



**ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Gustavo Adolfo Moysés Alvarez

***Estudo das Características de Chaminés Solares para
Geração de Energia Elétrica e Perspectivas de Seu Uso
no Território Brasileiro***

Monografia apresentada como forma de avaliação final do Curso de Especialização em energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética. Orientador Professor Dr. Cláudio Pacheco.

Junho

2014

- Agradecimentos

Agradeço a Deus nas alturas e a Virgem Mãe, nosso Amor, Jesus Cristo redentor e a todos seres divinos da corte celestial, em especial ao Mestre Raimundo Irineu Serra e ao Pad. Sebastião Mota de Melo.

Agradeço a meu pai, Victor Hugo, pelo seu exemplo como pesquisador e ser humano, pelo seu apoio e incentivo.

Agradeço a minha mãe, Zélia Moysés Alvarez, em memória, por todo seu Amor por mim e por sua dedicação a nós.

Agradeço o Prof. Dr. Cláudio Pacheco pela orientação precisa e dedicada e por suas aulas inspiradoras.

Agradeço a todos os professores da especialização ENERGIAS RENOVÁVEIS, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, do PECE, por toda dedicação e por todo conhecimento e experiências transmitidas.

Agradeço a todos meus colegas de curso pela amizade e apoio.

Lista de Figuras e Tabelas

Fig. 1.1 – Protótipo de Chaminé Solar construído em Manzanares, Espanha. [3].....	11
Fig. 1.2 – Coletor solar do protótipo de Manzanares, Espanha. [3].....	12
Fig. 1.3 – Turbina do protótipo de Manzanares. [3].....	12
Fig. 2.1 – Modelo físico da Chaminé Solar. [7].....	13
Fig. 2.2 – Modelo de transferência de calor no coletor de ar solar. [10].....	14
Fig. 2.3 – Balanço Energético no coletor de ar solar. [4].....	16
Fig. 2.4 – Sistema de armazenamento de energia com água em tubos. [3].....	17
Fig. 2.5 – Comparação entre o armazenamento de energia do solo e da utilização de tubos negros cheios com água. [3].....	17
Fig. 2.6 – Potência em função do raio do coletor, para uma chaminé solar de 194,6 m de altura (protótipo de Manzanares). [10].....	18
Fig. 2.7 – Ilustração da torre da chaminé solar, com anel de reforço. Fonte: EdRB.....	19
Fig. 2.8 – Potência em função da altura da torre, para uma chaminé solar de 122 m de raio de coletor (protótipo de Manzanares). [10].....	22
Fig. 2.9 – Esquema das turbinas em diferentes posições na Chaminé Solar. [5].....	23
Fig. 2.10 – Representações de turbinas enclausuradas e de turbinas livres. [2].....	23
Fig. 2.11 – Distribuição de custo numa unidade conversora de energia de 100 MW, ($\times 10^6$ €). [6].....	24
Fig. 2.12 - Influência do raio da cobertura na velocidade do ar no trajeto para o centro. [7].....	25
Fig. 2.13 – Influência do raio da cobertura na temperatura do ar ao longo da cobertura. [7].....	26
Fig. 2.14 – Temperatura sob a cobertura, num corte feito em $r/R_c = 0,15$. [7].....	26
Fig. 2.15 – Influência da altura da cobertura na velocidade do ar na cobertura. [7].....	27
Fig. 2.16 – Perfil de velocidade adimensional numa secção transversal a torre. [7].....	28
Tabela 4.1 - Valores da radiação solar diária, médias mensais , máximas, mínimas e anuais para algumas localidades no Brasil e no mundo. [11].....	30

Fig. 4.2 – Radiação solar global diária, média mensal, para o mês de maio. [11].....	31
Fig. 4.3 – Radiação solar global diária, média mensal, para o mês de novembro. [11].....	31
Fig. 4.4 – Radiação solar global diária, média anual. [11].....	32
Fig. 4.5 – Compartimentos de relevo do território brasileiro. IBGE, 2006.....	33
Fig. 4.6 – Biomas brasileiros. [IBGE].....	34
Tabela 5.1 – Possíveis configurações de Chaminé Solar, capazes de gerar 100 MW.....	35
Tabela 5.2 – Custos para a construção de uma Chaminé Solar de 100 MW, em duas configurações possíveis.....	35
Tabela 5.3 - Custos para a construção de uma Chaminé Solar, para diversas potências.....	36
Tabela 5.4 – Custo de Eletricidade Equalizado calculado para as duas configurações estudadas I e II.....	37
Fig. 5.5 – Custo de eletricidade equalizado para diferentes tecnologias de geração na Alemanha. [12].....	38
Fig. 5.6 - Preço médio de venda por fonte em leilões, entre 2004 e 2012.(Dados atualizados pelo IPCA de nov/2012). [CCEE].....	39
Fig. 5.7 – Evolução de preços de energia elétrica em Leilões.[13].....	40
Fig. 6.1 – Radiação solar global diária, média anual. [11].....	41

- Sumário

Agradecimentos.....	2
Lista de Figuras e Tabelas.....	3
Sumário.....	5
Resumo.....	7
Abstract.....	8
Objetivos.....	9
Justificativa.....	9
Metodologia.....	10
1 - Introdução.....	11
1.1 – Protótipo de Manzanares.....	12
2 - A Chaminé Solar - Equações que descrevem a troca de calor.....	13
2.1 - Coletor de Ar Solar.....	14
2.1.1- Balanço energético para o chão do coletor.....	14
2.1.2- Balanço energético para a cobertura.....	15
2.1.3- Balanço energético para o fluxo de ar no interior do coletor.....	15
2.1.4- Armazenamento de Energia.....	17
2.1.5- Influência do raio da cobertura na potência obtida na Chaminé solar.....	17
2.2 - Torre da Chaminé Solar.....	18
2.2.1- Modelo para a Força motriz da Chaminé Solar.....	19
2.2.2- Perdas de pressão ao longo da torre.....	20
2.2.3- Influência da altura da torre na potência obtida na Chaminé solar.....	21
2.3 - Turbina – Unidade Conversora de Energia.....	22
2.4 - Descrição Dinâmica da Chaminé.....	25
3 - Vantagens e desvantagens da Chaminé Solar.....	29

4 - Possíveis Locais para uma Usina Chaminé Solar no Brasil.....	30
4.1 - Recurso Solar no Brasil.....	30
4.2 - Relevo, biomas e uso do solo.....	32
5 - Viabilidade Econômica.....	35
5.1 - Custos de Construção.....	35
5.2 - Custo de Eletricidade Equalizado (LEC).....	36
5.3 - Chaminé solar no Brasil.....	38
6 - Resultados e Discussões.....	41
7 - Bibliografia.....	43

- Resumo

ALVAREZ, Gustavo Adolfo Moysés. Estudo das Características de Chaminés Solares para Geração de Energia Elétrica e Perspectivas de Seu Uso no Território Brasileiro.

Monografia (Especialização) - Programa de Educação Continuada para Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

Numa chaminé solar o ar que é aquecido sob uma cobertura de vidro, sobe pela torre da chaminé devido à diferença de temperatura e densidade entre o ar interno à chaminé e o ar ambiente, gerando uma força motriz que pode ser usada para gerar energia elétrica. No Brasil encontramos, no interior da região nordeste, condições propícias para implantação de uma usina chaminé solar. Região onde a Radiação solar global diária, média anual, atinge 22 MJ/m².d e encontramos terras planas com pouco uso alternativo.

Esta monografia faz um resumo das principais características construtivas e operacionais desta tecnologia. Procurou-se mostrar que ela está bem fundamentada do ponto de vista teórico. Chaminés Solares são conhecidas desde o início do século XX e mais recentemente um protótipo de 50 kW foi instalado em Manzanares na Espanha, sendo base para confirmação da teoria desenvolvida. Instalações de maior porte com cerca de 200 MW estão em fase final de planejamento.

Esta monografia realizou estudos de viabilidade econômica para um projeto no Brasil de 100 e de 200 MW a partir de valores com base na literatura. Chegou-se a um custo de eletricidade equalizado da ordem de 177 R\$/MWh compatível com outras formas de energia alternativas e convencionais além de ser esta tecnologia muito atraente pela sua robustez e dispensar o uso de água para sua operação.

Com ela pretende-se contribuir para o esforço nacional de utilização de energias renováveis.

Palavras chave: Chaminé solar, Geração de energia elétrica, Brasil, Energia solar.

- Abstract

ALVAREZ, Gustavo Adolfo Moyses. Study of Characteristics of Solar Chimney for Power Generation and Prospects of Its Use in the Brazilian territory. Monograph (Specialisation) - Continuing Education Program for Polytechnic School, University of São Paulo, São Paulo, 2014.

In a solar chimney, the air which is heated under a glass cover, rises the tower, from the chimney, due to the difference in temperature and density of the air inside the chimney and ambient air, creating a driving force that can be used to generate electricity. In Brazil found within the northeast region, favorable conditions for development of a solar chimney power plant. This region where the daily global solar radiation, annual average reaches $22 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}$ and can be found flat land with little alternative use.

This monograph summarizes the main constructive and operational characteristics of this technology. We tried to show that it is well stated in the theoretical point of view. Solar chimneys are known since the early twentieth century and more recently a prototype of 50 kW was installed in Manzanares, Spain, being the basis for confirmation of the theory developed. Large facilities, with 200 MW are in the final planning stages.

This monograph conducted feasibility studies for a project in Brazil of 100 and 200 MW from values based on the literature. It has come up at a levelised electricity cost of 177 R\$/MWh compatible with other forms of alternative and conventional energy, as well this is a very attractive technology due to its robustness and dispense the use of water for its operation.

It aims to contribute to the national effort to use renewable energy.

Keywords: Solar chimney, power generation, Brazil, Solar energy.

- Objetivos

O objetivo deste trabalho é investigar as principais características construtivas e operacionais de chaminés solares e seu uso na geração de energia elétrica.

Apresentar as equações que descrevem os princípios de funcionamento de partes de uma chaminé solar: Coletor de ar solar e torre da chaminé.

Estudar, com base na literatura, os custos de construção e custo de eletricidade equalizado, para usinas chaminés solares de 100 e 200 MW e, sua viabilidade econômica comparada com outras tecnologias, que usam fontes renováveis de energia, no Brasil.

Apresentar o recurso solar disponível no Brasil.

Identificar, no território brasileiro, regiões propícias para a instalação de usinas chaminés solares.

- Justificativa

No Brasil temos regiões com abundante recurso solar, energia que pode ser aproveitada na geração de energia elétrica. A chaminé solar se apresenta como uma alternativa para a produção de energia a partir da radiação solar.

Características como robustez e pouco uso de água na sua operação, fazem da chaminé solar uma possível alternativa para contribuir para o esforço nacional de utilização de energias renováveis.

- Metodologia

A elaboração deste estudo sobre chaminé solar, seu uso na geração de eletricidade e as perspectivas de sua implantação no Brasil, consiste:

- fazer um resumo das principais características construtivas e operacionais desta tecnologia.
- Apresentar as equações que descrevem as trocas de calor e o escoamento de ar através da chaminé solar.
- Analisar o recurso solar no território brasileiro e identificar regiões de maior incidência de irradiação solar integrada diária.
- Estudar os biomas, a vegetação, o uso do solo do território brasileiro, com objetivo de identificar regiões propícias à instalação de chaminés solares.
- Estudar, na literatura, os custos de construção e de produção de eletricidade numa chaminé solar.

1 - Introdução

Sobre a atmosfera da Terra chegam 1353 W/m^2 vindos do Sol, fundamentais para a existência de vida neste planeta. Energia inesgotável e gratuita para os padrões humanos.

Da energia irradiada sobre a Terra só conseguimos aproveitar parte dela, dependendo de:

- Latitude;
- Época do ano (Duração da insolação, declinação solar,);
- Questões atmosféricas (Absorção e reflexão pela atmosfera e pelas nuvens);
- Eficiência de nossas máquinas na conversão desta energia.

Para converter esta energia vinda do Sol em energia elétrica podemos fazê-lo diretamente pelo fenômeno fotovoltaico ou podemos utilizar esta energia na forma de calor e aproveitá-la através de um fluido térmico, para o acionamento de turbinas a vapor.

Na natureza observamos este calor vindo do Sol ser absorvido na atmosfera e na superfície do planeta, e ser convertido em energia mecânica nos ventos e correntes marítimas.

A ideia de utilizar a energia do Sol para movimentar o ar e aproveitar a energia cinética deste não é nova. Já no começo do século XX, na Espanha se construíram motores solares, aproveitando o ar ascendente, numa chaminé eólico-solar, que passando forçosamente por pás transmitia movimento para um eixo central, gerando força motriz.



Fig. 1.1 – Protótipo de Chaminé Solar construído em Manzanares, Espanha. [3]

1.1 – Protótipo de Manzanares

Mais recentemente, de 1983 a 1989, também na Espanha, em Manzanares se construiu uma planta piloto de uma chaminé solar para geração de energia elétrica, fig. 1.1, cuja chaminé tinha altura de 194,6 m, com diâmetro de 10,2 m. Sua superfície coletora de vidro, e filme plástico, tinha um raio médio de 122m e área de 46 000 m², Fig. 1.2, a qual criava um aumento de 17 a 20 K na temperatura do ar, gerando um deslocamento de ar com velocidade de 12 m/s.



Fig. 1.2 – Coletor solar do protótipo de Manzanares, Espanha. [3]

Em Manzanares, foi utilizada uma turbina Siemens com quatro pás, colocada a 9 m do solo com seu eixo vertical, fig. 1.3. Durante os 32 meses que trabalhou regularmente, a central funcionou em média 8,9 h/d, gerando uma potência de 50 kW, um valor muito baixo para produção comercial. Esta planta piloto funcionou como um centro experimental para verificar se a teoria desenvolvida era funcional em condições reais de engenharia e meteorologia.



Fig. 1.3 – Turbina do protótipo de Manzanares. [3]

2 - A Chaminé Solar – Equações que descrevem a troca de calor

As chaminés solares são dispositivos desenvolvidos para geração eólica de energia elétrica. Estes dispositivos podem ser divididos em três grandes elementos: O coletor de ar solar, a torre e as turbinas. Na figura 2.1. é apresentado um modelo físico de uma chaminé solar, onde temos um coletor solar de raio R_c , cuja borda externa tem altura H_{c2} . A altura da cobertura do coletor aumenta até H_{c1} , permanecendo constante até a transição com a torre da chaminé. Neste modelo a torre da chaminé tem altura H_t , e raio constante R_t .

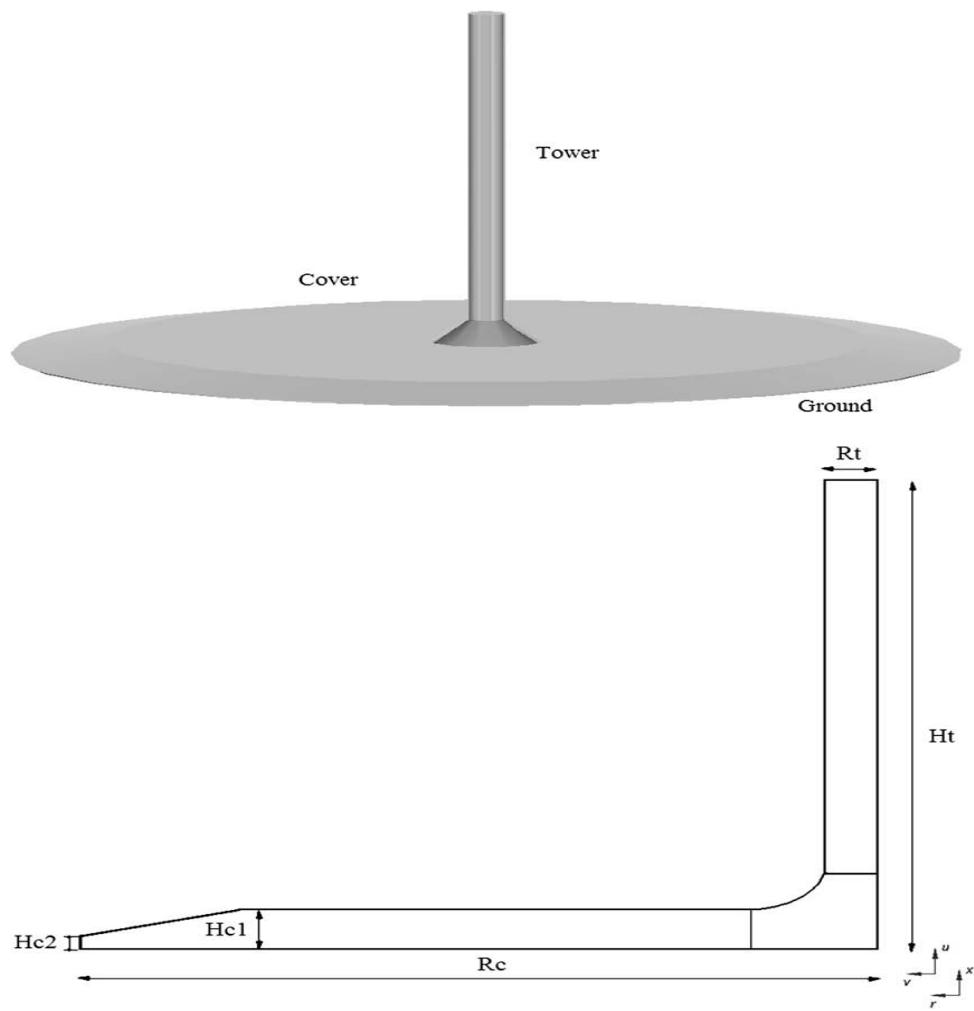


Fig.2.1 – Modelo físico da Chaminé Solar. [7]



2.1 - Coletor de Ar Solar

O coletor de ar solar é uma cobertura de vidro ou polímero transparente colocado a alguns metros do solo, sustentado por estruturas de aço. Funciona como uma estufa, que transmite a radiação solar e reflete as radiações de onda longa emitidas pelo solo, aquecendo o ar no seu interior.

Na fig. 2.2 apresentamos um modelo para transferência de calor, proposto por Li, Guo e Wang (2012) [10], que ocorre no coletor de ar solar, no qual a cobertura de vidro recebe a irradiação do sol e transmite parte para o chão. A cobertura do coletor, troca calor por convecção com o ar externo e com o fluxo de ar interno e irradia para o céu. O chão do coletor absorve a irradiação solar transmitida pela cobertura, irradia ondas de maior comprimento de onda para a cobertura e ainda transmite calor por condução para o solo e por convecção para o fluxo de ar.

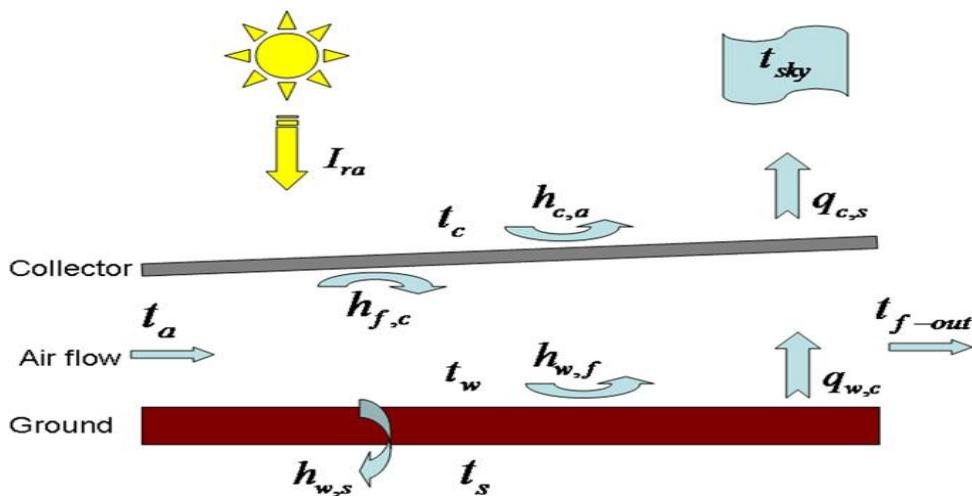


Fig. 2.2 – Modelo de transferência de calor no coletor de ar solar. [10]

Este modelo pode ser interpretado por equações de conservação de energia e massa.

2.1.1- Balanço energético para o chão do coletor

Nesta seção é apresentado o balanço energético para o chão do coletor solar, baseado na fig. 2.2.

$$q_{w,c} + h_{w,s} (t_w - t_s) + h_{w,f} (t_w - t_f) = I_{ra} \times (\tau\alpha) \quad (1)$$

onde:

t_w – temperatura do chão do coletor;

t_s – temperatura do solo;

t_f – temperatura do fluxo de ar;

$h_{w,s}$ – coeficiente de condução do solo;

$h_{w,f}$ – coeficiente de convecção do chão para o fluxo de ar;

$q_{w,c}$ – calor irradiado do chão para a cobertura;

I_{ra} – Radiação solar incidente;

τ - fração do fluxo de energia incidente que é transmitida pela cobertura;

α - fração do fluxo de energia incidente que é absorvido pelo chão do coletor.

2.1.2- Balanço energético para a cobertura

Nesta seção é apresentado o balanço energético para a cobertura de vidro do coletor solar, baseado na fig. 2.2.

$$\alpha_{w,c} q_{w,c} + h_{f,c} (t_f - t_c) = h_{c,a} (t_c - t_a) + q_{c,s} \quad (2)$$

onde:

$\alpha_{w,c}$ - Absortividade da cobertura na faixa de onda longa;

t_c – temperatura da cobertura do coletor;

t_a – temperatura ambiente externa a cobertura;

$h_{f,c}$ - coeficiente de convecção da cobertura para o fluxo de ar interno;

$h_{c,a}$ - coeficiente de convecção da cobertura para o ambiente externo a cobertura;

$q_{c,s}$ – calor irradiado da cobertura para o céu.

2.1.3- Balanço energético para o fluxo de ar no interior do coletor

Nesta seção é apresentado o balance energético para o ar que flui sob a cobertura do coletor solar, baseado na fig. 2.2.

$$h_{w,f} (t_w - t_f) - h_{f,c} (t_f - t_c) = \frac{\dot{m} c_p}{2\pi r} \frac{dt_f}{dr} \quad (3)$$

\dot{m} - Fluxo mássico de ar;

C_p – calor específico do ar.

Substituindo as duas primeiras equações na terceira obtemos uma equação diferencial para a variação da temperatura do fluxo de ar com relação ao raio do coletor:

$$\frac{dt_f}{dr} = \frac{2\pi r}{mc_p} \left[h_{w,f} \left(\frac{(I_{ra} - q_{w,c}) + h_{w,s}(t_s - t_f)}{h_{w,f} + h_{w,s}} \right) - h_{f,c} \left(\frac{h_{c,a}(t_f - t_a) - (q_{w,c} - q_{c,s})}{h_{c,a} + h_{f,c}} \right) \right] \quad (4)$$

Resolvida por métodos numéricos como de Runge-Kutta [10], apresentada na forma de gráfico na fig. 2.13, e assim podemos determinar a temperatura do fluxo de ar na junção do coletor com a torre, dado determinante na criação de diferença de pressão na chaminé solar.

Dados experimentais colhidos por Ferreira, A.G., et alli. [4], num protótipo de coletor de ar solar cuja cobertura tinha 25 m de diâmetro e a torre com uma altura de 12,3 m e o diâmetro de 1,0 m e no qual se utilizou filmes plásticos mostram que somente uma pequena parte da energia incidente no coletor é aproveitada pelo fluxo de ar como vemos na fig. 2.3:

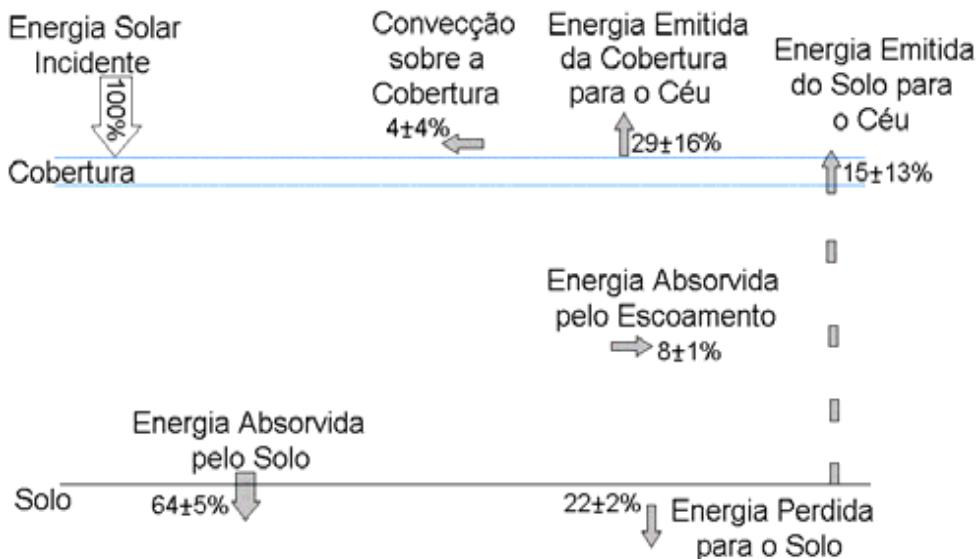


Fig. 2.3 – Balanço Energético no coletor de ar solar. [4]

Da radiação incidente, $64\pm 5\%$ é absorvida pelo solo. Desta quantidade absorvida, um terço é perdido para o solo ($22\pm 2\%$ da radiação incidente), parte é emitida do solo para o céu ($15\pm 13\%$ da radiação incidente). Somente parte da energia emitida pelo solo e pela cobertura é aproveitada pelo fluxo de ar ($8\pm 1\%$ da radiação incidente). [4]

O valor de 8 % de energia absorvida pelo escoamento pode ser aumentado com o uso de vidro na cobertura, pois este transmite muita pouca radiação de ondas longas e a utilização de matérias isolantes no chão diminuiria a condução para o solo.

2.1.4- Armazenamento de Energia

Uma forma de se armazenar energia durante o dia é utilizar tubos negros preenchidos com água ao longo do coletor, que durante o dia absorvem parte da radiação incidente, como apresentado na fig. 2.4.

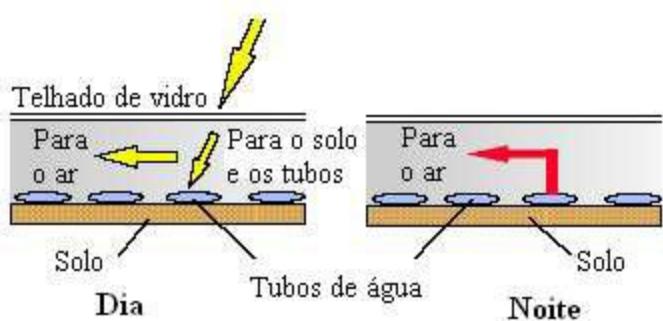


Fig. 2.4 – sistema de armazenamento de energia com água em tubos. [3]

Assim podemos aproveitar esta energia armazenada a noite, que é liberada lentamente devido ao alto calor específico da água, permitindo que a chaminé solar produza energia elétrica mesmo sem a incidência da energia do Sol, como mostra a fig. 2.5 Schlaich, Bergermann, Schiel e Weinrebe (2005) [3].

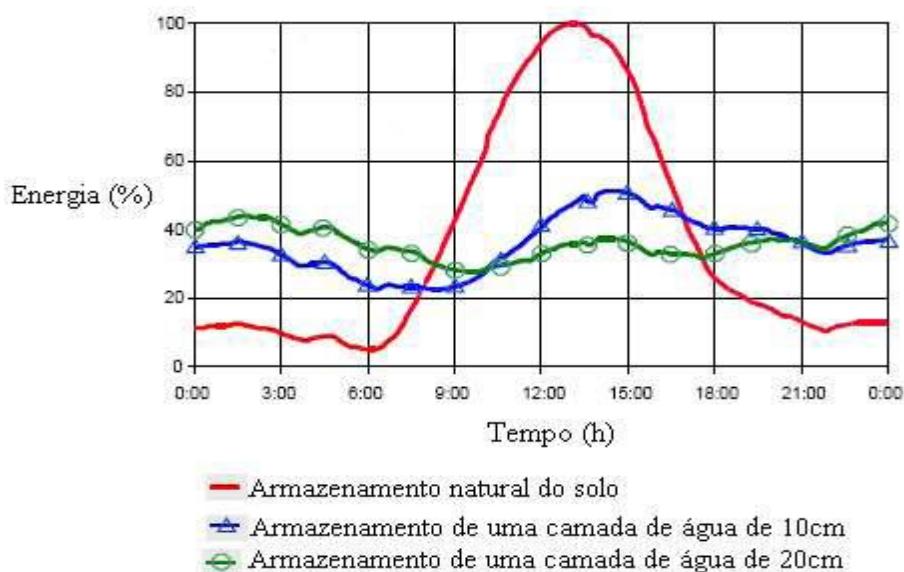


Fig. 2.5 – comparação entre o armazenamento de energia do solo e da utilização de tubos negros cheios com água. [3]

2.1.5- Influência do raio da cobertura na potência obtida na Chaminé solar

Sem as turbinas, a potência disponível na chaminé solar é proporcional ao quadrado do raio do coletor. Seria esperado, então, que a potência aumentasse rapidamente com o

aumento do raio, porém quando são levadas em conta as perdas no fluxo de ar não é isto que se verifica.

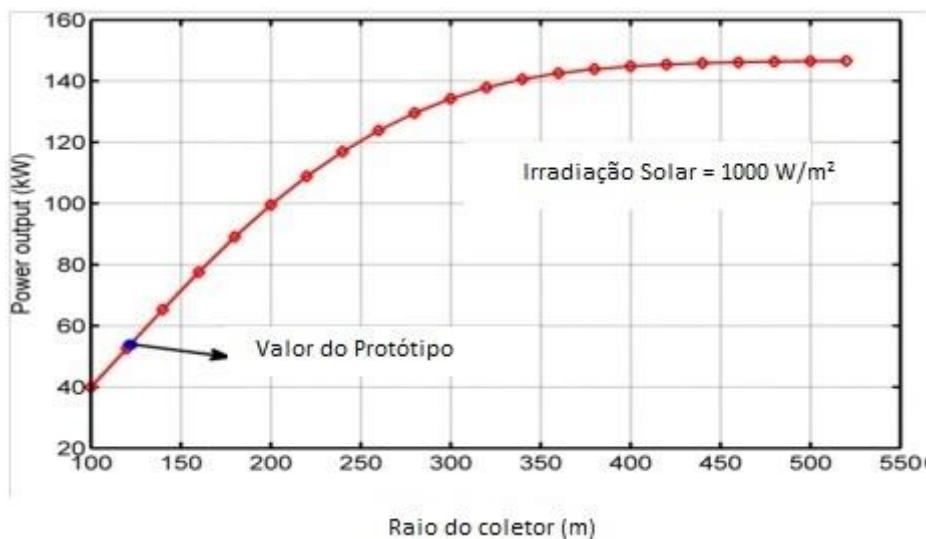


Fig. 2.6 – Potência em função do raio do coletor, para uma chaminé solar de 194,6 m de altura (protótipo de Manzanares). [10]

Na fig. 2.6, observamos que para as condições do protótipo de Manzanares, a potência obtida aumenta, com o aumento do raio do coletor até um raio de 350 m e a partir deste raio o aumento na potência começa diminuir até ficar praticamente constante para raios maiores que 380 m. Portanto o raio de 380 m seria o valor máximo para a cobertura do projeto de Manzanares.

A existência de um limite para o raio do coletor da cobertura, acima do qual não se obtém mais quase incremento de potência, pode ser explicado pelo aumento nas perdas de calor no coletor, que impõe um limite a temperatura do fluxo de ar no coletor. [10]

2.2 - Torre da Chaminé Solar

A torre da chaminé é o próprio mecanismo térmico do dispositivo. É um tubo de pressão com baixa fricção, como o tubo de pressão de uma central hidroelétrica. Numa chaminé solar de grandes dimensões (200 MW), o coletor pode aumentar a temperatura do ar em 30 a 35 K, criando uma corrente ascendente na torre com uma velocidade de cerca de 15 m/s (54 km/h).

Para a construção de uma usina de 200 MW tem-se de construir uma torre de até 1000 m de altura e 110 m de diâmetro, com o uso de concreto armado. A espessura na base proposta seria de 0,99 m e diminuiria linearmente até uma espessura de 0,3 m, numa altura de 550 m. A partir dessa altura a espessura permaneceria constante. Para reforço da

torre é proposto a colocação de anéis de reforço, composto de feixe de cabos de aço radiais na secção transversal da torre como vemos na fig. 2.7.



Fig. 2.7 – Ilustração da torre da chaminé solar, com anel de reforço. Fonte: EdRB

2.2.1- Modelo para a Força motriz da Chaminé Solar [10]

O ar aquecido pelo Sol, no interior da torre é mais leve que o ar ambiente, o que resulta numa pressão mais baixa no interior da torre do que no exterior. A diferença de pressão, Δp , existente entre a base da torre e o ambiente externo é que define a força motriz que impulsiona o ar através da torre.

$$\Delta p = g \int_0^H [\rho_\infty(z) - \rho_{in}(z)] dz \quad (5)$$

Onde:

$\rho_\infty(z)$ – densidade do ar exterior a uma altura z ;

$\rho_{in}(z)$ – densidade do ar dentro da torre a uma altura z ;

A densidade do ar na faixa de temperatura de 300 a 350 K pode ser calculada pela equação (6), aonde ρ é medida em kg/m^3 e t em K [10]:

$$\rho = 1,1614 - 0,00353 (t - 300) \quad (6)$$

temos:

$$\Delta p = 0,00353 g \int_0^H [t_{in}(z) - t_\infty(z)] dz \quad (7)$$

Em que $t_{\infty}(z)$ é a temperatura externa, numa altura z , e pode ser determinada por:

$$t_{\infty}(z) = t_a - 0,00649 z \quad (8)$$

Já $t_{in}(z)$, a temperatura do ar no interior da torre, a uma altura z , pode ser obtida levando em consideração a transferência de calor do interior para o exterior na torre [10]:

$$-c_p \dot{m} dt_{in}(z) = h_{f,a} [t_{in}(z) - t_{\infty}(z)] \pi D dz + \dot{m} g dz \quad (9)$$

Onde:

$h_{f,a}$ – coeficiente de transferência de calor da torre para a atmosfera;

D – diâmetro da torre;

Equação diferencial resolvida por métodos numéricos como de Runge-Kutta, conhecendo-se a temperatura na base da torre, $t_{in}(0)$. [10]

Desta força motriz Δp criada no interior da torre somente parte pode ser aproveitada para mover a turbina e gerar energia elétrica devido a perdas ao longo da torre.

2.2.2- Perdas de pressão ao longo da torre

a) Perda na transição da cobertura para a torre

Na transição da cobertura para a torre temos a estrutura que suporta a torre e serve de guia para o fluxo de ar encontrar a turbina. Esta perda pode ser calculada por [10]:

$$\Delta p_{tran} = \zeta_{tran} \frac{\rho}{2} v^2 \quad (10)$$

Onde ζ_{tran} é o coeficiente de perda de pressão cujo valor sugerido em [10] é 0,0558.

b) Perda por atrito na torre

A perda de pressão devido ao atrito no interior da torre pode ser calculado por:

$$\Delta p_f = f \frac{l}{D} \frac{\rho}{2} v^2 \quad (11)$$

Onde:

l - altura da torre;

f , o fator de atrito com a parede é calculado usando a fórmula de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left(\frac{\Delta/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (12)$$

Onde:

Δ - rugosidade da parede da torre;

c) Perda nos anéis de reforço da torre

Ao passar pelos cabos de aço dos anéis de reforço, o fluxo de ar sofre uma perda de pressão que pode ser calculada por [10]:

$$\Delta p_{ca} = \zeta_{ca} \frac{\rho}{2} v^2 \cdot n_{ca} \quad (13)$$

Onde:

ζ_{ca} - o coeficiente de perda de pressão num único anel de reforço;

n_{ca} - número de anéis de reforço na torre;

ζ_{ca} proposto em [10] é 0,0897.

d) Perda de energia cinética na saída da torre

As partículas de ar que atravessam uma secção transversal da torre apresentam diferentes velocidades. Então é usado um fator de correção para a energia cinética, ζ_{out} , para obtermos o real valor da energia cinética na saída da torre. Esta perda é calculada por [10]:

$$\Delta p_{out} = \zeta_{out} \frac{\rho}{2} v^2 \quad (14)$$

Para um regime de escoamento turbulento é adotado [10] um valor $\zeta_{out} = 1,058$.

2.2.3- Influência da altura da torre na potência obtida na Chaminé Solar

As equações anteriores serviram de base para os resultados teórico-experimentais descritos a seguir.

Sem as turbinas, a potência disponível na chaminé solar é, teoricamente, diretamente proporcional à altura da torre. Isto, porém não se verifica na prática, pois a temperatura do ar dentro da torre diminui mais rapidamente que fora da torre e há varias perdas de energia na torre como por atrito com as paredes e o contato com os anéis de reforço. Perdas estas que aumentam com o aumento da altura da torre. Portanto a efetiva força

motriz produzida na torre se enfraquece com o aumento da altura da torre, como apresentado na fig. 2.8.

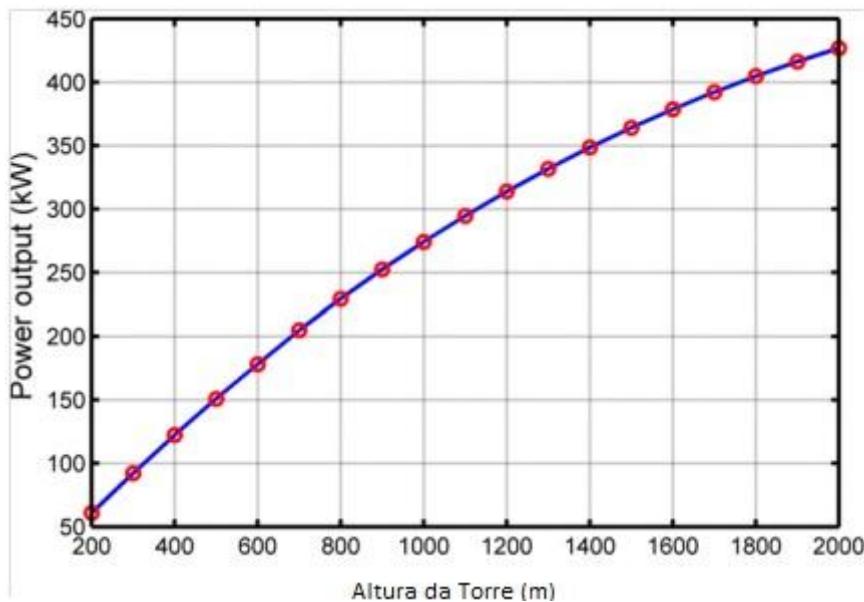


Fig. 2.8 – Potência em função da altura da torre, para uma chaminé solar de 122 m de raio de coletor (protótipo de Manzanares). [10]

Na fig.2.8 observamos que há uma desaceleração no aumento da potência, o que nos leva a concluir que deve existir um valor máximo para a potência que pode ser obtida, dado certo coletor. Porém esta potência máxima ocorreria numa altura muito além dos padrões construtivos, muito acima de 2 000 m. Portanto podemos considerar que a potência aumenta com o aumento da altura da torre.

2.3 - Turbina – Unidade Conversora de Energia

As turbinas, instaladas próximo à transição da cobertura para a torre, são responsáveis por transformar a energia mecânica no fluxo de ar em energia rotativa, que será usada pelos geradores para transformá-la em energia elétrica.

Para chaminés solares de menor porte, como a usina de Manzanares, a melhor opção é posicionar uma única turbina vertical na base da torre, fig. 2.9/a. Já no caso de grandes chaminés solares, com potência de 200 MW, o torque sobre uma única turbina seria muito grande, e a melhor opção é se utilizar várias turbinas horizontais num padrão circular, fig. 2.9/c. Outra opção é dispor várias turbinas verticais, na base da torre, fig 2.9/b.

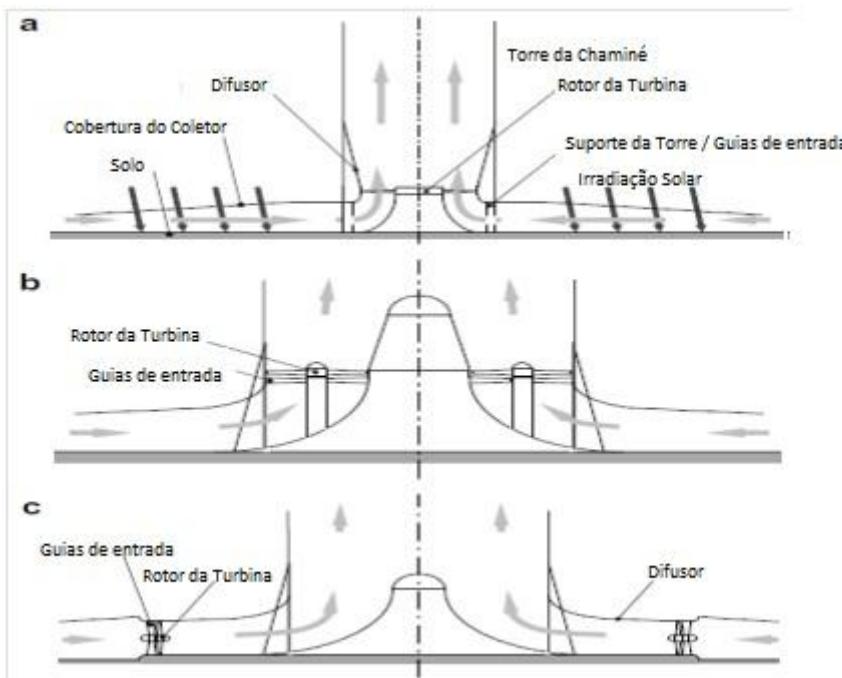


Fig. 2.9 – Esquema das turbinas em diferentes posições na Chaminé Solar. [5]

As turbinas numa chaminé solar não funcionam por diferença de velocidade como as turbinas de geradores eólicos, turbinas livres, mas sim por diferença de pressão, como nas turbinas em usinas hidroelétricas, já que são turbinas enclausuradas, em que a pressão estática é convertida em energia rotativa, como esquematizado na Fig.2.10. [2]

As turbinas enclausuradas funcionam de forma eficiente numa grande gama de velocidades de fluxo do ar, já que quando a velocidade do fluxo aumenta o ângulo de inclinação das pás da turbina podem ser ajustados.

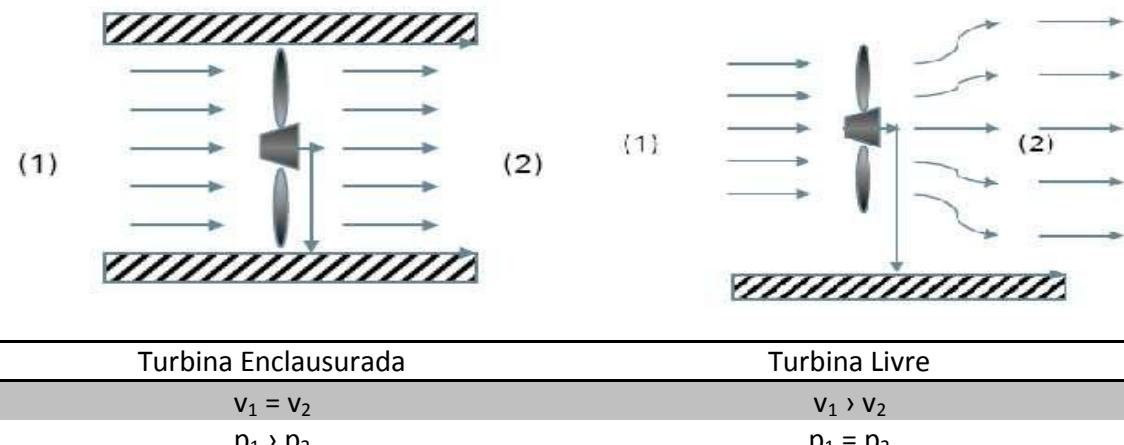


Fig. 2.10 – Representações de turbinas enclausuradas e de turbinas livres. [2]

O grande volume de ar contido no coletor e na torre funciona como um buffer, impedindo grandes flutuações na velocidade do fluxo de ar. Isto aliado ao fato das turbinas funcionarem num ambiente fechado, protegidos do sol e da chuva, fazem o funcionamento destas turbinas mais confiáveis.

Já que as turbinas e os geradores são praticamente as únicas partes móveis da chaminé solar, a manutenção necessária é menor, quando comparada com outras usinas geradoras de eletricidade.

A potência obtida, P , na turbina é proporcional à vazão volumétrica ar, por unidade de tempo, Q_v , e proporcional à diferença de pressão da turbina, Δp_t :

$$P = \eta_t \times \Delta p_t \times Q_v \quad (15)$$

Onde η_t representa a eficiência da transformação em energia elétrica, da energia contida no fluxo de ar em escoamento pela torre e seu valor está próximo de 0,8. [5]

A força motriz que a turbina consegue aproveitar, a diferença de pressão na turbina, Δp_t , é a força criada na torre Δp , descontadas as perdas:

$$\Delta p_t = \Delta p - \Delta p_{tran} - \Delta p_f - \Delta p_{ca} - \Delta p_{out} \quad (16)$$

As turbinas são somente uma parte da unidade conversora de energia, e representam uma parte menor nos custos desta (10,5 %) [6]. Além das turbinas e geradores, existem outros custos, cujos valores são apresentados na Fig.2.11, que incluem custos com fundações, transporte, estradas e obras civis, para sua montagem e instalação, interfaces elétricas, licenças e engenharia, chamados balance of station (56,7 %) .

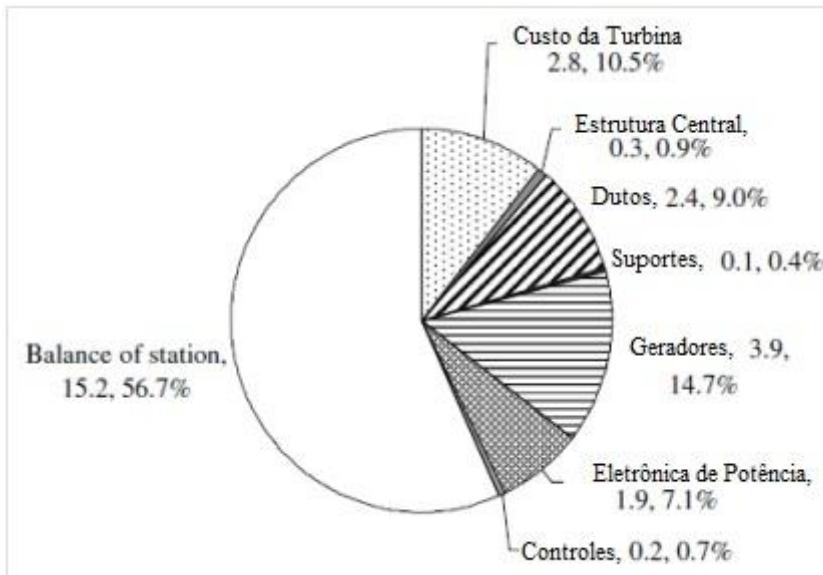


Fig. 2.11 – Distribuição de custo numa unidade conversora de energia de 100 MW, ($\times 10^6$ €). [6]

2.4 - Descrição Dinâmica da Chaminé

O ar entra na chaminé solar pela borda externa, que tem uma altura H_{C2} (Fig. 2.1) a temperatura ambiente. Então começa a ser aquecido, sob a cobertura de vidro, tanto pela irradiação direta como por irradiação difusa, que aquece o solo. O ar que se movimenta para o centro da cobertura, onde se encontra a torre chaminé, recebe esta energia por convecção da cobertura e por convecção, vinda do solo aquecido pelo sol.

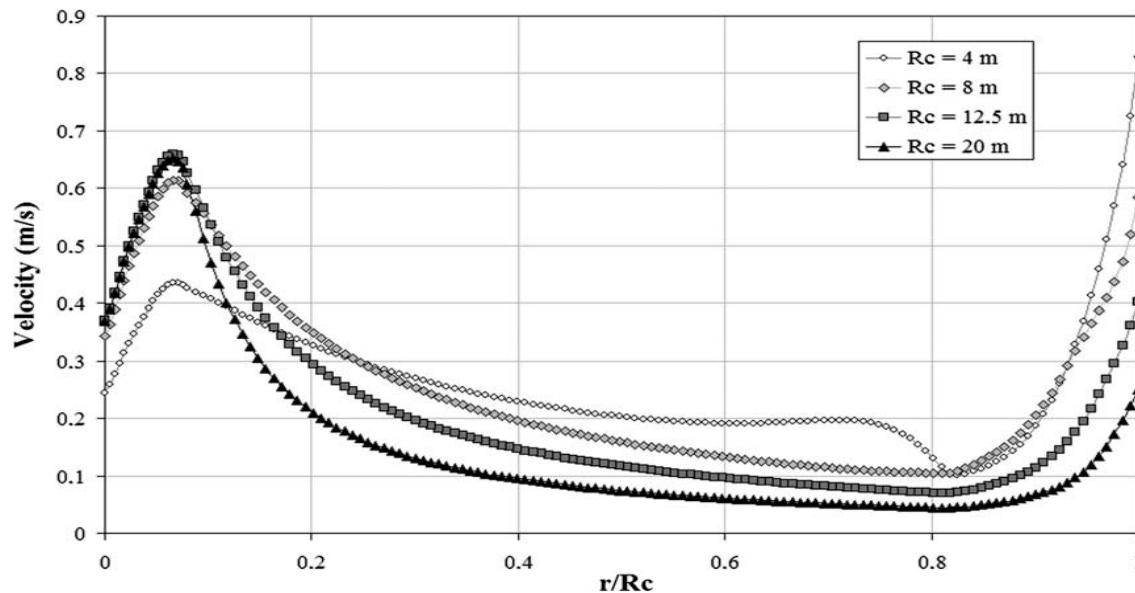


Fig. 2.12 - Influência do raio da cobertura na velocidade do ar no trajeto para o centro. [7]

No gráfico fig. 2.12 observamos que ao entrar sob a cobertura o ar diminui sua velocidade, devido ao aumento da secção transversal, quando a altura da cobertura sobe de H_{C2} para H_{C1} . Quando esta atinge sua altura máxima, a secção transversal começa a diminuir devido à redução do raio da cobertura, acarretando num aumento na velocidade do ar.

Por sua vez a temperatura deste fluxo de ar aumenta indo na direção do centro da cobertura, devido a troca de calor com o solo. A partir de certo valor do tamanho do raio da cobertura, a temperatura do ar atinge um valor máximo para então, diminuir ligeiramente devido ao aumento da velocidade deste fluxo, como vemos na fig. 2.13.

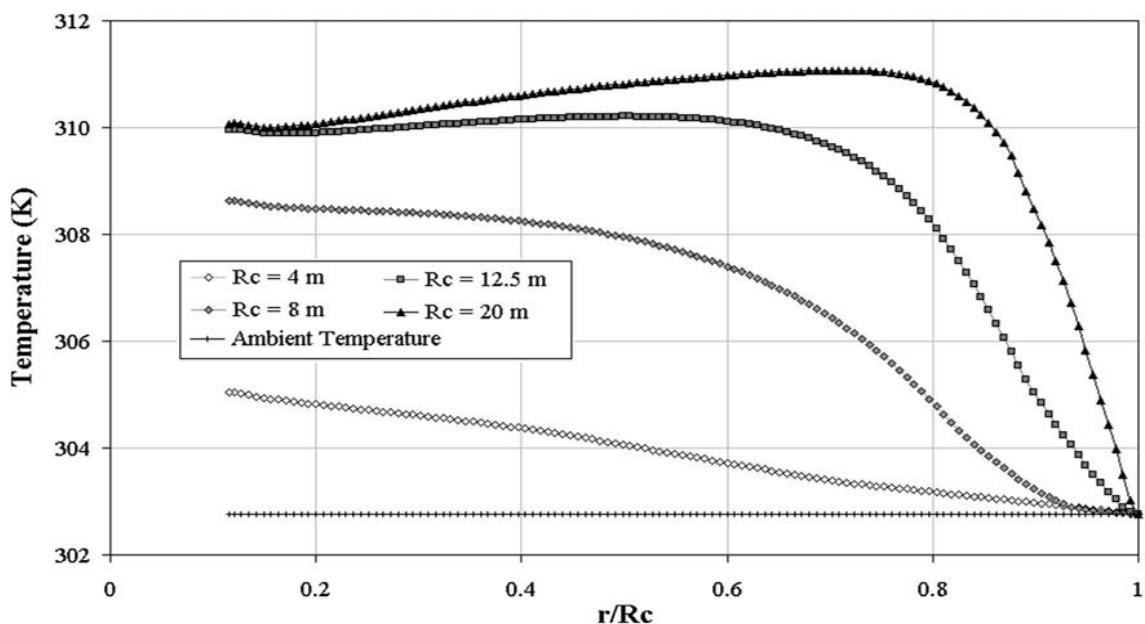


Fig. 2.13 – Influência do raio da cobertura na temperatura do ar ao longo da cobertura. [7]

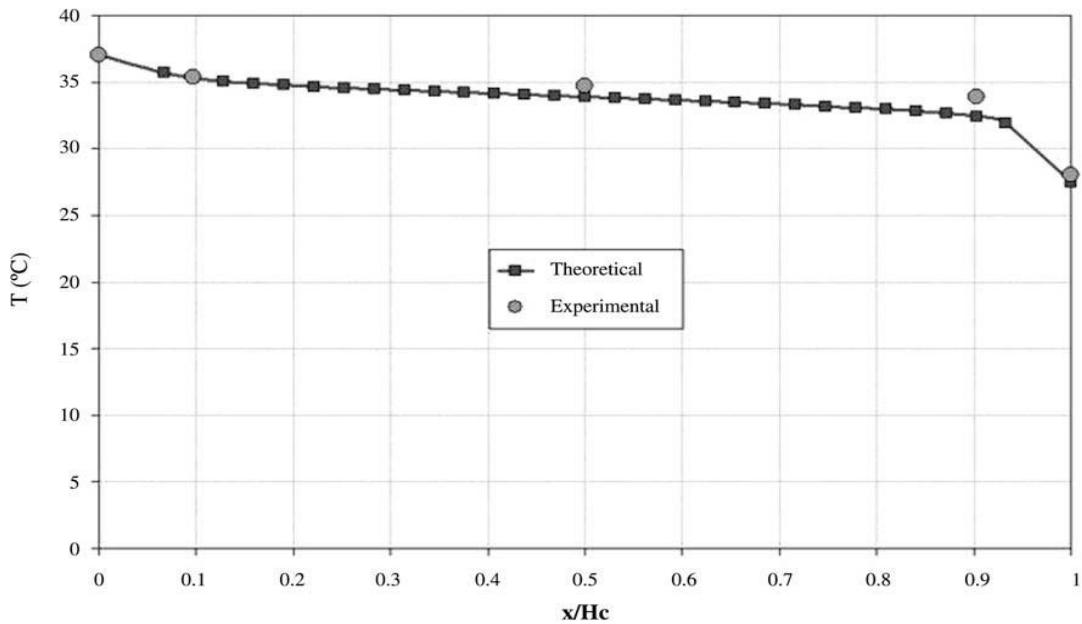


Fig. 2.14 – Temperatura sob a cobertura, num corte feito em $r/R_c = 0,15$. [7]

Se observarmos uma superfície perpendicular ao fluxo de ar, dentro da cobertura, a temperatura varia com a altura, diminuindo seu valor próximo da cobertura, como apresentado na fig. 2.14. Já a velocidade deste ar atinge um valor máximo próximo a meia altura, reduzindo seu valor, tanto próximo ao solo, como próximo da cobertura, fig. 2.15.

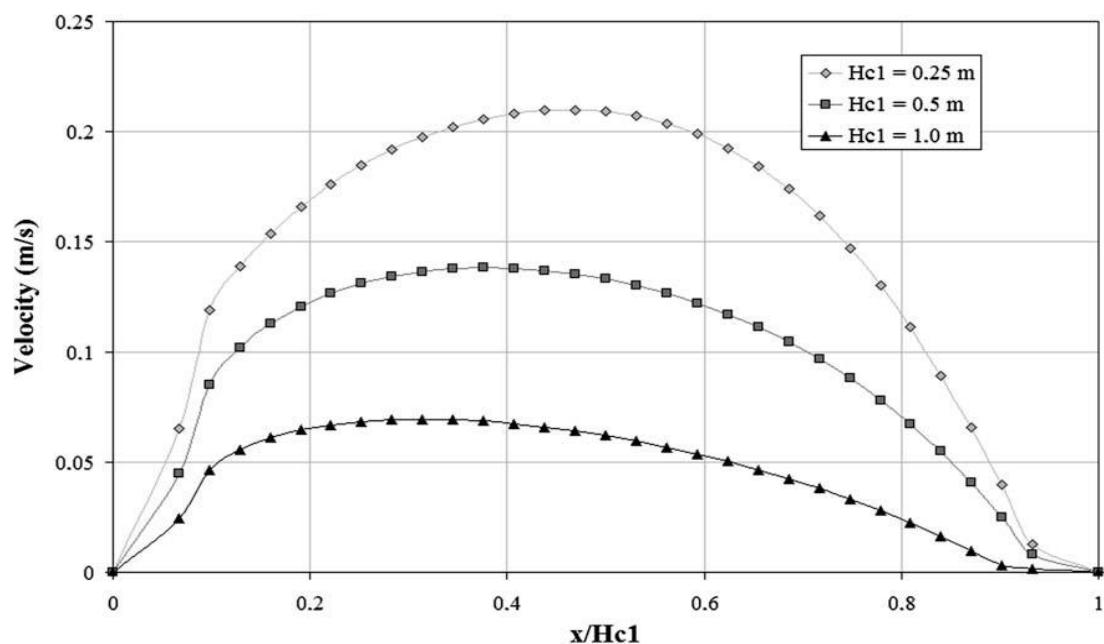


Fig. 2.15 – Influência da altura da cobertura na velocidade do ar na cobertura. [7]

Quando o fluxo de chega a junção da cobertura com a torre da chaminé, a velocidade atinge seu valor máximo (Fig. 2.12). Ao chegar sob a torre a área de escoamento aumenta e a velocidade do ar diminui.

Dentro da torre devido a uma força de empuxo criada pela diferença de temperatura e densidade do ar existente, entre a base da torre e sua saída superior, o ar sobe carregando energia cinética, que será aproveitada pela turbina.

Quando observamos o perfil de velocidade do ar, num plano perpendicular ao fluxo na torre (Fig. 2.16), vemos que velocidade é máxima no eixo de simetria da torre e diminui ao aproximarmos da parede da torre. Já o perfil de temperatura praticamente não varia, numa secção transversal a torre.

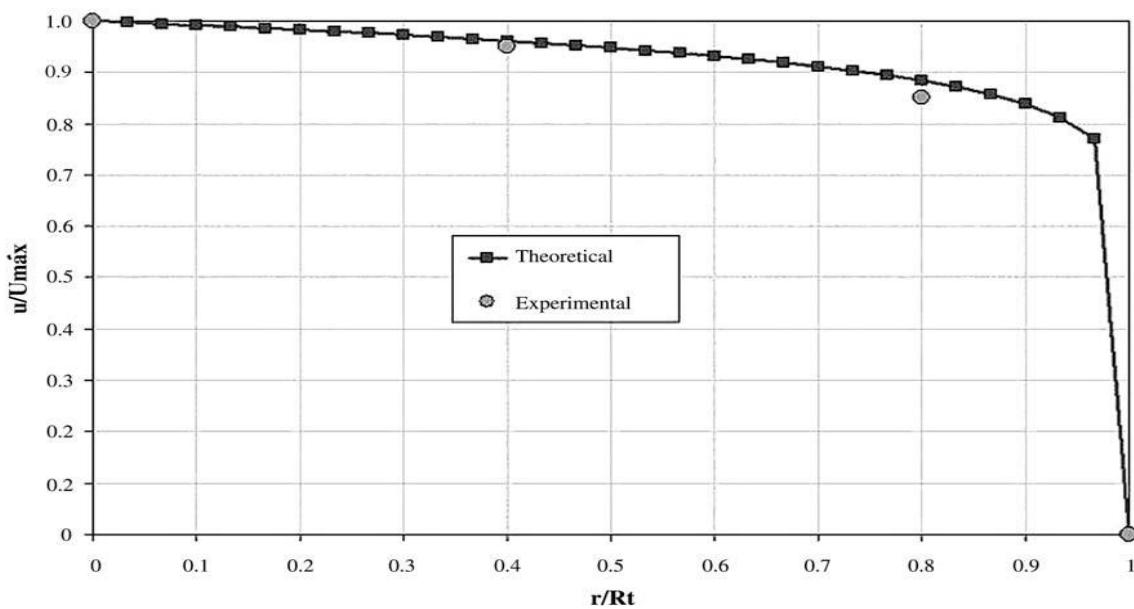


Fig. 2.16 – Perfil de velocidade adimensional numa secção transversal a torre. [7]

Como se pode observar do anteriormente exposto, a descrição do comportamento dinâmico de uma chaminé solar está bem estabelecido em termos teóricos e experimentais, o que explica o interesse em projetos comerciais para sua implementação em vários locais.

3 - Vantagens e desvantagens da Chaminé Solar

Uma chaminé solar por construção é uma empreendimento com impactos ecológicos positivos, ao usar o Sol como fonte de energia.

Podemos também salientar outras características positivas inerentes a este tipo de projeto:

- + O coletor solar aproveita tanto a radiação solar direta, como a indireta, possibilitando seu funcionamento em dias nublados;
- + A chaminé solar apresenta uma grande inércia e estabilidade termodinâmica durante seu funcionamento;
- + Pode funcionar à noite, com o uso de reservatórios de calor, tubos negros com água, e pela diminuição da temperatura exterior a chaminé, podendo produzir energia 24 h por dia;
- + Tirando a turbina e os componentes elétricos, a maior parte dos materiais usados pode ser encontrada próximo do empreendimento;
- + A turbina e o gerador são as únicas partes móveis, gerando confiabilidade e menos custos de manutenção;
- + A possibilidade de se usar parte do coletor solar como estufa para agricultura e de se usar a chaminé para instalar transmissores de telecomunicações (televisão, celular, rádio,...).

E também algumas desvantagens apontadas para um projeto de chaminé solar:

- A necessidade de se usar grandes áreas de terra plana, e com baixo custo e sem grande uso alternativo para o solo;
- A baixa eficiência energética da chaminé solar por si é um desestímulo a sua construção;
- Para a construção de chaminés tão altas pode ser necessário a utilização de técnicas construtivas avançadas e caras.

4 - Possíveis Locais para uma Usina Chaminé Solar no Brasil

4.1 - Recurso Solar no Brasil

A radiação do sol é a fonte de energia da chaminé solar, portanto para determinar a localização de um empreendimento destes, a irradiação integrada diária [J/m^2] do local é um dado fundamental. A irradiação integrada diária mede a energia média, que incide num metro quadrado, durante um dia.

No mundo, as regiões desérticas são as mais bem dotadas de recurso solar [11]. Exemplos são as regiões de Dongola, no deserto Arábico, no Sudão e, de Dagget, no deserto do Mojave, Estados Unidos.

No Nordeste do Brasil encontramos localidades que tem valores de radiação solar diária, média anual, comparáveis as melhores regiões do mundo [11], como vemos na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Valores da radiação solar diária, médias mensais, máximas, mínimas e anuais para algumas localidades no Brasil e no mundo. [11]

Localidade	Latitude	$H_{h(\minimo)}$ (MJ/m ²)	$H_{h(\maximo)}$ (MJ/m ²)	$H_{h(\anual)}$ (MJ/m ²)	$H_{h(\max.)}/H_{h(\min)}$
Dongola-Sudão	19°10'	19,1(Dez)	27,7(Mai)	23,8	1,4
Dagget - USA	34°52'	7,8(Dez)	31,3(Jun)	20,9	4,0
Belém-PA-Brasil	1°27'	14,2(Fev)	19,9(Ago)	17,5	1,4
Floriano -PI-Brasil	6°46'	17,0(Fev)	22,5(Set)	19,7	1,3
Petrolina-PE-Brasil	9°23'	16,2(Jun)	22,7(Out)	19,7	1,4
B. J. da Lapa -BA-	13°15'	15,9(Jun)	21,1(Out)	19,7	1,3
Cuiabá-MT-Brasil	15°33'	14,7(Jun)	20,2(Out)	18,0	1,4
B. Horizonte-MG-Brasil	19°56'	13,8(Jun)	18,6(Out)	16,4	1,3
Curitiba-PR-Brasil	25°26'	9,7(Jun)	19,4(Jan)	14,2	2,0
P. Alegre-RS-Brasil	30°1'	8,3(Jun)	22,1(Dez)	15,0	2,7

A radiação solar no Brasil varia entre 8 e 22 MJ/m².d. Apresenta um período de mínimo no trimestre maio-junho-julho, quando se registram intensidades de radiação na faixa entre 8 e 18 MJ/m².d. Neste trimestre de menor radiação, a região de máxima (18 MJ/m².d) encontrasse entre o leste do estado do Pará, oeste dos estados de Ceará e Bahia e a fronteira sul do estado da Bahia. A região de mínima radiação solar neste período ocorre ao sul do estado do Rio Grande do Sul, fig. 4.2.

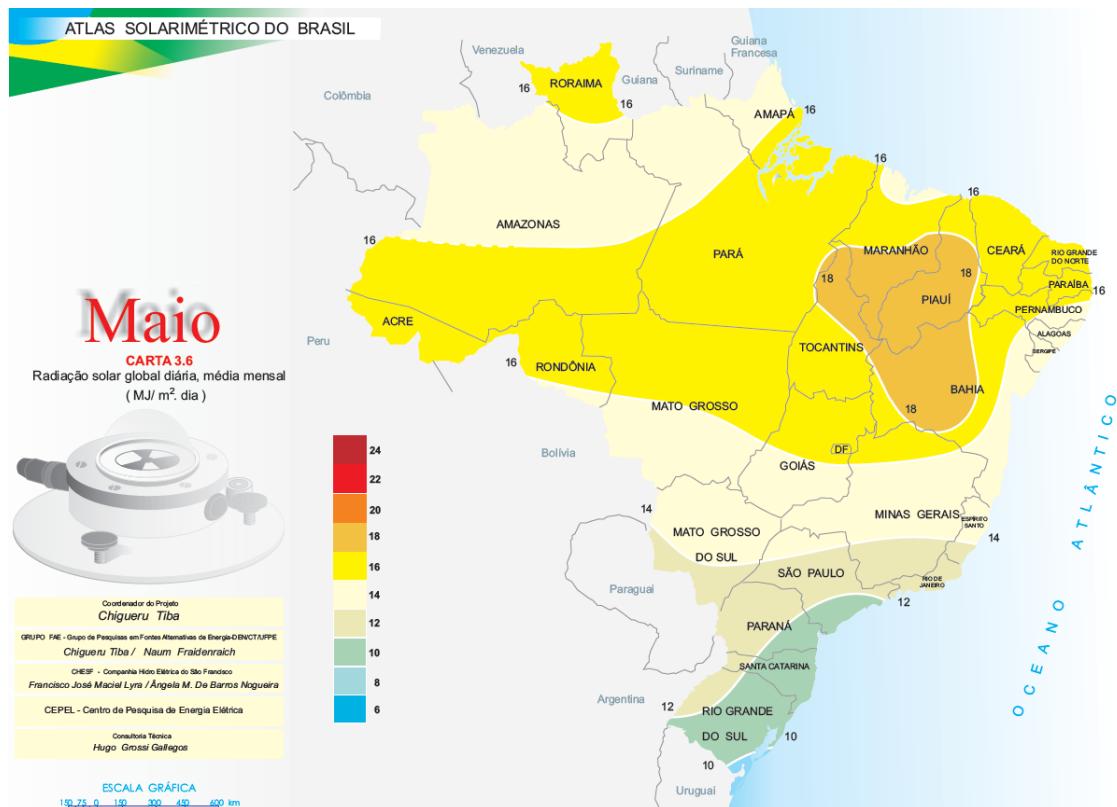


Fig. 4.2 – Radiação solar global diária, média mensal, para o mês de maio. [11]

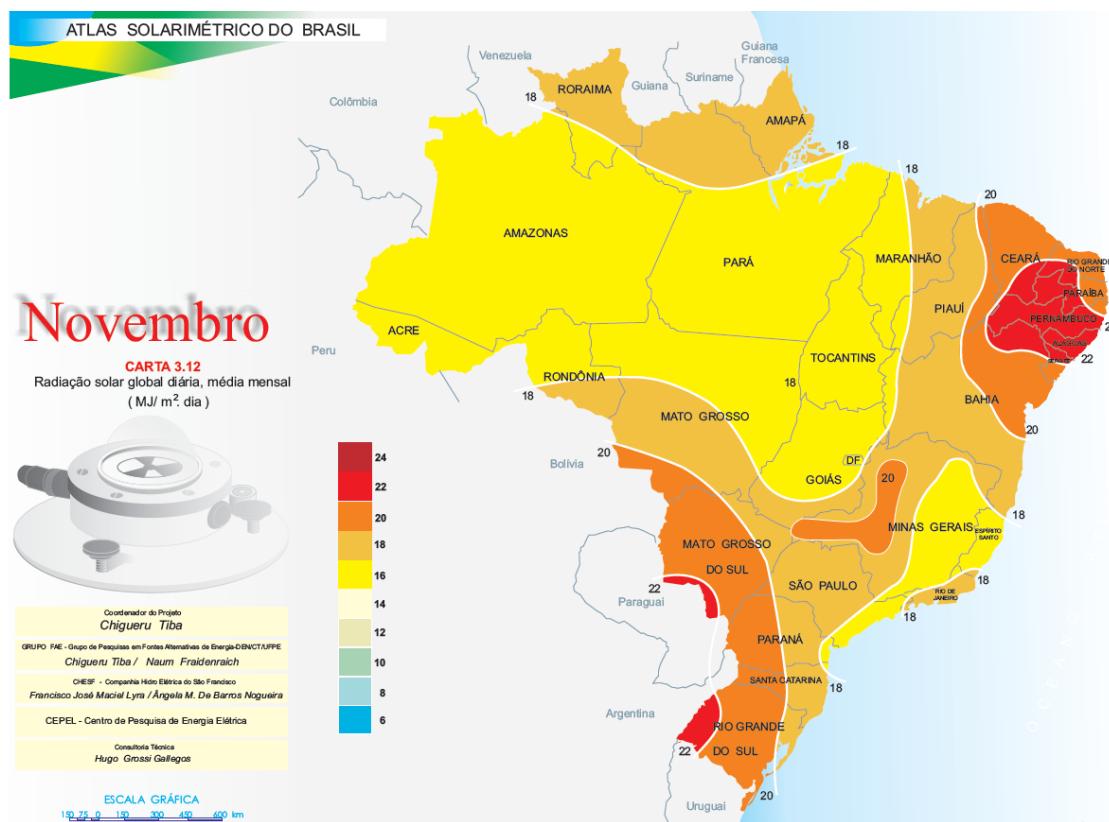


Fig. 4.3 – Radiação solar global diária, média mensal, para o mês de novembro. [11]

Já o período de maior radiação solar ocorre no trimestre outubro-novembro-dezembro, quando observam-se intensidades de radiação acima de $16 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}$, atingindo um valor máximo de $24 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}$, numa pequena região do centro-oeste do Rio Grande do Sul. Neste período, uma vasta região do Nordeste brasileiro recebe $22 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}$, fig. 4.3.

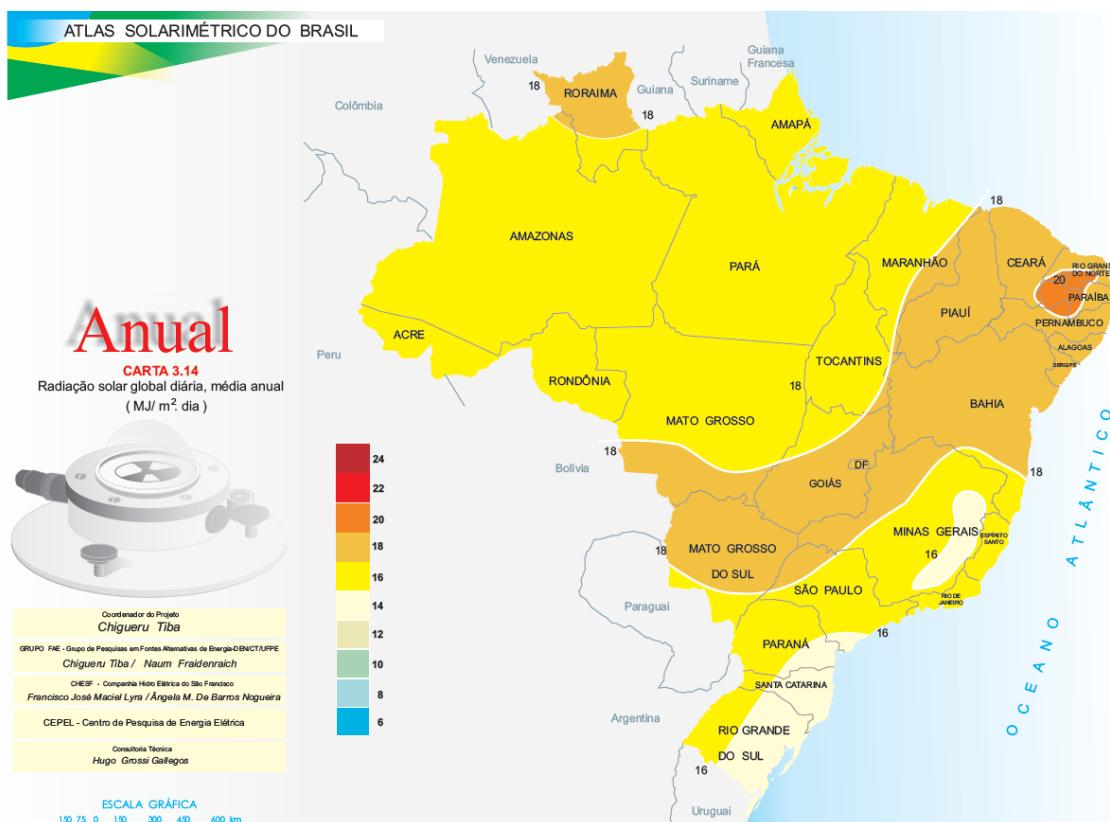


Fig. 4.4 – Radiação solar global diária, média anual. [11]

Na fig. 4.4 percebemos que o maior índice de radiação solar no Brasil, e menor índice de nebulosidade, se encontra na parte central da região Nordeste, onde as influências da costa marítima, da zona de convergência intertropical e dos sistemas frontais do sul são menores. [11]

Cabe ressaltar que as variações sazonais na região nordeste são menores, exemplo na tabela 4.1, fato que poderá resultar em importantes vantagens técnicas e econômicas para sistemas solares instalados nesta região.

4.2 - Relevo, biomas e uso do solo

Uma usina chaminé solar ocupa uma grande área. Para uma usina de 200 MW, Schlaich, J [3] propõe um coletor solar com 7 000 m de diâmetro. Portanto um empreendimentos destes necessitam de uma grande área, $38,5 \text{ Km}^2$, de terreno plano e com pouco uso alternativo.

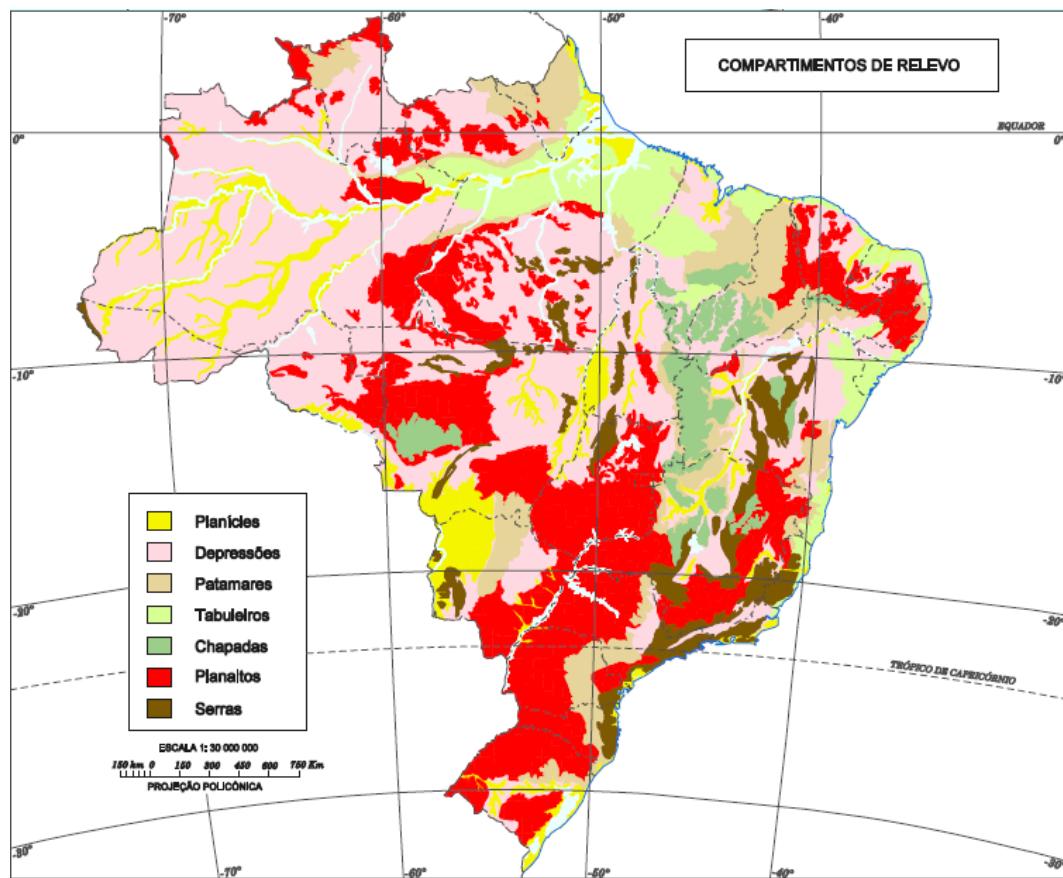


Fig. 4.5 – Compartimentos de relevo do território brasileiro. IBGE, 2006.

Áreas planas no território brasileiro não faltam, em planícies ou planaltos, como mostra a fig. 4.5. A questão é encontrar grandes áreas que não sejam agriculturáveis, que não tenham uso produtivo, nem sejam áreas de preservação, com um baixo custo.

Uma característica importante de uma usina chaminé solar é sua pouca necessidade de água para operar, principalmente se comparada com outras usinas geradoras de energia elétrica. Portanto chaminés solares se prestam para operar em regiões semiáridas ou desérticas.

Ao observar os biomas brasileiros, a caatinga se destaca, constituído principalmente por savana estépica, ocupa o estado do Ceará e parte do território de Alagoas, Bahia, Maranhão, Minas Gerais, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe.

Observamos que a região de maior índice de radiação solar (Fig. 4.4) se encontra no bioma caatinga, fazendo do interior da região nordeste uma excelente região para a implantação de uma chaminé solar.



Fig. 4.6 – Biomas brasileiros. [IBGE]

O interior do Rio Grande do Norte e da Paraíba, e a parte norte do agreste pernambucano formam uma região propícia a implantação de uma usina chaminé solar, no Brasil. É uma região de alta irradiação integrada diária, região semiárida, apresentando áreas com pouco uso alternativo.

5 - Viabilidade Econômica

5.1 - Custos de Construção

Para construção da chaminé solar a maior parte dos materiais utilizados é simples: concreto, aço e vidro. Usa-se mais aço ou concreto, dependendo da disponibilidade destes materiais para o local.

Os custos da construção de chaminé solar são estimados, já que nunca foi construída uma nesta escala de 100 MW. Para uma chaminé solar projetada para uma capacidade de 100 MW, apresentamos, na tabela 5.1, valores estimados para duas configurações possíveis, I e II, capazes de gerar 100 MW.

Tabela 5.1 – Possíveis configurações de Chaminé Solar, capazes de gerar 100 MW.

Configuração	I	II
Altura da torre (m)	1000	850
Diâmetro da torre (m)	110	110
Diâmetro do coletor (m)	4300	4950

Para estas duas configurações, na tabela 5.2, temos estimativas de custos realizadas por três autores. A: Schlaich,J. [3], B: Bernardes, M. A. Dos S. [9] e C: Fluri, T.P. [5]:

Tabela 5.2 – Custos para a construção de uma Chaminé Solar de 100 MW, em duas configurações possíveis.

Configuração	I	II	
Autores	A	C	B
Coletor (x10 ⁶ €)	107	497	190
Torre (x10 ⁶ €)	156	145	64
Unidade			
Conversora de			
Energia (x10 ⁶ €)	75	27	77
Investimento			
Total (x10 ⁶ €)	378	668	325
			792

A discrepância de valores apresentados por Fluri, T.P. pode ser atribuído ao fato dele ter estudado estas duas configurações mais recentemente, com outros critérios e em outro cenário econômico.

Na tabela 5.3 Schlaich,J. [3], B e Bernardes, M. A. Dos S. [9] apresentam estimativas de custos para a construção de Chaminés Solares com outras potências:

Tabela 5.3 - Custos para a construção de uma Chaminé Solar, para diversas potências.

Potência	5 MW		30 MW		200 MW	
Autores	A	B	A	B	A	B
Coletor (x10⁶ €)	10	19,8	48	75,8	261	-
Torre (x10⁶ €)	19	6,2	49	23,3	170	-
Unidade Conversora de Energia (x10⁶ €)	8	3,8	32	23	133	-
Investimento	42	33,1	145	132,5	606	-
Total (x10⁶ €)						

5.2 - Custo de Eletricidade Equalizado (LEC)

Para avaliar a viabilidade econômica de um projeto de uma usina destas e poder comparar com outros projetos de geração de energia elétrica utilizamos o Custo de Eletricidade Equalizado (LEC). Que é uma medida do custo específico da energia gerada, que leva em conta, além do custo de construção, custos de manutenção, operação e financeiros desta usina, sobre o total de energia elétrica gerada, ao longo de toda vida útil desta usina.

O valor presente dos custos de operação e manutenção, ao longo da vida útil da usina, pode ser calculado por:

$$C_{OM} = \frac{A_1}{f-i} \left[\left(\frac{1+f}{1+i} \right)^N - 1 \right] \quad (17)$$

Onde:

A_1 – fluxo de caixa, ou no caso, custo de operação e manutenção, no final do primeiro ano;

f – Taxa de inflação;

i – Taxa de juros;

N – vida útil da usina, em anos.

Somando este valor ao custo de construção, C_C , da usina temos o custo total da usina, ao longo de sua vida útil, chamado aqui C_T .

$$C_T = C_C + C_{OM} \quad (18)$$

Um valor anual equivalente, do custo total da usina, ao longo da vida útil desta, C_A , é dado por:

$$C_A = C_T \left[\frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \right] \quad (19)$$

Conhecendo a produção anual de energia, PAE, calculamos o LEC, dividindo o custo anual equivalente pela produção anual de energia:

$$LEC = \frac{C_A}{PAE} \quad (20)$$

Para a configuração I, para os dados de Schlaich,J. [3], considerando uma inflação de 3,5 %a.a., uma taxa de juros de 6 %a.a. e um custo operacional de $1,9 \times 10^6$ € no final do primeiro ano, temos um custo operacional e de manutenção de:

$$C_{OM} = \frac{1,9}{0,035 - 0,06} \left[\left(\frac{1+0,035}{1+0,06} \right)^{30} - 1 \right]$$

$$C_{OM} = 38,859 \times 10^6 \text{ €}$$

Somando a um custo de construção de 378×10^6 € temos um custo total de :

$$C_T = 416,859 \times 10^6 \text{ €, que anualizado resulta:}$$

$$C_A = 416,859 \left[\frac{0,06(1+0,06)^{30}}{(1+0,06)^{30} - 1} \right]$$

$$C_A = 30,284 \times 10^6 \text{ €}$$

Podemos, então, determinar o LEC:

$$LEC = \frac{30,284}{320}$$

$$LEC = 0,09 \text{ €/kWh}$$

Para a configuração II, Bernardes, M. A. Dos S. [9], propõe uma taxa de juros de 8 %a.a., uma inflação de 3,25 %a.a. e um período de construção de dois anos, nos quais serão pagos juros sobre o capital investido. Considera que o custo de operação e manutenção no primeiro ano seja de 1×10^6 €. Podemos então apresentar os valores de LEC para as duas configurações, usando os valores de produção anual de energia apresentada pelos três autores, temos na tabela 5.4:

Tabela 5.4 – Custo de Eletricidade Equalizado calculado para as duas configurações estudadas I e II.

Configuração	I	II		
Autores	A	C	B	C
Produção Anual de Energia (GWh/a)	320	190,4	281	181,3
LEC (€/kWh)	0,09	0,27	0,125	0,43

Os valores acima ainda são influenciados por variáveis econômicas como taxas de juros, tempo de depreciação, custo de mão de obra local.

Quando comparamos os valores de custo de eletricidade equalizado (LEC) para uma chaminé solar com o LEC de outras tecnologias, fig. 5.5, percebemos que os valores obtidos por Flury [6] estão acima do custo de outras tecnologias. Já outros autores, [3] e [9], encontram valores menores para o LEC.

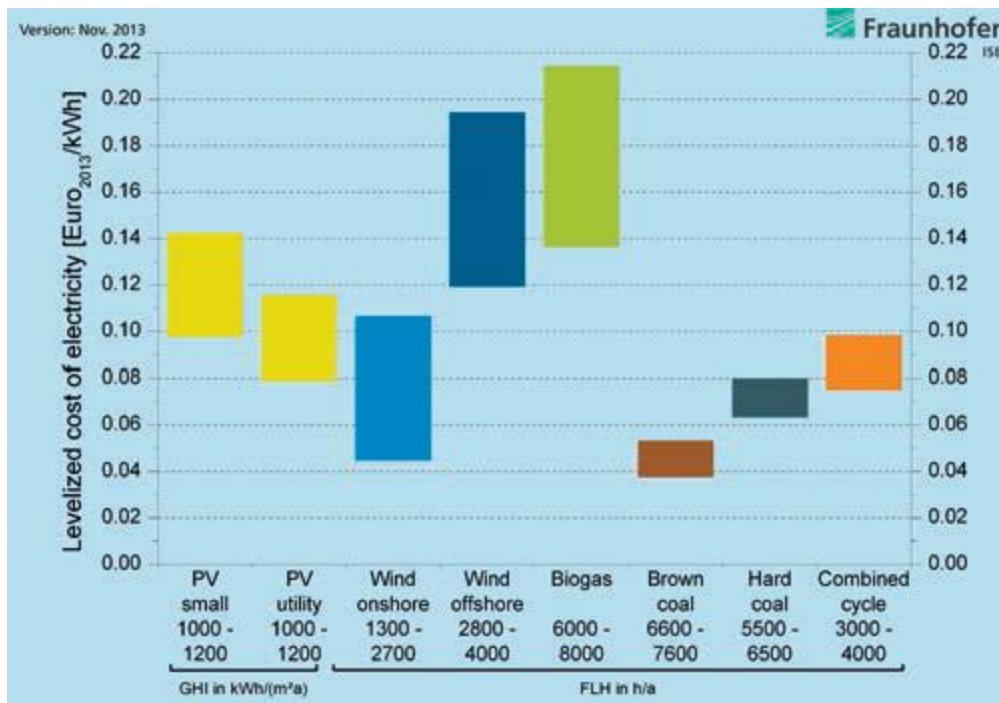


Fig. 5.5 – Custo de eletricidade equalizado para diferentes tecnologias de geração na Alemanha. [12]

Para as chaminés solares quando aumentamos a potência instalada do projeto, o custo específico diminui, tabela 5.3. Schlaich [3] encontra 0,11 €/kWh, para uma chaminé solar de 30 MW, e para uma usina de 200 MW o LEC encontrado é 0,07 €/kWh.

Observamos, na fig. 5.5, que uma chaminé solar de 200MW já apresenta um custo de produção de energia competitivo com outras tecnologias.

5.3 – Chaminé solar no Brasil

Os materiais básicos necessários para a construção de uma chaminé solar, concreto, aço e vidro, podem ser encontrados em qualquer região do Brasil.

Para a construção de uma chaminé solar de 200 MW no Brasil, o custo de energia equalizado de 0,07 €/kWh, considerando o preço do euro a R\$ 3,20, nos resulta num custo

de R\$ 224 /MWh. Valor ainda alto quando comparado com os valores praticados nos últimos leilões de energia no país.

Já o custo da mão de obra no Brasil é menor que o considerado nos cálculos de custos aqui apresentados, para mão de obra não especializada foi considerado 5 €/h. Neves [2] afirma que estudos feitos indicam que uma chaminé solar construída na Índia custaria 70% do valor da mesma obra realizada na Europa, devido ao menor valor da mão de obra.

Se esta proporção de 70 % também acontece no Brasil, e sabendo que o custo da construção da chaminé solar corresponde a 70% de todo o investimento feito, o custo equalizado desta energia chegaria a R\$ 177 /MWh, valor comparável ao verificado em termoelétricas, como vemos na fig. 5.6.

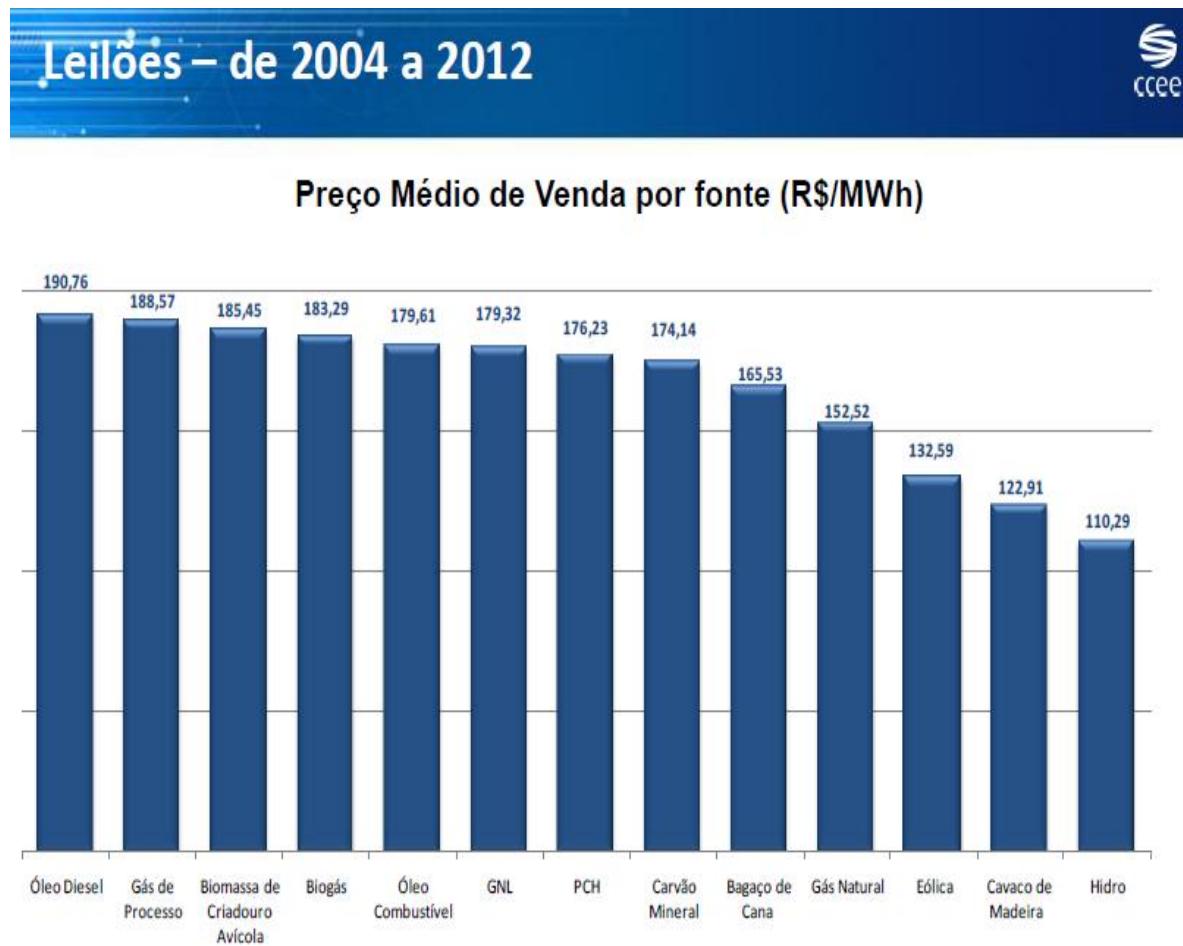


Fig. 5.6 - Preço médio de venda por fonte em leilões, entre 2004 e 2012. (Dados atualizados pelo IPCA de nov/2012). [CCEE]

Apesar de uma chaminé solar com potência de 30 MW se encaixar nos critérios de uma fonte incentivada, que daria desconto nas tarifas de TUST e TUSD, o LEC de 0,11 €/kWh, que em reais corresponde a R\$ 352 /MWh é muito alto.

Valor este só comparável ao contratado em leilões do PROINFA (Fig. 5.7).

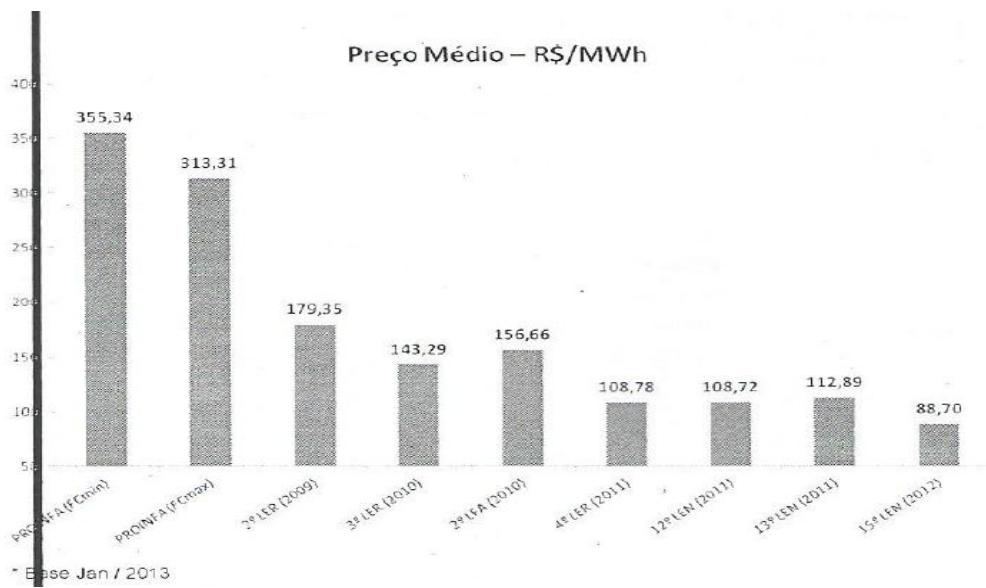


Fig. 5.7 – Evolução de preços de energia elétrica em Leilões. [13]

6 – Resultados e discussões

Uma chaminé solar é capaz de gerar 200 MW de potência, suficiente para abastecer uma cidade de 200 mil habitantes, a partir da energia do sol, tanto a radiação solar direta, como a indireta, que é captada no coletor de ar solar, onde parte desta energia é transmitida para o ar, sob a cobertura de vidro.

Este fluxo de ar aquecido tem uma diferença de temperatura, de 35 K, e de densidade, em relação ao ar externo, diferença que cria uma força motriz, capaz de acionar uma turbina e mover os geradores.

Como uma usina geradora de energia elétrica, uma chaminé solar apresenta uma grande inércia e estabilidade termodinâmica durante seu funcionamento, podendo funcionar a noite também. A turbina e o gerador são as únicas partes móveis, gerando confiabilidade e menos custos de manutenção.

A radiação solar no Brasil varia entre 8 e 22 MJ/m².d. Apresenta um período de mínimo no trimestre maio-junho-julho, quando se registram intensidades de radiação na faixa entre 8 e 18 MJ/m².d. Já o período de maior radiação solar ocorre no trimestre outubro-novembro-dezembro, quando observam-se intensidades de radiação acima de 16 MJ/m².d, atingindo um valor máximo de 24 MJ/m².d.

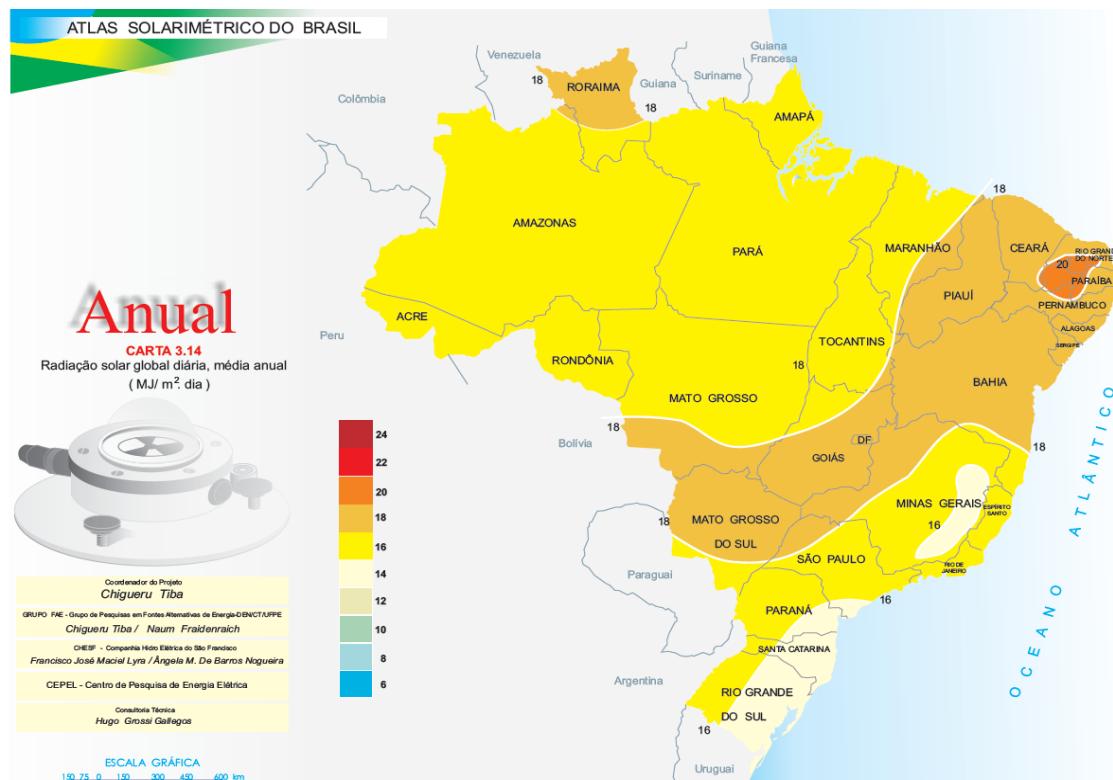


Fig. 6.1 – Radiação solar global diária, média anual. [11]

A parte central da região Nordeste, onde as influências da costa marítima, da zona de convergência intertropical e dos sistemas frontais do sul são menores, apresenta o maior índice de radiação solar no Brasil, média anual de $22 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{dia}$, e menor índice de nebulosidade. Cabe ressaltar que as variações sazonais do índice de radiação solar nesta região são menores, podendo resultar em importantes vantagens técnicas e econômicas para sistemas solares instalados nesta região.

No interior da região nordeste encontramos a caatinga, região semiárida, bioma propício a instalação de uma usina chaminé solar, já que esta depende de pouca água para sua operação. Nesta região, também encontramos áreas planas com pouco uso alternativo do solo, condições necessárias para instalação de uma usina chaminé solar.

Apesar do baixo custo de operação e manutenção, esperado para uma usina chaminé solar, o alto custo de construção da usina, em torno de 600 milhões de euros para uma usina de 200 MW, torna-a economicamente pouco competitiva diante de outras usinas geradoras de energia que também usam fontes renováveis de energia.

O melhor valor esperado para o Custo de Eletricidade Equalizado (LEC), numa usina de 200 MW, é 0,07 €/kWh, custo coberto somente em preços praticados nos leilões do PROINFA.

Apesar de uma chaminé solar apresentar uma série de vantagens técnicas e ecológicas como usina geradora de eletricidade, ela não tem viabilidade econômica, a menos que receba incentivos financeiros para sua construção ou que se encontrem maneiras de melhorar sua baixa eficiência na conversão da energia.

7 - Bibliografia

- [1]- Pacheco, C. R.; Notas de aula do curso ERG-006 – Energia Solar I; PECE- Poli, USP
- [2]- Neves, L d S **Chamine Solar, uma Alternativa para Angola?** . 2005. 253 f. Tese (Mestrado em Gestão de Sistemas Ambientais. Instituto Superior de Ciências do Trabalho e da Empresa, Angola.
- [3]- Schlaich, J., Bergermann, R., Schiel, W., Weinrebe, G. **Design of Commercial Solar Tower System – Utilization of Solar Induced Convective Flows for Power Generation.** Journal of Solar Energy Engineering, ASME, Vol. 127, p.117-124, 2005.
- [4]- Ferreira, A.G., Maia, C.B., Valle,R.M., Cortez, M.F.B.. **Balanço Energético de uma Chaminé Solar.** RECIE, Uberlândia, v. 15, n. 1/2, p. 37-43, jan.-dez. 2006.
- [5]- Fluri, T.P., Von Backström, T.W.. **Performance analysis of the power conversion unit of a solar chimney power plant.** Revista Solar Energy 82, Ed. Elsevier, p. 999–1008, 2008.
- [6]- Fluri, T.P., Pretorius, J.P., et Alli. **Cost analysis of solar chimney power plants.** Revista Solar Energy 83, Ed. Elsevier, p. 246–256, 2009.
- [7]- Maia, C.B., Ferreira, A.G., Valle, R.M., Cortez, M.F.B.. **Theoretical evaluation of the influence of geometric parameters and materials on the behavior of the airflow in a solar chimney.** Revista Computers & Fluids 38, Ed. Elsevier, p. 625–636, 2009.
- [8]- Dhahri, A., Omari, A.. A **Review of solar Chimney Power Generation Technology.** International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) ISSN: 2249 – 8958, Volume-2, Issue-3, February 2013.
- [9] – Bernardes, M. A. Dos S.. — **Technische, ökonomische und ökologische Analyse von Aufwindkraftwerken.** mai 2004.
- [10] – Li, J., Guo, P., Wang, Y.. **Effects of collector radius and chimney height on power output of a solar chimney power plant with turbines.** Revista Renewable Energy 47 , Ed. Elsevier, p. 21–28, 2012.
- [11] – Tiba, C et Alli. **Atlas Solarimétrico do Brasil.** Ed. UFPE, 2000.
- [12] – Kost, C et Alli. **Levelized Cost of Electricity Renewable Energy Technologies.** Fraunhofer Institut For Solar Energy Systems I S E., nov-2013.
- [13] – Salles, M.; Notas de aula do curso ERG-005 – Energia Eólica; PECE- Poli, USP.