNARDES, 2010).

Em 1982, foi construído um protótipo de chaminé solar em Manzanares, Espanha, a 150 km ao sul de Madrid. A chaminé tinha a altura de 195 m e diâmetro de 10 m. A área do coletor era cerca de 46000 m² (com diâmetro de 244 m). Possuía uma capacidade de gerar 50 kW de pico. O protótipo operou durante oito anos, teve de ser desmontado devido ao aparecimento de ferrugem nos cabos que sustentavam a chaminé (MILLS, 2004). Uma grande parte dos estudos e publicações contêm os dados de operação obtidos desse protótipo, sendo grande parte deles oriundos dos estudos de Haaf et al. (1983) e Haaf (1984). A chaminé solar de Manzanares é mostrada na Figura 5.

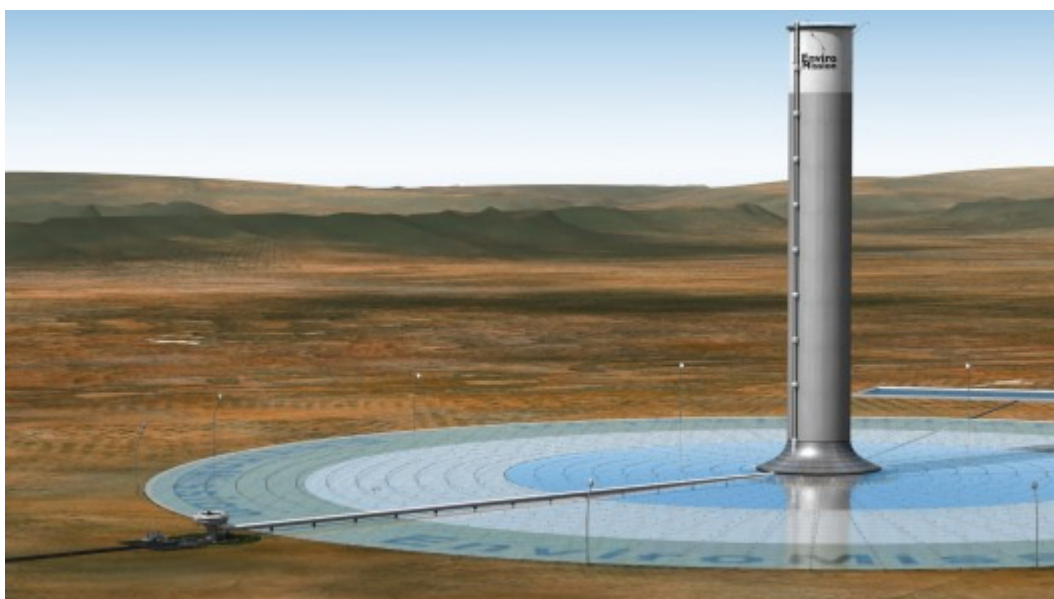
Outro grande projeto está previsto para começar a operar em 2015. Será construída no Deserto do Arizona, Texas, EUA, uma chaminé solar com capacidade de geração de 200 MW. Segundo a empresa australiana EnviroMission (2013), responsável pelo projeto que contará com 32 turbinas de 6,25 MW, a construção terá grandes dimensões: cerca de 800 m de altura, diâmetro da chaminé de aproximadamente 130 m e diâmetro do coletor em torno de 2000 m. A Figura 6 ilustra a futura construção.

Figura 5 – Protótipo construído em Manzanares, Espanha.



Fonte: (ENVIROMISSION, 2013).

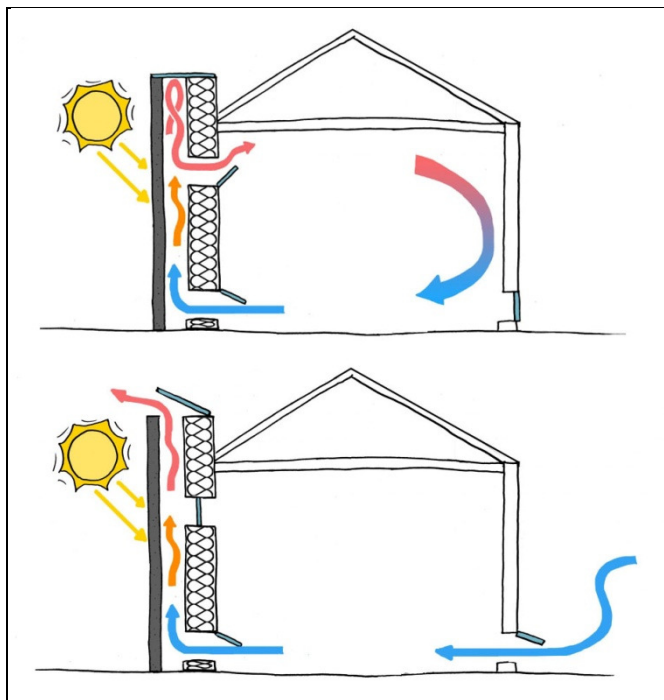
Figura 6 – Projeto da chaminé solar a ser construído no Deserto do Arizona.



Fonte: (ENVIROMISSION, 2013).

Outra concepção de chaminé solar é utilizada pela arquitetura para o aquecimento (ou resfriamento) de ambientes. A Figura 7 ilustra essa concepção. O sol aquece uma parede promovendo a convecção dentro do ambiente e, então, a recirculação ou renovação do ar.

Figura 7 – Chaminé solar para aquecimento/resfriamento de ambientes.



Fonte: (AUTODESK, 2013) adaptada.

Segundo informações disponíveis no site da empresa responsável pelo projeto da Chaminé solar que entrará em operação no Deserto do Arizona (ENVIROMISSION, 2013), muitos são os benefícios dessa tecnologia. Alguns deles são citados abaixo:

- Zero uso de água;
- Zero emissões;
- Zero poluição;
- Geração de energia confiável e sustentável;
- Baixo custo de operação;
- Disponibilidade de armazenamento de calor;

Uma pesquisa preliminar foi realizada a fim de se obter um material consistente para o desenvolvimento deste trabalho. Vários artigos sobre o assunto foram encontrados. Alguns deles muito específicos como, por exemplo, o estudo de Koonsrisuk e Chitsomboon (2009) que usa análise dimensional para combinar oito variáveis primitivas num grupo adimensional para estabelecer uma similaridade dinâmica entre um protótipo e seu modelo em escala. Há ainda o estudo de Ninic (2006), o qual determina e analisa o potencial de trabalho que o ar

atmosférico adquire quando passa pelo coletor, bem como a dependência desse potencial sobre o ar que flui para o coletor de ar, a partir do ganho de calor dentro do coletor, da umidade do ar e da pressão atmosférica.

Alguns outros artigos abordam o assunto de uma maneira mais abrangente, como é o caso do estudo de Dhahri e Omri (2013), que apresenta as principais características do sistema de chaminé solar (princípios de funcionamento, seus requisitos, sua construção e operação), bem como traz informações atuais sobre projetos e pesquisa e desenvolvimento. Há também o trabalho de Koonsrisuk, Lorente e Bejan (2010), que descreve as características e aspectos construtivos da chaminé solar e foca na otimização e aumento da geração de energia sobre a área ocupada pela planta.

Um dos artigos pesquisados merece destaque. Zhou et al. (2009) publicaram um artigo no qual realizam análises da altura da chaminé solar. Apresentam e analisam a máxima altura da chaminé, a fim de evitar o efeito de fluatibilidade negativa no interior da chaminé (caso em que a temperatura na saída da chaminé se apresenta menor que a temperatura do ar ambiente na mesma altitude). Analisam também valores ótimos de altura de chaminé para a obtenção de máxima potência na turbina. Seus resultados são baseados no protótipo construído em Manzanares. Essa análise também é feita variando alguns aspectos construtivos, como raio do coletor e também variando fatores externos, como valores de radiação solar.

3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

3.1 BALANÇO DE ENERGIA

Um dos principais componentes de uma chaminé solar é o coletor solar. É um tipo de trocador de calor onde ocorre o processo de transferência de energia proveniente da radiação solar para a massa de ar que irá fluir para a chaminé. O coletor é a parte da chaminé em que se produz ar quente pelo efeito estufa. Geralmente, ele é feito de um filme plástico esticado horizontalmente acima do solo (Figura 8). Esta cobertura admite o componente da radiação solar de onda curta e retém a radiação de onda longa do chão aquecido. Assim, o terreno sob o coletor aquece e transfere o seu calor para o ar que flui radialmente para cima a partir do exterior para a chaminé (DHAHRI; OMRI, 2013).

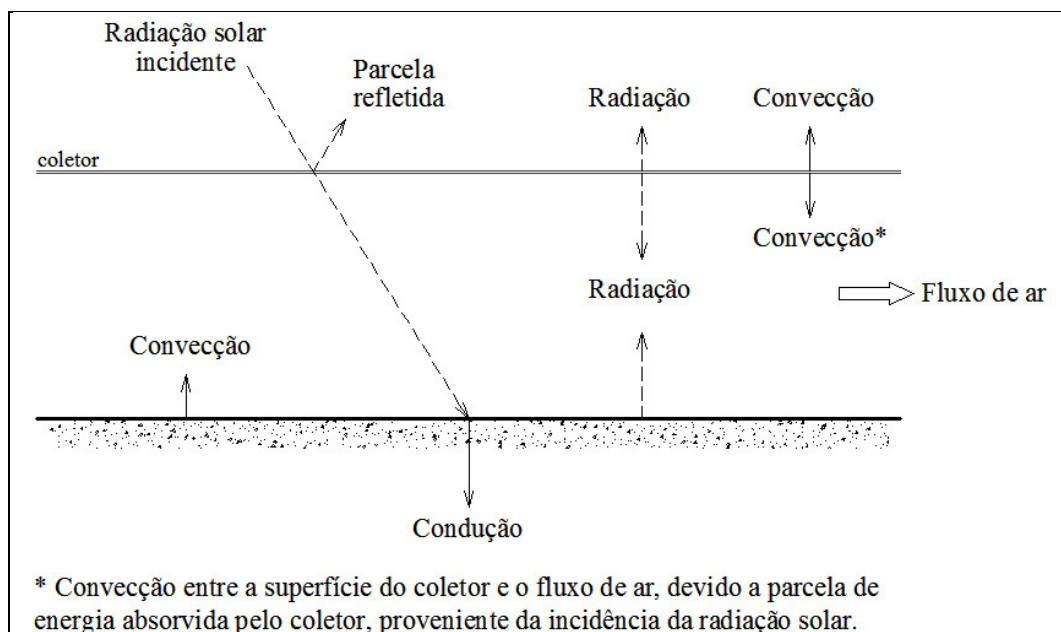
Figura 8 – Disposições de construção do coletor.



Fonte: (DHAHRI; OMRI, 2013).

Várias trocas de calor ocorrem no processo de aquecimento do ar abaixo do coletor. A Figura 9 ilustra o balanço energético que envolve esse processo. Qualitativamente, é possível perceber a existência de várias perdas de energia, como por exemplo, a condução para o solo, a convecção com o ar ambiente acima do coletor, dentre outras. Mais à frente, na seção 3.4, que diz respeito à eficiência do coletor, serão discutidos a quantidade de energia perdida e os valores utilizados na simulação.

Figura 9 – Balanço de energia no coletor.



Fonte: produção do próprio autor.

3.2 BASE DE CÁLCULO

A modelagem matemática utilizada como base de cálculo para as simulações foi feita a partir do trabalho de Zhou et al. (2009), no qual estudam um modelo teórico detalhado. No artigo, foi feita a modelagem considerando as perdas de calor através das paredes da chaminé, embora apresentem também algumas equações desconsiderando tais perdas. Neste trabalho, desconsideram-se as perdas de calor através da parede da chaminé.

3.2.1 Equações de destaque

Dada a modelagem matemática do artigo de Zhou et al. (2009), mencionado anteriormente, algumas equações merecem destaque.

A equação (1) mostra a maneira na qual a temperatura no interior da chaminé varia em função da altitude, quando as perdas de calor através da parede da chaminé não são consideradas.

$$T(h) = T_{\infty in} - \frac{g}{C_p} h + \frac{\pi G \eta_{coll}}{C_p \dot{m}} R_{coll}^2 \quad (1)$$

A equação (2) mostra como varia a temperatura ambiente (fora da chaminé), em função da altitude, devido ao gradiente adiabático (que é o gradiente vertical de temperatura de uma massa de ar. Neste trabalho, considera-se igual a 0,0064 K/m).

$$T_{\infty}(h) = T_{\infty in} - \gamma_{\infty} h \quad (2)$$

A altura máxima da chaminé é proposta quando a temperatura na saída da chaminé tiver o mesmo valor que a temperatura ambiente na mesma altitude, como mostra a equação (3). Isso porque a temperatura na saída da chaminé não pode ser mais baixa que a temperatura ambiente na mesma altitude, a fim de evitar a neutralização do efeito de flutuabilidade.

$$T(H_{Max}) = T_{\infty}(H_{Max}) \quad (3)$$

Substituindo as equações (1) e (2) na equação (3), obtém-se a equação (4), que mostra o valor da altura máxima da chaminé.

$$H_{Max} = \frac{\pi G \eta_{coll}}{\dot{m}(g - \gamma_{\infty} C_p)} R_{coll}^2 \quad (4)$$

A equação (5) mostra a vazão mássica, que é dependente da massa específica do ar, área da seção da chaminé e velocidade do ar.

$$\dot{m} = \rho_{in} A_c V_{in} \quad (5)$$

3.3 VALORES DE RADIAÇÃO SOLAR

O Brasil, por ser um país localizado numa região intertropical, tem um enorme potencial para o aproveitamento da energia solar durante todo o ano. O Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA et al., 2006), traz a seguinte informação:

A utilização da energia solar traz benefícios a longo prazo para o país, viabilizando o desenvolvimento de regiões remotas onde o custo da eletrificação pela rede convencional é demasiadamente alto com relação ao retorno financeiro do investimento, regulando a oferta de energia em períodos de estiagem, diminuindo a dependência do mercado de petróleo e reduzindo as emissões de gases poluentes à atmosfera como estabelece a Conferência de Kyoto (PEREIRA et al., 2006, p.10).

Tal informação reforça a ideia de que novas tecnologias utilizando a fonte de energia solar devem ser estudadas, tendo em vista o grande potencial da energia solar em território brasileiro.

Os valores de radiação solar têm grande importância para a análise do funcionamento do sistema de chaminé solar.

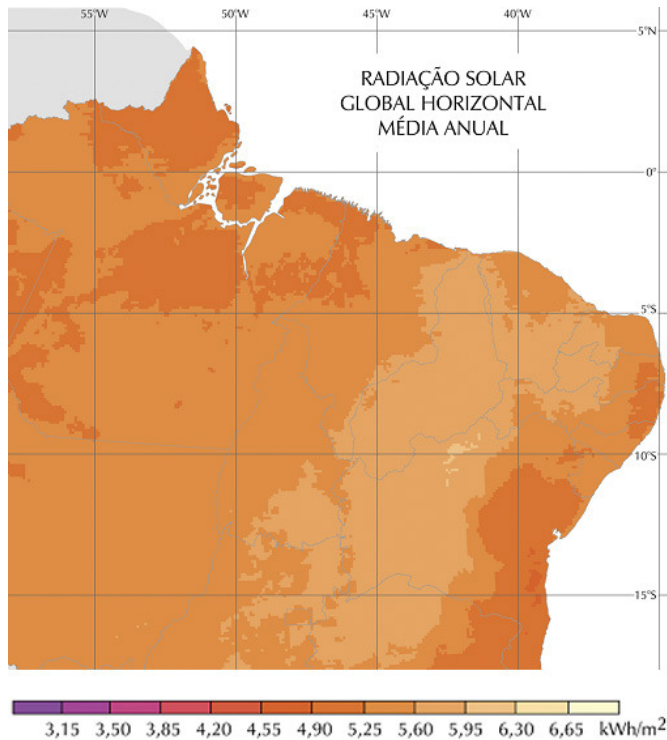
Para este trabalho, os valores de radiação pesquisados foram valores em que os índices de radiação eram maiores ao longo do ano, ou seja, valores entre os meses de dezembro e janeiro.

Os valores de radiação para a cidade de Guaratinguetá têm média de 208,3 W/m², entre dezembro de 2012 e janeiro de 2013 (SINDA, 2013). Segundo dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar, a média anual de irradiação global apresenta boa uniformidade, com médias anuais relativamente altas em todo o país. O valor máximo de irradiação global ocorre no norte do estado da Bahia, próximo à fronteira do estado do Piauí – 270 W/m². O Atlas Brasileiro de Energia Solar ainda apresenta a seguinte informação:

Os valores de irradiação solar global incidente em qualquer região do território brasileiro (1500-2500 kWh/m²) são superiores aos da maioria dos países da União Europeia, como Alemanha (900-1250 kWh/m²), França (900-1650kWh/m²) e Espanha (1200-1850 kWh/m²), onde projetos para aproveitamento de recursos solares, alguns contando com fortes incentivos governamentais, são amplamente disseminados (PEREIRA et al., 2006, p.31).

A Figura 10 mostra a média anual do total de radiação global incidente no território brasileiro. A região mais clara mostra os índices mais altos de radiação solar. É sabido, contudo, que valores instantâneos superiores a 1000 W/m² são atingidos em torno do meio-dia, mesmo com céu parcialmente nublado (CUNHA, 2000).

Figura 10 – Média anual da radiação solar global.



Fonte: (PEREIRA et al., 2006) adaptada.

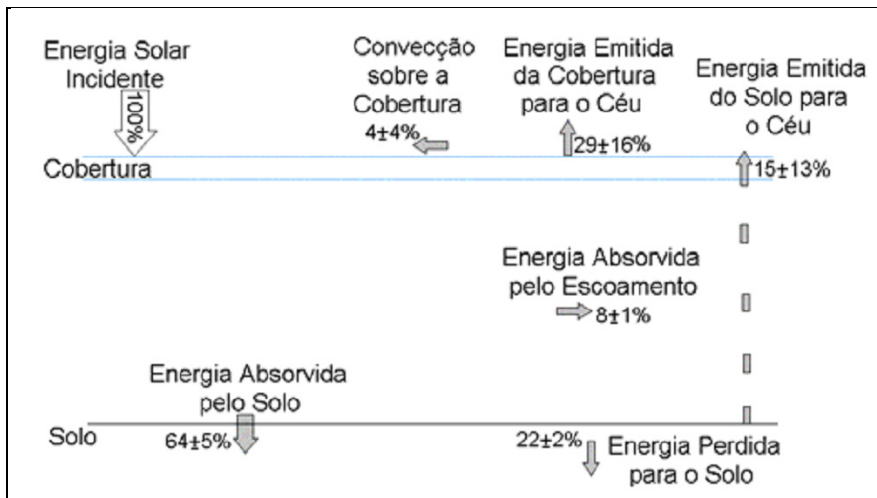
3.4 EFICIÊNCIA DO COLETOR

Observando as equações (1) e (4), ambas são dependentes da eficiência do coletor (η_{coll}). Utilizou-se o trabalho de Ferreira et al. (2006), a fim de encontrar um valor razoável de eficiência do coletor. Em seu trabalho, foi construído um protótipo de chaminé solar e na confecção do coletor utilizaram-se filmes plásticos termodifusor e tipo estufa. Através de dados obtidos por solarímetros devidamente instalados no interior e na parte externa do coletor, foi realizado o balanço energético no coletor.

Segundo Ferreira et al. (2006), o material utilizado na cobertura do coletor solar deve apresentar uma alta transmissividade à radiação solar e uma baixa transmissividade à radiação infravermelha, fazendo com que aumente a incidência da radiação solar sobre o absorvedor e diminuam as perdas de radiação térmica emitida pelo absorvedor.

A Figura 11 ilustra, esquematicamente, o balanço energético realizado com dados obtidos durante uma semana de setembro de 2003.

Figura 11 – Balanço de energético no protótipo de chaminé solar.



Fonte: (FERREIRA et al., 2006).

O protótipo estudado apresentou uma eficiência de 8%, que é a energia absorvida pelo escoamento. É necessário ressaltar que alguns valores do balanço energético realizado nesse estudo deixam a desejar quanto à precisão. Alguns valores têm incerteza muito próxima do valor médio, apresentando grande variabilidade na medição, como é o caso da energia emitida do solo para o céu, que é de $15 \pm 13\%$, ou ainda a convecção sobre a cobertura, $4 \pm 4\%$. Para a obtenção desses resultados, foram utilizados equipamentos como psicrômetros, com incerteza de 5,8%, termopares, com incerteza de 1,2 °C, e anemômetros, com incerteza de 6,6%. Tais incertezas acumuladas podem explicar alguns desses valores.

Apesar de os valores variarem significativamente, para efeito de simulação, utilizou-se neste trabalho a eficiência de 8% obtida no estudo de Ferreira et al. (2006).

A fim de aumentar a eficiência da chaminé solar, é interessante uma dedicação maior no estudo do absorvedor térmico. Ele possui grande papel no bom funcionamento dessa tecnologia. Para o caso de chaminés solares de pequeno porte, é válido investir, por exemplo, em materiais isolantes logo abaixo do absorvedor, visto que grande parte da energia se perde por condução para o solo.

3.5 TURBINAS EÓLICAS

Um dos componentes principais da chaminé solar é a turbina eólica que geralmente é instalada na base da chaminé, podendo assumir duas configurações: na vertical ou em várias turbinas dispostas radialmente próximas da chaminé. Para o caso de chaminés solares muito

grandes (como o projeto a ser construído no Arizona), as turbinas admitem a segunda configuração, pois o raio da chaminé é muito grande. Nos casos em que as chaminés possuem dimensões menores, é interessante a primeira configuração, pois as turbinas são dimensionadas segundo o valor do raio da chaminé.

Neste trabalho, considera-se dimensionar a chaminé a partir de turbinas eólicas comerciais. Duas delas foram selecionadas e comparadas: a Ecoforce e a AIR Breeze.

A turbina da Ecoforce possui diâmetro do rotor de 1,31 m, três hélices e potência de saída nominal de 600 W (com vento de 12,5 m/s) (ECOFORCE, 2003), enquanto a turbina da AIR Breeze possui diâmetro do rotor de 1,17 m, três hélices e potência nominal de saída de 200 W (com vento de 12,5 m/s) (AIRBREEZE, 2013). A Figura (12) ilustra a turbina da Ecoforce e a Figura (13), a da AIR Breeze.

Figura 12 – Turbina eólica Ecoforce.



Fonte: (ECOFORCE, 2013).

Figura 13 – Turbina eólica AIR Breeze.



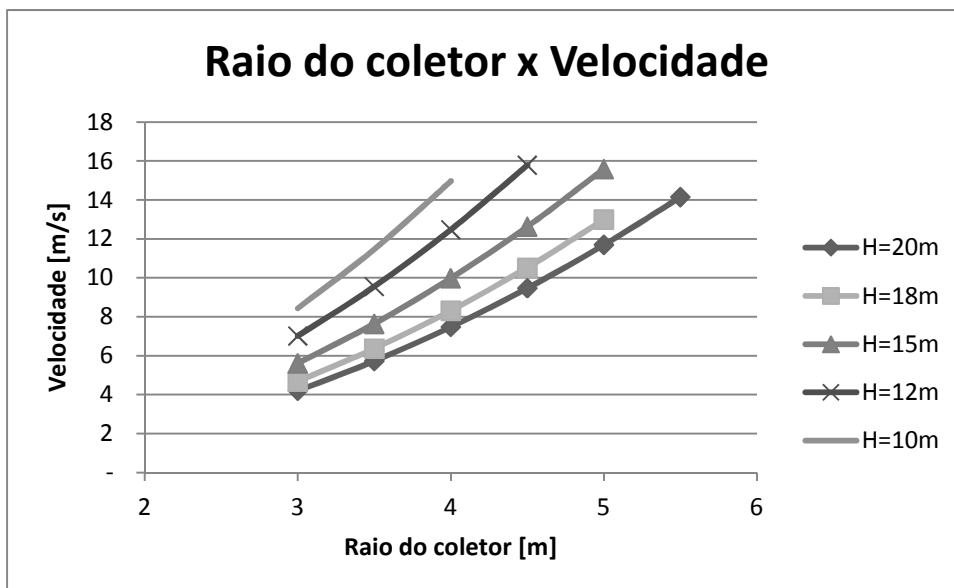
Fonte: (AIRBREEZE, 2013).

4 RESULTADOS

Foram feitas algumas simulações para observar o comportamento da velocidade do ar no interior da chaminé. Variaram-se parâmetros de radiação solar ($208,3 \text{ W/m}^2$ para a cidade de Guaratinguetá e 270 W/m^2 para a região no norte do estado da Bahia), altura da chaminé (valores entre 10 m e 20 m), diâmetro da chaminé (1,35 m para a instalação da turbina da Ecoforce e 1,20 m para a turbina da AIR Breeze) e raio do coletor solar (valores entre 3 m e 5,5 m).

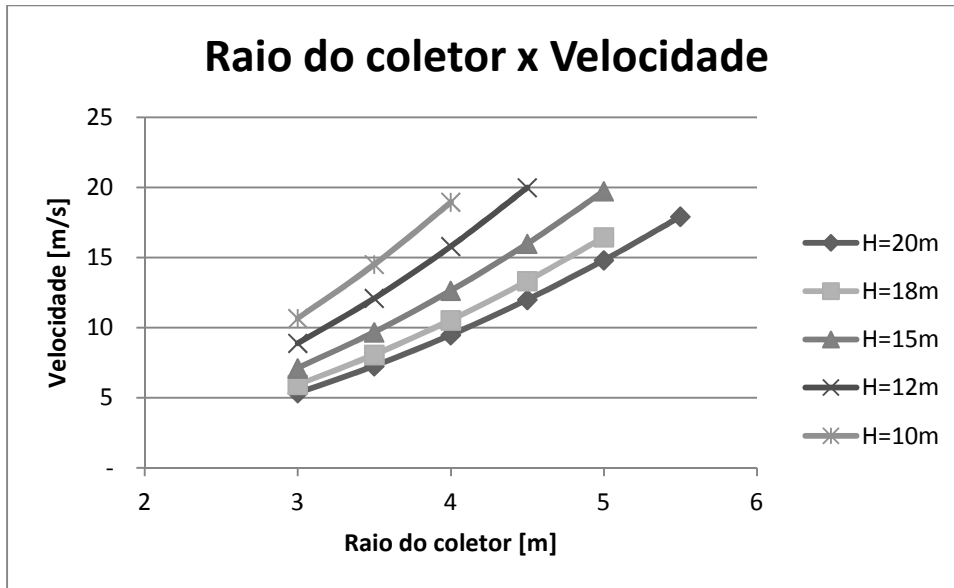
As Figuras (14), (15), (16) e (17) mostram a variação da velocidade no interior da chaminé, conforme a variação dos demais parâmetros.

Figura 14 – Raio do coletor x Velocidade do ar – $G = 208,3 \text{ W/m}^2$; $D_c = 1,35 \text{ m}$.



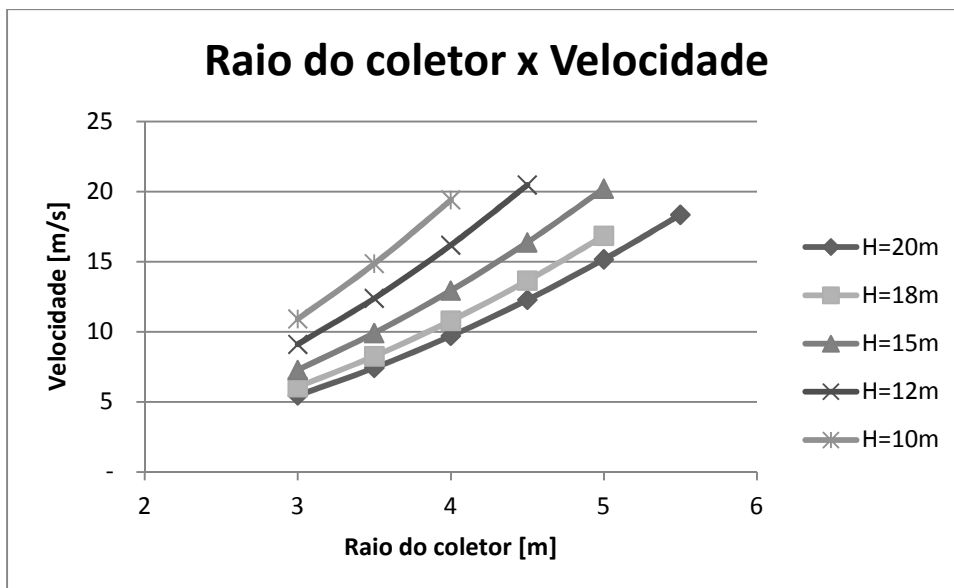
Fonte: produção do próprio autor.

Figura 15 – Raio do coletor x Velocidade do ar – $G = 208,3 \text{ W/m}^2$; $D_c = 1,20 \text{ m}$.



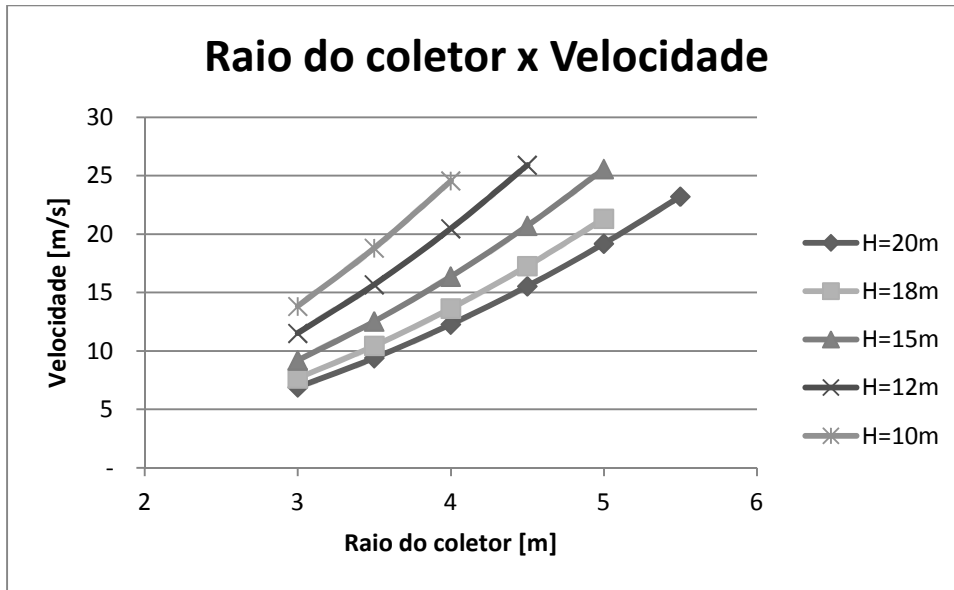
Fonte: produção do próprio autor.

Figura 16 – Raio do coletor x Velocidade do ar – $G = 270,0 \text{ W/m}^2$; $D_c = 1,35 \text{ m}$.



Fonte: produção do próprio autor.

Figura 17 – Raio do coletor x Velocidade do ar – $G = 270,0 \text{ W/m}^2$; $D_c = 1,20 \text{ m}$.

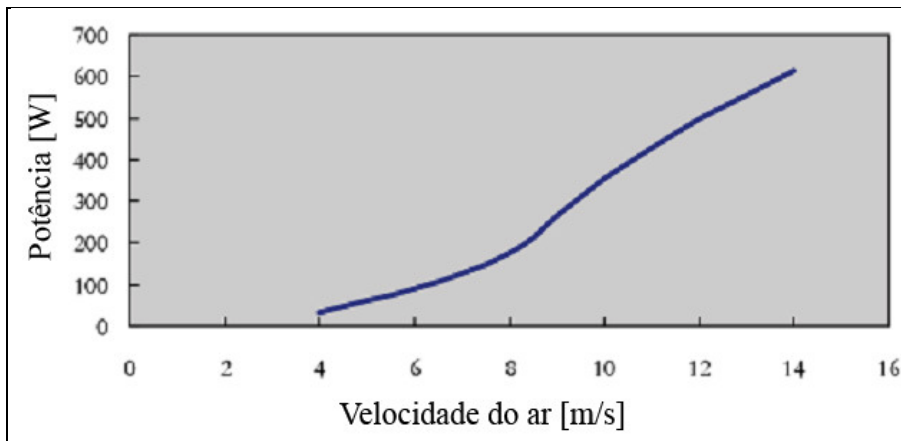


Fonte: produção do próprio autor.

Segundo o manual da turbina da Ecoforce, a velocidade de partida é 4,5 mph (ou 2,01 m/s) e a velocidade de sobrevivência ao vento (que é a velocidade capaz de comprometer a integridade física da turbina) é de 157 mph (ou 70,19 m/s). Para a turbina da AIR Breeze, segundo seu manual, a velocidade de partida é de 6 mph (ou 2,68 m/s) e a velocidade de sobrevivência ao vento é de 110 mph (ou 49,20 m/s).

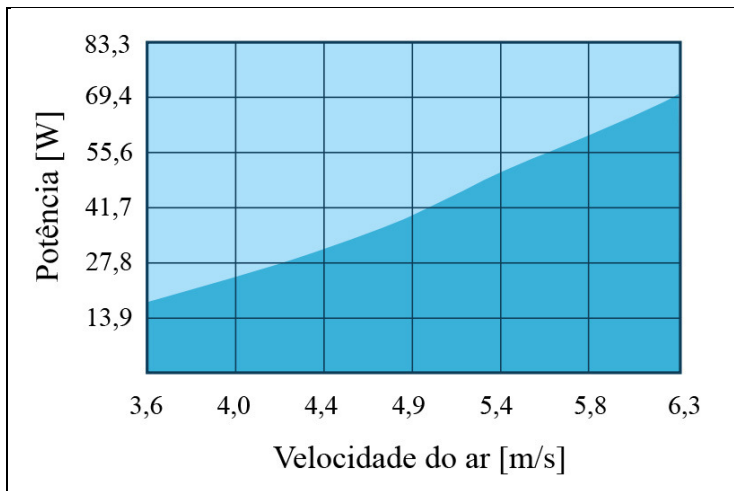
Em posse do comportamento das velocidades no interior da chaminé, é possível observar os valores de potência obtidos pelas turbinas. As Figuras (18) e (19) ilustram a variação da potência de saída das turbinas Ecoforce e AIR Breeze, em função da velocidade.

Figura 18 – Velocidade x Potência – Turbina eólica Ecoforce.



Fonte: adaptado de (ECOFORCE, 2013).

Figura 19 – Velocidade x Potência – Turbina eólica AIR Breeze.



Fonte: adaptado de (AIRBREEZE, 2013).

Como esperado, é possível observar que quanto maior o raio do coletor, maior a velocidade dentro da chaminé. Dada uma mesma vazão, quanto menor o diâmetro da chaminé, maior a velocidade do ar em seu interior para um dado valor de radiação solar. Quanto maior a radiação solar, maior a velocidade do fluxo de ar.

Para uma dada turbina, é possível extrair maior potência quando por ela passa um volume de ar com maior velocidade.

Observando as Figuras (18) e (19), fica evidente que, dentre as turbinas apresentadas, a turbina da Ecoforce é capaz de gerar mais energia.

5 CONCLUSÃO

Simulando a construção de uma chaminé solar, a partir da base de cálculo apresentada, com baixos valores de dimensões, percebe-se que valores razoáveis de velocidade no interior da chaminé foram alcançados. Estes seriam capazes de acionar as turbinas mencionadas, gerando uma quantidade de energia considerável. Nesse ponto é importante ressaltar que as perdas de calor através das paredes da chaminé foram desprezadas, o que poderia ocasionar perdas expressivas na obtenção de energia gerada pela turbina.

Em trabalhos futuros, seria interessante a aplicação de um software para modelagem de escoamentos, no qual todas as variáveis podem ser consideradas e, então, uma maior precisão ser obtida. Em posse de um estudo mais aprofundado, seria conveniente a construção de um protótipo para a validação dos dados.

Esta tecnologia pode ser promissora em território brasileiro, uma vez que altos índices de radiação solar são alcançados, até mesmo no inverno (estação menos propícia).

REFERÊNCIAS

AIRBREEZE. **Air Breeze**. Disponível em: < <http://www.ltipowersystems.com/products-windenergy-airbreeze.html>>. Acesso em 05 dez. 2013.

AUTODESK Sustainability Workshop. **Stack ventilation and Bernoulli's principle**. Disponível em: < <http://sustainabilityworkshop.autodesk.com/buildings/stack-ventilation-and-bernoullis-principle>>. Acesso em 01 dez. 2013.

BERNARDES, M. A. S. **Solar chimney power plants – developments and advancements**. 2010. Solar Energy, Radu D Rugescu (Ed.), ISBN: 978-953-307-052-0, InTech, DOI: 10.5772/8068. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/solar-energy/solar-chimney-power-plants-developments-and-advancements>>. Acesso em 01 dez. 2013.

CUNHA, G. R., BERGAMASCHI, H., BERLATO, M. A., MATZENAUER, R. **Balço de radiação em cultura de milho**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. 13p.html. 7 fig. (Embrapa Trigo. Boletim de Pesquisa Online, 4). Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/p_bo04.htm>. Acesso em 04 dez. 2013.

DHAHRI, A, OMRI, A. A review of solar chimney power generation technology. **International Journal of Engineering and Advanced Technology**. vol. 2, issue 3, 2013, p.1-17.

ECOFORCE. **Turbina eólica 600 watts 12V**. Disponível em: <<http://www.ecoforce.com.br/turbina-eolica-600>>. Acesso em 05 dez. 2013.

ENVIROMISSION. **Technology overview**. Disponível em: <http://www.enviromission.com.au/EVM/content/technology_technologyover.html>. Acesso em 01 dez. 2013.

FERREIRA, A. G., MAIA, C. B., VALLE, R. M., CORTEZ, M. F. B. **Balço energético de uma chaminé solar**. RECIEv.15 n. 1/2 p.37-43, jan – dez. 2006

HAAF, W., et al. Solar Chimneys – Part I: Principle and construction of the pilot plant in Manzanares, **International Journal of Solar Energy**, vol. 2, 1983, p.3-20.

HAAF, W. Solar Chimneys – Part II: Preliminary test results from the Manzanares pilot plant, **International Journal of Solar Energy**, vol. 2, 1984, p.141-161.

KOONSRISUK, A., CHITSOMBOON, T. A single dimensionless variable for solar chimney plant modeling. **Solar Energy**, vol. 83, 2009, p.2136-2143.

KOONSRISUK, A., LORENTE, S., BEJAN, A. Constructal solar chimney configuration. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 53, 2010, p.327-333.

MILLS, D. Advances in solar thermal electricity technology. **Solar Energy**, vol. 76, 2004, p.19-31.

NINIC, N. Available energy of the air in solar chimneys and the possibility of its ground-level concentration. **Solar Energy**, vol. 80, 2006, p.804-811.

PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., ABREU, S. L., RÜTHER, R., **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE, 2006. Disponível em: <http://www.ccst.inpe.br/wp-content/themes/ccst-2.0/pdf/atlas_solar-reduced.pdf>. Acesso em 01 dez. 2013.

SINDA Sistema integrado de dados ambientais. **Acesso ao banco de dados históricos de radiação solar**. Disponível em: <http://sinda.crn2.inpe.br/PCD/historico/consulta_radsol.jsp>. Acesso em 01 dez. 2013.

ZHOU, X., YANG, J., XIAO, B., HOU, G., XING, F. Analysis of chimney height for solar chimney power plant. **Applied Thermal Engineering**, vol. 29, 2009, p.178-185.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

DUFFIE, J. A, BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. Canada: John Wiley & Sons, Inc, 1987. 762p.

INCROPERA, F. P, DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferências de calor e massa**. 5ª edição. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2002. 698p.

PANSE, S. V., JADHAV, A.S., GUDEKAR, A.S., JOSHI, J.B. Inclined solar chimney for power production. **Energy Conversion and Management**, vol. 51, 2011, p.3096-3102.